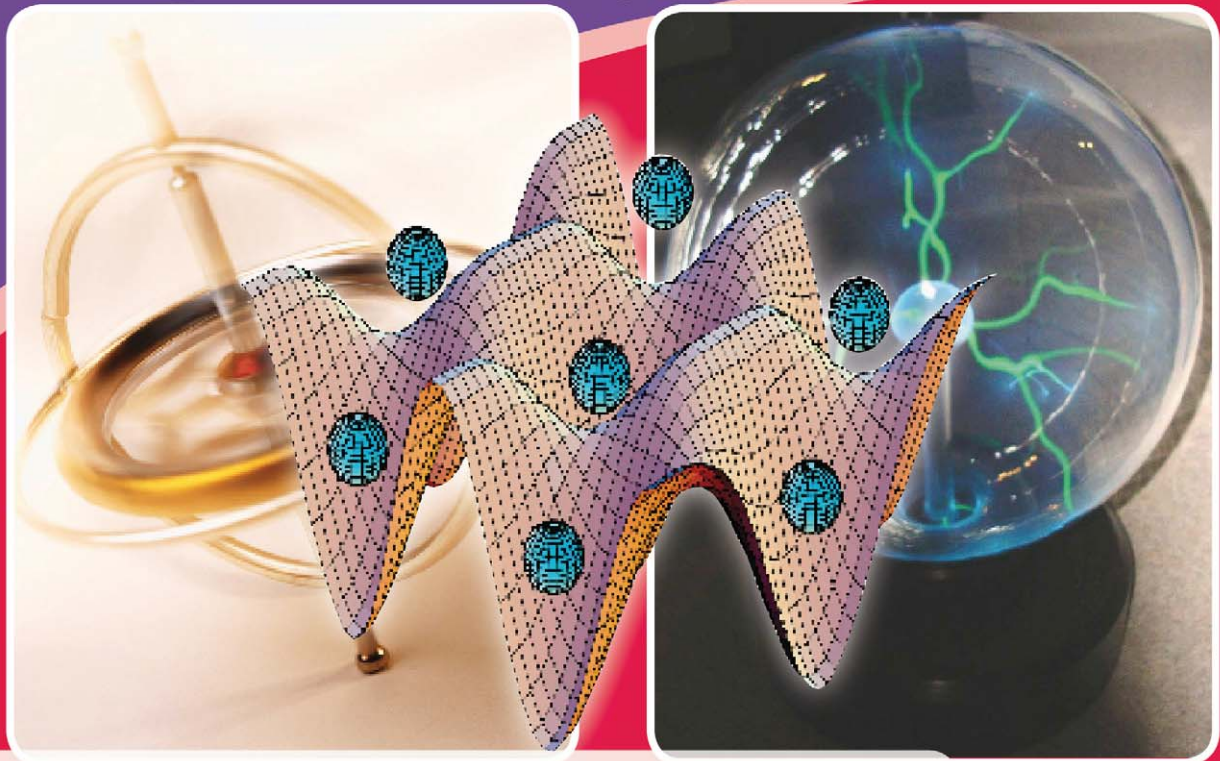


JILID 2

Mashuri, dkk.

FISIKA

untuk
Sekolah Menengah Kejuruan
Kelompok Non-Teknologi



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional

Mashuri, dkk.

FISIKA NON TEKNOLOGI

JILID 2

SMK



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

FISIKA NON TEKNOLOGI

JILID 2

Untuk SMK

Penulis : Mashuri
Hasto Sunarno
Zaenal Arifin
Arif Bustomi

Editor : Suminar Pratapa

Perancang Kulit : TIM

Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

MAS MASHURI
f Fisika Non Teknologi Jilid 2 untuk SMK /oleh MASHURI ----
Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan,
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah,
Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
viii. 165 hlm
Daftar Pustaka : A1
Glosarium : B1-B5
ISBN : 978-602-8320-23-8
978-602-8320-25-2

Diterbitkan oleh
Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2008

KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan karunia Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, telah melaksanakan kegiatan penulisan buku kejuruan sebagai bentuk dari kegiatan pembelian hak cipta buku teks pelajaran kejuruan bagi siswa SMK. Karena buku-buku pelajaran kejuruan sangat sulit di dapatkan di pasaran.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK dan telah dinyatakan memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh penulis yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para pendidik dan peserta didik SMK. Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Dengan ditayangkan *soft copy* ini diharapkan akan lebih memudahkan bagi masyarakat khususnya para pendidik dan peserta didik SMK di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri untuk mengakses dan memanfaatkannya sebagai sumber belajar.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para peserta didik kami ucapkan selamat belajar dan semoga dapat memanfaatkan buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, 17 Agustus 2008
Direktur Pembinaan SMK

KATA PENGANTAR

Untuk meningkatkan kualitas sumber daya manusia, peningkatan, pengembangan dan pembinaan terhadap pelaksanaan pendidikan nasional merupakan hal yang paling penting. Di pihak lain perkembangan industri dan tatanan masyarakat lain sebagai pengguna tenaga manusia terdidik terus berkembang sesuai dengan perubahan di segala bidang sehingga diperlukan penyedia sumber daya manusia yang mampu memenuhi kebutuhan tersebut. Pemenuhan tenaga terdidik yang berkualitas bergantung pada pola pendidikan, dimana proses pendidikan yang baik harus selalu dilakukan perbaikan di semua jenjang pendidikan baik dari tingkat dasar, menengah dan tinggi.

Jenjang pendidikan menengah merupakan jenjang yang menjadi pembentukan karakter bagi anak didik yang nantinya akan menentukan keberhasilan suatu bangsa, dimana dari jenjang inilah dimulainya klasifikasi kompetensi diri untuk mengisi sejumlah bidang kehidupan di masyarakat umumnya maupun secara spesifik bidang sains, teknologi, ekonomi, agama dan sosial budaya. Pendidikan menengah terdiri sekolah menengah umum, sekolah menengah keagamaan dan sekolah menengah kejuruan. Secara khusus sekolah

menengah kejuruan dipersiapkan untuk mendidik siswa menjadi tenaga terampil dan praktis sesuai kompetensinya yang nantinya disalurkan pada jenjang pendidikan tinggi yang serumpun.

Bersamaan perubahan perkembangan jaman dengan dibukanya peluang bagi semua siswa lulusan dari berbagai jenis sekolah menengah, baik yang bersifat sekolah menengah umum, kejuruan ataupun keagamaan, agar siswa lulusannya mampu berkompetisi masuk di perguruan tinggi, maka sebagai konsekuensinya pemerintah harus menyediakan, mengelola dan membina terhadap fasilitas software maupun hardware untuk sekolah menengah kejuruan dan sekolah menengah keagamaan yang mengalami ketertinggalan dibandingkan dengan sekolah menengah umum, akibat adanya perubahan kebijakan tersebut.

Dalam upaya peningkatan kualitas pendidikan dan pengajaran mata pelajaran Fisika untuk Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) se Indonesia khususnya kompetensi non teknologi, maka pihak Direktorat Pendidikan Sekolah Menengah dan Kejuruan Depdiknas melakukan kerjasama dengan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Karena ITS dipandang telah memiliki pengalaman dalam membina mahasiswa baru yang berasal dari kelompok sekolah menengah kejuruan untuk ikut program pembenahan tersebut.

Kebijakan pencanangan tahun 2015 oleh pemerintah agar perbandingan jumlah siswa SMU terhadap SMK menjadi 30 : 70

prosen, dimana terbalik dari kondisi sekarang, maka harus dilakukan langkah-langkah perubahan dengan berbagai pembenahan. Pembenahan dapat dimulai dari penyediaan buku ajar yang berbahan baku standar, lengkap dan disajikan secara lebih populer, yaitu mudah dipahami dan terjangkau. Permasalahan di lapangan adalah keberagaman system pengelolaan sekolah menengah kejuruan di berbagai daerah sudah lama dibebaskan dengan porsi kurikulum terbesarnya pada muatan lokal, dengan kompetensi yang terlalu sempit, karena kebijakan bahwa SMK harus padu dan terkait dengan kebutuhan lingkungan terdekatnya.

Untuk pengajaran mata pelajaran Fisika, umumnya para guru SMK, belum mempunyai pedoman yang seragam dan tegas. Tiap SMK memiliki arahan dan kebijakan tersendiri. Guru lebih memilih untuk meracik sendiri materi yang akan diberikan kepada siswanya dari berbagai buku fisika yang teersedia dan berdasar pengalaman sewaktu menempuh pendidikan di bangku kuliah. Di sisi lain untuk SMK berkualitas, seringkali terjebak dalam “standar kurikulum” yang disesuaikan dengan selera industri pemakai tenaga lulusannya.

Program penyediaan buku yang standar nasional, selalu dibarengi dengan penyesuaian lamanya waktu yang dibutuhkan untuk pelaksanaan di lapangan, penyiapan guru pengajarnya, upaya mendapatkan umpan balik, revisi buku dan pembakuan kurikulum. Diharapkan semua program hendaknya dapat dijalankan dengan tanpa mendikte ataupun dengan pemaksaan, karena harus mengejar target waktu agar cepat terselesaikan, sedangkan di lapangan masih dibutuhkan suatu panduan yang lebih implementatif dan aplikatif. Hal ini mengingatkan SMK telah berjalan dengan budaya dan mapan dengan lingkungannya. Perubahan hendaknya secara bertahap dan dengan kesadaran institusinya serta sesuai tuntutan lingkungan, lapangan kerja dan kesiapan bersaing dari lulusannya.

Demikian kami sampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Sekolah Menengah dan Kejuruan Depdiknas atas terselenggaranya kerjasama ini, sehingga menggugah kesadaran para guru dan dosen akan tanggung jawabnya terhadap kualitas pendidikan di Sekolah Menengah Kejuruan, semoga Allah SWT membalas dedikasi dan amal baik tersebut. Amin.

Tim Penyusun.

DAFTAR ISI

Halaman Depan	
Kata Sambutan	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	
BUKU JILID 1	
BAB 1 Besaran dan Satuan	1
Peta Konsep	2
Pra Syarat	4
Cek Kemampuan	4
1.1. Pengukuran	4
1.2. Melaporkan Hasil pengukuran	7
1.3. Besaran dan Satuan	8
1.4. Standar Satuan Besaran	9
1.5. Macam Alat Ukur	12
1.6. Konversi Satuan	20
1.7. Dimensi	22
1.8. Angka Penting	23
1.9. Notasi Ilmiah (Bentuk Baku)	24
1.10. Vektor	25
1.11. Rangkuman	31
1.12. Tugas Mandiri	31
1.13. Soal Uji Kompetensi	
BAB 2 Menerapkan Hukum Gerak Dan Gaya	38
Peta Konsep	39
Prasyarat	40
Cek Kemampuan	40
2.1. Gerak dan Gaya	41
2.2. Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLB)	42
2.3. Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)	44
2.4. Hukum - Hukum Newton Tentang Gerak	49
2.5. Gerak Benda Yang Dihubungkan Dengan Katrol	54
2.6. Benda Bergerak Pada Bidang Miring	55
2.7. Gaya Gesek	56

2.8. Gerak Melengkung	59
Kegiatan	74
Rangkuman	76
Soal Uji Kompetensi	77
BAB 3 Dinamika Rotasi dan Kestimbangan	
Benda Tegar	80
Peta Konsep	81
Dinamika Rotasi	82
Cek Kemampuan Prasyarat	82
3.1. Kecepatan Dan Percepatan Angular	82
3.2. Pemecahan Masalah Dinamika Rotasi	96
3.3. Titik Berat	99
Rangkuman	101
Soal Kompetensi:	102
BAB 4 Usaha dan Energi	106
Peta Konsep	107
Prasyarat	108
Cek Kemampuan	108
4.1. Usaha	108
4.2. Daya	111
4.3. Konsep Energi	112
4.4. Energi Mekanik	115
4.5. Kerja Oleh Gaya Konservatif Dan Oleh Gaya Non Konservatif.	116
Kegiatan	118
Rangkuman	119
Soal Uji Kompetensi	120
BAB 5 Momentum dan Impuls	122
Peta Konsep	123
Prasyarat	124
Cek Kemampuan	124
5.1. Pengertian Momentum Dan Impuls	124
5.2. Impuls sebagai perubahan Momentum	125
5.3. Hukum Kekekalan Momentum	126
5.4. Tumbukan	128
Kegiatan	130
Rangkuman	131
Soal Uji Kompetensi	131

BAB 6 Suhu dan Kalor	135
Peta Konsep	136
Pengukuran Temperatur	137
6.1. Temperatur Gas Ideal, Termometer Celcius, Dan Termometer	137
6.2. Tekanan	138
6.3. Asas Black Dan Kalorimetri	139
6.4. Hantaran Kalor.	140
6.5. Hantara Kalor	142
Soal-Soal Dengan Penyelesaiannya	143
BAB 7 Dinamika Fluida	149
Peta Konsep	
Prasyarat	
Cek kemampuan	
7.1. Fluida Statis	151
7.2. Tegangan Permukaan Dan Viskositas Zat Cair	157
7.3. Dinamika Fluida	161
7.4. Aliran Viscous (Aliran Kental)	173
Rangkuman	175
Soal Kompetensi	176
BUKU JILID 2	
BAB 8 Getaran, Gelombang dan Bunyi	178
Peta Konsep	179
Prasyarat	180
Cek Kemampuan	181
8.1. Hakekat Getaran	181
8.2. Persamaan Simpangan Getaran	188
8.3. Energi Getaran	189
8.4. Hakekat Gelombang	197
8.5. Kecepatan Rambat Gelombang	202
8.6. Persamaan Gelombang	205
8.7. Gelombang Bunyi	207
8.8. Efek Doppler	215
8.9. Rangkuman	218
8.10. Soal / Uji Kompetensi	218
BAB 9 Medan Magnet	222

Peta Konsep	223
Pra Syarat	224
Cek Kemampuan	224
9.1. Uraian Dan Contoh Soal	224
9.2. Induksi Magnet	225
9.3. Medan Magnet Oleh Arus Listrik	227
9.4. Gerak Muatan Listrik Dan Medan Magnet	231
9.5. Kumparan Dalam Medan Magnet	233
9.6. Pemakaian Medan Magnet	236
9.7. Alat-Alat Ukur Listrik	239
9.8. Gelombang Elektromagnetik	241
9.9. Intensitas Gelombang Elektromagnetik	242
9.10. Uji Kompetensi	246
BAB 10 Rangkaian Arus Searah	250
Peta Konsep	251
Cek Kemampuan	252
10.1 Arus Searah Dalam Tinjau Mikroskopis	253
10.2. Hukum Ohm	259
10.3. Ggl Dan Resistansi Dalam	260
10.4. Hukum Kirchhoff	263
10.5. Sambungan Resistor	266
10.6. Sambungan Seri	266
10.7. Sambungan Paralel	267
10.8. Soal Uji Kompetensi	291
10.9. Rangkuman	298
BAB 11 Arus Bolak-Balik	300
Peta Konsep	301
Cek Kemampuan	302
11.1. Resistor Dalam Rangkaian Sumber Tegangan Searah	303
11.2. Gejala Peralihan Pada Induktor	305
11.3. Gejala Transien Pada Kapasitor	308
11.4. Sumber Tegangan Bolak Balik	313
11.5. Resistor Dalam Rangkaian Sumber Tegangan Bolak Balik	315
11.6. Nilai Root–Means–Squared (Rms) Untuk Tegangan Dan Arus Bolak Balik	317
11.7. Daya Dalam Rangkaian Arus Bolak Balik	318
11.8. Induktor Dalam Rangkaian Arus Bolak Balik	319
11.9. Kapasitor dalam rangkaian arus bolak-balik	321

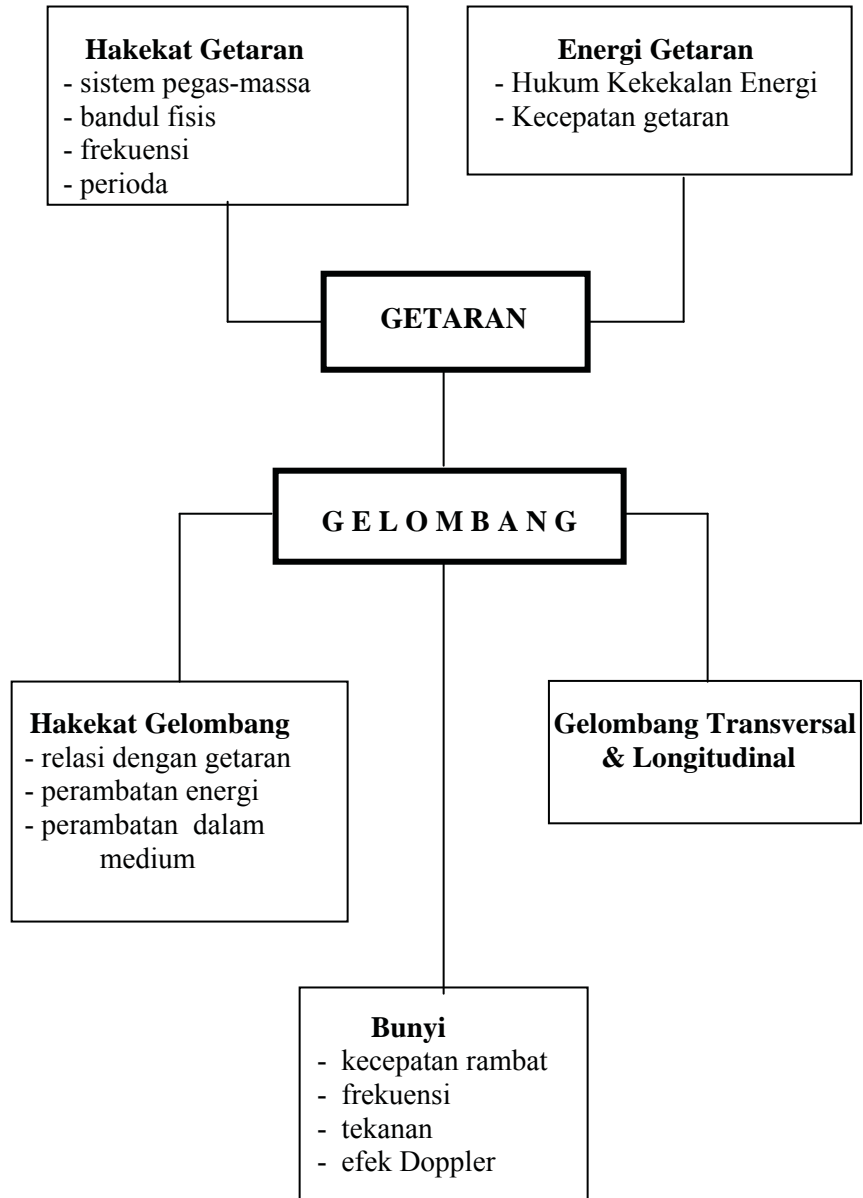
11.10. Rangkaian RLC - seri	323
11.11. Impedansi	324
11.12. Perumusan Impedansi Rangkaian RL–Seri	328
11.13. Perumusan Impedansi Rangkaian RC–Seri	329
11.14. Perumusan Impedansi Rangkaian RLC–Seri	331
11.15. Resonansi pada rangkaian RLC- seri	332
11.16. Ringkasan Rangkaian RLC – seri dalam arus Bolak-balik	333
11.17. Rangkuman	346
11.18. Soal Uji Kompetensi	348
<i>Daftar Pustaka</i>	<i>A1</i>
<i>Glosarium</i>	<i>B1</i>

BAB 8 GETARAN, GELOMBANG DAN BUNYI



Ketika teknologi komunikasi telah sedemikian majunya saat ini, teknologi dan permasalahan pertanian harus pula dikelola dengan cara-cara yang lebih modern. Kita mungkin masih ingat atau barangkali melihat di film-film dokumenter bapak tani mengayuh sepedanya cepat-cepat untuk mengabarkan pada teman-temannya bahwa ada serangan hama wereng, atau serangan tikus. Adegan semacam itu, sekarang tidak nampak lagi, karena para petani telah memiliki handphone untuk saling berkomunikasi. Segala macam berita sekarang dapat disebarakan dengan cara yang sangat cepat dan menjangkau daerah yang lumayan jauh. Semua ini dapat terjadi karena kemajuan teknologi komunikasi yang antara lain berkembang karena para ahli semakin memahami sifat-sifat gelombang dan memanfaatkannya hingga berdayaguna. Selain di bidang komunikasi, di toko-toko sudah mulai dipasarkan alat yang memanfaatkan gelombang untuk mengusir tikus.

Sumber dari setiap gelombang, apakah gelombang bunyi, gelombang ultraviolet atau gelombang elektromagnetik adalah getaran, sehingga gelombang sering juga dikatakan sebagai getaran yang dirambatkan. Karena itu sebelum mendalami tentang gelombang, pembahasan akan diawali dengan pengenalan tentang getaran terlebih dahulu.

PETA KONSEP

Pra Syarat

Untuk dapat mengerti pembahasan bab ini dengan baik, siswa sebaiknya telah mempelajari dan mengerti tentang masalah gerakan benda (kecepatan, percepatan) dan terutama gerak benda dengan kecepatan yang tidak konstan. Selain itu siswa diharapkan telah mengerti tentang makna gaya dan kaitannya dengan gerak benda. Dalam segi matematika, selain aljabar dan fungsi trigonometri siswa diharapkan telah mengerti tentang makna dari fungsi dua variabel.

Cek Kemampuan

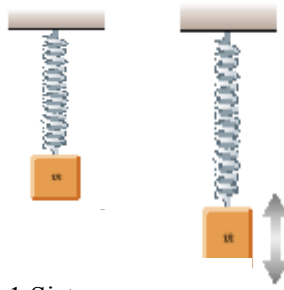
1. Sebuah bandul terdiri dari tali yang panjangnya 50 cm digantungi beban yang massanya 100 gram. Hitunglah frekuensi dan perioda ayunan bandul tersebut. Apakah hasilnya tergantung pada massa beban yang digantungkan?
2. Sebuah benda bergerak harmonik dengan perioda 0,5 sekon dan amplitudo 6 cm. Pada saat awal, benda ada pada posisi $x = 0$. Di manakah benda berada setelah 0,8 sekon? Berapa kecepatannya saat itu?
3. Gelombang transversal merambat dalam dawai dengan kecepatan sebesar 100 m/s. Berapakah kecepatan rambat gelombang transversal itu bila tegangan dawai digandakan?
4. Sebuah gelombang longitudinal dirambatkan dengan kecepatan rambat 600 m/s. Berapakah panjang gelombangnya bila frekuensi gelombang itu adalah 300 Hz?
5. Sebuah kereta bergerak dengan kecepatan 108 km/jam menuju sebuah stasiun sambil membunyikan sirenenya. Kepala stasiun mendengar bunyi sirene itu dengan frekuensi 1000 Hz. Berapakah sebenarnya frekuensi sirene kereta api itu?

8.1 Hakekat Getaran

Berikut ini adalah contoh-contoh sistem yang melakukan getaran.

A. Sistem pegas-massa

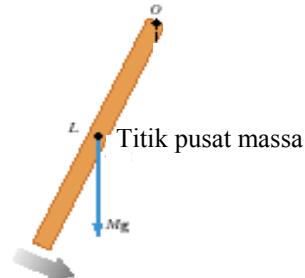
Perhatikan balok bermassa m yang dikaitkan pada ujung pegas yang digantungkan secara vertikal (Gambar 8.1). Bila balok m ditarik ke bawah, kemudian dilepaskan, maka balok tersebut akan melakukan gerakan naik-turun-naik-turun berulang-ulang. Balok dikatakan bergetar.



Gambar 8.1 Sistem pegas – massa yang bergetar

B. Sistem bandul fisis

Perhatikan sekarang penggaris yang digantungkan pada sebuah paku (Gambar 8.2). Bila penggaris tersebut disimpangkan dari posisi vertikalnya, maka penggaris akan berayun, menyimpang ke kanan dan ke kiri secara berulang-ulang dan penggaris dikatakan bergetar. Susunan benda dengan getaran yang mirip dengan itu disebut sistem bandul fisis.



Gambar 8.2 Sistem getaran bandul fisis

Dari dua contoh tadi dapat disimpulkan bahwa getaran adalah suatu gerakan yang khas, yaitu gerakan yang berulang-ulang dan disebut sebagai gerakan periodik. Pada gerakan berulang itu yang dimaksud dengan satu getaran lengkap adalah gerakan dari suatu titik awal kembali ke titik awal tadi. Benda yang bergetar sering disebut juga melakukan gerakan harmonis sederhana.

Jadi dapat disimpulkan bahwa ***Getaran harmonis sederhana adalah gerak bolak balik yang melewati suatu titik kesetimbangan***

Tugas 1

Carilah lagi 2 contoh sistem yang melakukan getaran, dan peragakan getarannya.

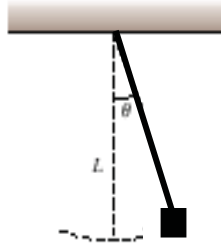
8.1.1 Frekuensi Getaran

Salah satu besaran yang sering dipakai untuk menggambarkan karakter sebuah getaran adalah frekuensi. Jumlah pengulangan atau getaran lengkap yang terjadi tiap satuan waktu dinamakan frekuensi getaran dan dilambangkan sebagai f . Jadi satuan getaran dapat berupa getaran/menit, bahkan getaran/jam. Bila satuan waktunya dinyatakan dalam sekon maka didapatkan satuan getaran/sekon atau sering juga dinamakan siklus/sekon dan 1 getaran/sekon = 1 siklus/sekon \equiv 1Hz (Hertz, mengikuti nama fisikawan Jerman, Heinrich Hertz). Jadi getaran dengan frekuensi 200 Hz menyatakan bahwa dalam satu sekon terjadi 200 getaran lengkap.

Benda yang bergetar dengan frekuensi yang tinggi menandakan bahwa dalam suatu waktu tertentu benda itu melakukan banyak getaran lengkap, sementara getaran dengan frekuensi rendah menandakan bahwa jumlah getaran lengkap yang terjadi hanya sedikit.

Kegiatan 1 (MENGHITUNG FREKUENSI BANDUL SEDERHANA)

- Ikatkanlah sebuah penghapus karet pada seutas tali/benang
- Gantungkan ujung tali yang lain pada sebuah gantungan atau paku
- Simpangkan penghapus tersebut sekitar 30 derajat (lihat Gambar 8.3)
- Hitunglah getaran lengkap yang terjadi dalam 1 menit [gunakan jam henti (*stopwatch*)]
- Berapa Hz frekuensi getaran tadi?
- Ulangi rangkaian kegiatan di atas dengan menggantungkan beban lain. Apakah terjadi perubahan frekuensi?
- Panjangkan tali/benang penggantung menjadi 2 kalinya kemudian ulangi rangkaian kegiatan di atas! Apakah sekarang terjadi perubahan frekuensi?
- Diskusikan hasil yang Anda dapat dalam kelompok.

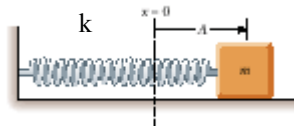


Gambar 8.3 Beban dan tali yang membentuk bandul sederhana. Besar kecilnya frekuensi getaran tergantung dari sistemnya. Pada sistem pegas massa, frekuensi tergantung pada massa balok yang dikaitkan pada pegas (m) dan karakter pegas yang dinyatakan oleh konstanta pegasnya (k). Pegas yang "keras" mempunyai konstanta pegas yang besar, sedangkan pegas yang sudah lemas (sudah lama) mempunyai konstanta pegas yang kecil. Nah, pada sistem pegas-massa (lihat Gambar 8.4), frekuensi getaran f adalah:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8.1)$$

dengan k = konstanta pegas

m = massa benda yang terikat pada pegas



Gambar 8.4 Sistem pegas-massa

Tugas 2

1. Carilah dari buku-buku atau internet satuan dari konstanta pegas!
2. Sebuah pegas mempunyai konstanta pegas 15 N/cm, jelaskan apa artinya!
3. Pegas manakah yang lebih "keras", pegas A yang mempunyai $k = 50$ N/cm atau pegas B yang mempunyai $k = 5$ N/cm? Diskusikan masalah ini dalam kelompok!

Kegiatan 2 (MENENTUKAN KONSTANTA PEGAS)

Bila kita dapat menentukan frekuensi getaran pada sistem pegas massa, maka konstanta pegas dapat dihitung/dicari dengan menggunakan Pers. (8.1).

Jalannya percobaan:

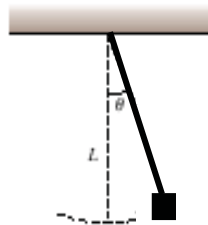
- Berikanlah suatu pengait pada sebuah balok
- Timbang massa balok beserta pengait itu
- Kaitkan balok tadi pada sebuah pegas
- Gantungkan sistem pegas secara vertikal
- Beri simpangan pada balok dengan menarik/menekan balok
- Lepaskan tarikan atau tekanan dan catat dengan *stopwatch* waktu untuk melakukan 5 getaran lengkap
- Berapa Hz frekuensi yang didapat?
- Gunakan Pers. (8.1) untuk mendapatkan nilai k pegas
- Ulangi langkah-langkah tadi dengan pegas yang sama, namun massa balok yang berbeda, dan simpulkan yang Anda peroleh!

Pada sistem bandul sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 8.5 di bawah ini, frekuensi ayunan adalah:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (8.2)$$

dengan g = percepatan gravitasi

L = panjang tali bandul



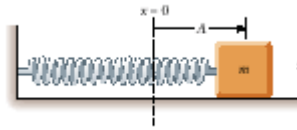
Gambar 8.5 Bandul sederhana

Tugas 3

Dari data yang Anda dapatkan pada Kegiatan (1), dapatkan Anda menghitung percepatan gravitasi? Berapa nilai percepatan gravitasi yang Anda dapatkan? Bila Anda mendapatkan nilai yang jauh dari $9,8 \text{ m/s}^2$, perkirakan apa yang menyebabkan hal tersebut?

Contoh Soal 1:

Sebuah balok dikaitkan pada pegas yang konstanta pegasnya 3 N/cm . Berapakah massa balok yang harus dikaitkan, agar sistem bergetar dengan frekuensi 5 Hz ?

Penyelesaian:

$$k = 3 \text{ N/cm} = 300 \text{ N/m}$$

$$\text{Dari Pers (8.1), } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ didapat}$$

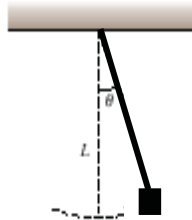
$$5 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{300 \text{ N/m}}{m \text{ kg}}}$$

Dengan demikian massa balok yang harus dikaitkan adalah:

$$m = \frac{(300 \text{ N/m})}{(25 \text{ Hz}^2)(2\pi)^2} = \underline{0,30 \text{ kg}}$$

Contoh Soal 2:

Sebuah bola yang massanya 0,5 kg digantungkan pada sebuah tali dan diayunkan. Ternyata dalam waktu 10 menit jumlah ayunan yang terjadi (getaran lengkap) adalah 300 kali. Hitunglah panjang tali tersebut!

Penyelesaian:

Bila dalam 10 menit terjadi 300 getaran lengkap, maka dalam 1 sekon terjadi $(300/600) = 0,5$ getaran lengkap. Ini berarti bahwa frekuensi getaran adalah $f = 0,5 \text{ Hz}$.

Dengan menggunakan Pers.(8.2), $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$, dan dengan mengambil percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, didapat

$$0,5 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10 \text{ m/s}^2}{L \text{ m}}}, \text{ sehingga diperoleh panjang tali adalah:}$$

$$L = 1,013 \text{ m} = \underline{101,3 \text{ cm}}$$

8.1.2 Periode Getaran

Waktu yang dibutuhkan sistem untuk membuat satu getaran lengkap dinamakan waktu periode atau periode saja. Dari pengertian ini dan pengertian frekuensi getaran, dengan mudah relasi antara T dan f dapat dimengerti, yaitu bahwa periode getaran (T) adalah balikan dari frekuensi getaran, atau dirumuskan

$$T = \frac{1}{f} \quad (8.3)$$

Jadi, jika waktu yang dibutuhkan untuk membuat satu getaran lengkap adalah 0,1 sekon, maka frekuensi getaran itu adalah $1/(0,1) = 10$ Hz dan seterusnya.

Materi Pengayaan

Telah dijelaskan bahwa frekuensi getaran sangat tergantung pada besaran-besaran sistem. Karena perioda adalah balikan frekuensi, maka jelaslah bahwa perioda getaran juga sangat tergantung pada sistemnya. Pada bandul fisis (misalnya penggaris yang berayun), perioda getarannya ditentukan oleh massa sistem itu, letak titik pusat massanya dan momen inersia benda tersebut (lihat Gambar 8.6). Perioda getaran bandul fisis adalah:

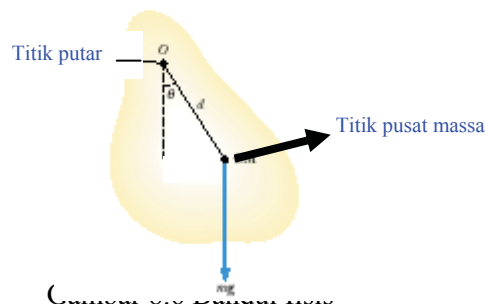
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_o}{mgd}} \text{ sekon} \quad (8.4)$$

dengan I_o : momen inersia benda terhadap titik putar O (kg m^2)

m : massa benda (kg)

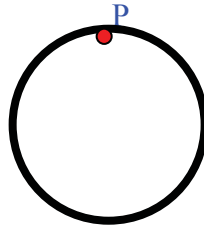
g : percepatan gravitasi (m/s^2)

d : jarak titik putar ke titik pusat massa benda (m)



Contoh Soal 3:

Di sebuah peralatan terdapat cincin yang berayun dengan poros P dekat dengan tepi roda cincin tersebut (lihat gambar). Bila massa cincin m adalah 0,2 kg, jari-jarinya $R = 10$ cm dan momen inersia cincin terhadap poros P adalah $2mR^2$, hitunglah perioda ayunan cincin tersebut!



Penyelesaian:

Periode getaran untuk cakram ini dapat dicari dengan menggunakan Pers. (8.4):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_P}{mgd}}$$

Momen inersia terhadap titik putar P adalah $I_P = (2)(0,2)(0,1)^2 = 0,004 \text{ kg m}^2$.

Massa cakram $m = 0,2 \text{ kg}$; percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$; sedangkan $d =$ jarak antara titik putar ke titik pusat massa, yang dalam hal ini adalah $R = 0,1 \text{ m}$.

Bila nilai-nilai ini dimasukkan ke dalam Pers. (8.4), maka didapat periode

$$T = \underline{0,77 \text{ sekon}}$$

=====

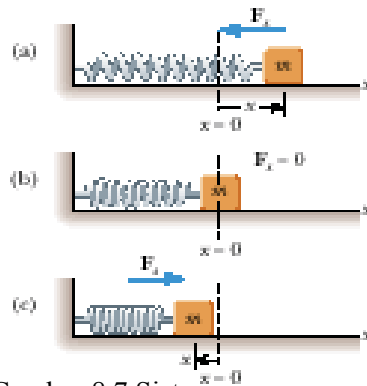
Kegiatan 3 (MENYIMPULKAN BAHWA PERIODA BANDUL TERGANTUNG PADA PANJANG BANDUL DAN TIDAK TERGANTUNG PADA MASSA BEBAN)

- Ikatkanlah penghapus karet pada seutas tali/benang
- Gantungkanlah ujung tali yang lain pada sebuah gantungan atau paku
- Simpangkan penghapus tersebut sekitar 10 derajat
- Catatlah waktu yang dibutuhkan untuk membuat 20 getaran lengkap
- Berapa periode getaran tadi?
- Ulangi rangkaian kegiatan di atas dengan menggantungkan beban lain yang berbeda massanya. Apakah terjadi perubahan periode?
- Panjangkan tali/benang penggantung menjadi 2 kalinya kemudian ulangi rangkaian kegiatan di atas! Apakah sekarang terjadi perubahan periode?
- Diskusikan hasil yang Anda dapat dalam kelompok!

8.2 Persamaan Simpangan Getaran

Telah dikemukakan bahwa getaran adalah suatu gerakan bolak-balik. Karena itu, antara lain dapat dipersoalkan posisi benda yang bergetar itu tiap saat. Jawaban pertanyaan ini diberikan lewat persamaan simpangan getaran. Ini berarti bahwa dari persamaan itu dapat diketahui posisi benda yang bergetar saat demi saat.

Persamaan simpangan getaran dapat diturunkan lewat berbagai sistem, dan antara lain adalah lewat sistem pegas-massa. Untuk itu perhatikan pegas dan balok bermassa m dalam kedudukan setimbang di atas permukaan licin seperti pada Gambar 8.7. Bila balok massa m ditarik sejauh A dari posisi kesetimbangan O ($x = 0$) kemudian dilepaskan, maka balok akan bergerak bolak-balik. Dalam sistem pegas-massa di seluruh buku ini selalu diasumsikan bahwa pegas tidak ditarik melampaui batas elastisnya. Ini berarti bahwa bila gaya tarik itu dihilangkan maka pegas akan kembali ke ukurannya semula.



Gambar 8.7 Sistem pegas-massa

Posisi benda saat demi saat sekitar titik kesetimbangan O yang ada di Gambar 8.6 ini dinyatakan oleh persamaan simpangan getaran

$$x = A \cos \omega t \quad (8.5)$$

dengan x : simpangan getaran yang diukur dari posisi kesetimbangan O

A : amplitudo simpangan atau simpangan maksimum

t : waktu berlangsungnya getaran sejak saat awal

$\omega = 2\pi f$: frekuensi sudut yang dinyatakan dalam rad/s

Contoh Soal 4:

Suatu benda bergetar harmonis dan dinyatakan oleh persamaan :

$$x = 4 \cos(\pi/3)t \quad \text{cm}$$

Tentukan:

- amplitudo, perioda, dan frekuensi getaran
- posisi benda pada saat $t = 0$; $T/4$; $T/2$; $3T/4$ dan T sekon

Penyelesaian:

- Dari persamaan tadi, maka dengan segera dapat ditentukan bahwa :

$$\text{Amplitudo } A = \underline{4 \text{ cm}}$$

$$\omega = \pi / 3 \rightarrow \text{perioda } T = 2\pi / \omega = \underline{6 \text{ sekon}}$$

$$\text{Frekuensi } f = \omega / 2\pi = \underline{0,16 \text{ Hz}}$$

- Untuk $t = 0$ sekon: $x = 4 \cos(\pi/3)0 = \underline{+4 \text{ cm}}$

$$t = T/4 = 1,5 \text{ s: } x = 4 \cos(\pi/3)(1,5) = 4 \cos(\pi/2) = \underline{0}$$

$$t = T/2 = 3 \text{ s: } x = 4 \cos(\pi/3)(3) = 4 \cos(\pi) = \underline{-4 \text{ cm}}$$

$$t = 3T/4 = 4,5 \text{ s: } x = 4 \cos(\pi/3)(4,5) = 4 \cos(3\pi/2) = \underline{0}$$

$$t = T = 6 \text{ s: } x = 4 \cos(\pi/3)(6) = 4 \cos(2\pi) = \underline{+4 \text{ cm}}$$

Dari jawaban-jawaban tadi dengan mudah dapat dilihat bahwa benda bergerak dari simpangan maksimum di kanan titik kesetimbangan O, menuju ke titik kesetimbangan, meneruskan ke simpangan maksimum di kiri titik kesetimbangan, lalu kembali ke titik kesetimbangan O lagi, dan pada akhirnya kembali ke posisi awalnya di simpangan maksimumnya. Gerakan inilah yang terjadi secara berulang-ulang.

8.3 Energi Getaran

8.3.1 Hukum Kekekalan Energi

Telah dijelaskan bahwa getaran adalah sebuah gerakan, karena itu pada setiap getaran pasti terkait sejumlah energi yang kita kenal sebagai Energi Kinetik, yaitu energi yang dimiliki benda atau sistem karena keadaannya yang bergerak itu. Kita tentunya masih ingat bahwa energi kinetik adalah:

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad \text{J} \quad (8.6)$$

dengan m : massa benda (kg)

V : kecepatan benda (m/s)

Sebuah benda yang berada di atas sebuah permukaan juga mempunyai energi yang terkait kedudukannya itu, yaitu energi potensial gravitasi. Karena benda mempunyai energi potensial gravitasi ini, maka ia

mendapatkan kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi ketika jatuh. Besarnya energi potensial gravitasi ini adalah:

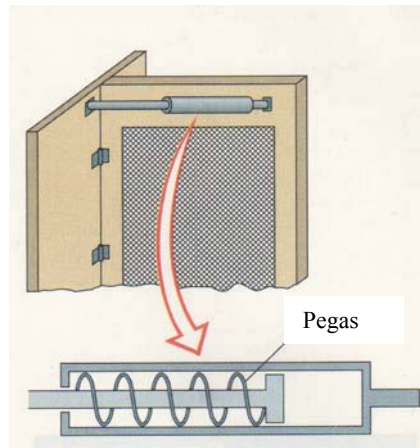
$$E_p = m g h \quad \text{J} \quad (8.7)$$

dengan : m = massa benda (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

h = jarak titik pusat massa benda ke acuan nol (m)

Pada benda-benda yang terkait dengan pegas terdapat energi potensial lain yang disebut sebagai energi potensial elastis E_p . Energi potensial elastis ini muncul ketika pegas diregangkan atau dimampatkan. Karena energi potensial elastis inilah, pegas yang diregangkan atau dimampatkan dapat kembali ke kedudukan semula karena kerja yang dilakukan oleh gaya pemulih. Contoh yang jelas adalah alat penutup pintu yang seringkali ditempelkan pada pintu berkawat anti nyamuk. Detil peralatan itu dapat dilihat pada Gambar 8.8, yaitu peralatan yang bekerja berdasarkan kerja pegas. Ketika pintu dibuka, pegas yang ada dalam peralatan itu termampatkan sehingga memiliki energi potensial elastis. Ketika pintu dilepas, pegas yang termampatkan tadi meregang kembali untuk berusaha kembali ke ukurannya semula sambil gaya pemulihnya melakukan kerja menutup pintu.



Gambar 8.8 Alat penutup pintu otomatis
(diambil dari Cutnell & Johnson, 2003)

Untuk pegas dengan konstanta pegas k N/m, maka ketika ukuran pegas bertambah atau berkurang dengan x , didapat energi potensial elastis

$$E_{p'} = \frac{1}{2} kx^2 \quad \text{J} \quad (8.8)$$

Sistem yang bergetar, dengan demikian berpeluang mempunyai ketiga jenis energi tersebut, atau energi total sistem yang bergetar adalah:

$$E_{total} = E_K + E_P + E_{p'} \quad (8.9)$$

Dengan demikian energi total juga dapat ditulis menjadi

$$E_{total} = \frac{1}{2} mV^2 + mgh + \frac{1}{2} kx^2 \quad (8.10)$$

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa, tanpa adanya gesekan dan kerja dari luar, maka energi awal dan energi akhir total adalah sama. Ini berarti bahwa:

$$\left(\frac{1}{2} mV^2 \right)_{awal} + (mgh)_{awal} + \left(\frac{1}{2} kx^2 \right)_{awal} = \left(\frac{1}{2} mV^2 \right)_{akhir} + (mgh)_{akhir} + \left(\frac{1}{2} kx^2 \right)_{akhir} \quad (8.11)$$

Perhatikan sistem getaran pegas-massa dengan pegasnya dalam posisi horisontal. Pada kasus semacam ini $(E_P)_{awal}$ dan $(E_P)_{akhir}$ adalah sama karena $h_{awal} = h_{akhir}$ dan biasanya diambil sama dengan nol, sehingga Pers.(8.11) menjadi:

$$\left(\frac{1}{2} mV^2 \right)_{awal} + \left(\frac{1}{2} kx^2 \right)_{awal} = \left(\frac{1}{2} mV^2 \right)_{akhir} + \left(\frac{1}{2} kx^2 \right)_{akhir} \quad (8.12)$$

Dengan Pers.(8.12) ini maka distribusi energi dari benda yang bergetar harmonis pada sistem pegas - massa dapat digambarkan seperti pada Tabel 8.1 berikut ini.

Tabel 8.1 Distribusi energi pada sistem pegas massa yang bergetar

Saat t	Posisi benda	E_K	$E_{P'}$	E_{total}
0	$x = A$	0	$\frac{1}{2} kA^2$	$\frac{1}{2} kA^2$
$T/4$	$x = 0$	$\frac{1}{2} m(V_{maks})^2$	0	$\frac{1}{2} kA^2$

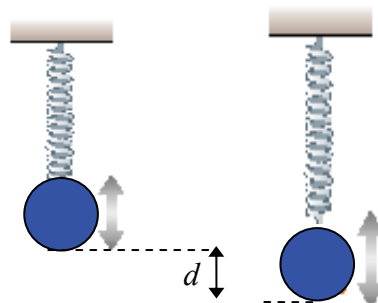
		$= \frac{1}{2} kA^2$		
$T/2$	$x = -A$	0	$\frac{1}{2} kA^2$	$\frac{1}{2} kA^2$
$3T/4$	$x = 0$	$\frac{1}{2} m(V_{maks})^2$ $= \frac{1}{2} kA^2$	0	$\frac{1}{2} kA^2$
T	$x = A$	0	$\frac{1}{2} kA^2$	$\frac{1}{2} kA^2$
$3T/8$	$x = \frac{1}{2} A$	$(\frac{3}{8}) kA^2$	$(\frac{1}{8}) kA^2$	$\frac{1}{2} kA^2$

Tugas 4

Carilah di internet simulasi gambar bandul sederhana yang menunjukkan perubahan energi potensial dan energi kinetisnya dan ceritakan tentang sifat perubahan tersebut dari hasil simulasi tersebut!

Contoh Soal 5:

Sebuah bola yang massanya 0,1 kg digantungkan pada sebuah pegas vertikal yang mempunyai konstanta pegas 20 N/m. Bola mula-mula ditopang oleh tangan, sehingga pegas tidak teregang maupun termampatkan. Tangan dilepas, sehingga bola turun dan pegas teregang. Bila hambatan udara dapat diabaikan, sejauh apa bola jatuh sebelum dihentikan sesaat oleh pegas?

Penyelesaian:

Karena hambatan udara diabaikan, maka penerapan hukum kekekalan energi pada kasus ini adalah

$$\left(\frac{1}{2} mV^2\right)_{awal} + (mgh)_{awal} + \left(\frac{1}{2} kx^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2} mV^2\right)_{akhir} + (mgh)_{akhir} + \left(\frac{1}{2} kx^2\right)_{akhir}$$

Pada keadaan awal, pegas belum teregang, sehingga

$$\left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{awal} = 0$$

Bila pada keadaan akhir bola menyimpang sejauh d dari keadaan awalnya, maka pegas teregang sejauh d , sehingga energi potensial elastisnya adalah

$$\left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir} = \frac{1}{2}kd^2$$

Pada keadaan awal, bola berada sejauh d di atas posisi akhirnya, sehingga bila

$$(mgh)_{akhir} = 0,$$

maka

$$(mgh)_{awal} = mgd$$

Bola dilepas dari keadaan diam dan pada akhirnya juga berhenti bergerak. Berarti energi kinetik awal dan akhirnya adalah

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} = 0$$

Dengan demikian, hukum kekekalan energi menghasilkan

$$mgd = \frac{1}{2}kd^2$$

sehingga didapat

$$d = \frac{2mg}{k} = \frac{2(0,1)(10)}{20} = 0,1 \text{ m} = \underline{10 \text{ cm}}$$

Perhatikan bahwa jarak d ini bukan jarak yang didapat ketika bola sudah tergantung diam setimbang pada pegas.

Kegiatan 4 (UNTUK MEMAHAMI CONTOH SOAL 5)

- ambillah 4 atau 5 buah karet gelang
- ikatlah satu gelang ke gelang yang lainnya, sehingga terbentuk rangkaian yang terdiri dari 4 gelang karet
- gantungkan ujung atas rangkaian gelang ini pada sebuah paku, dan ikatlah sebuah beban yang sudah ditimbang di ujung lainnya
- catat posisi beban ketika gelang karet belum mengalami regangan (ditopang dengan tangan)
- lepaskan tangan yang menopang dan catat posisi beban ketika berada pada jarak paling jauh dari posisi setimbangnya (ini adalah jarak d)

- beban akan naik turun beberapa kali
- usahakan untuk mencatat posisi terjauhnya
- dengan menimbang massa beban, dan menggunakan rumus $d = \frac{2mg}{k}$, maka dalam hal ini konstanta pegas gelang karet dapat dihitung
- bandingkanlah nilai d ini dengan d_o , yaitu posisi beban ketika gelang karet sudah berhenti bergetar naik-turun. Bahas perbedaan antara d dan d_o

8.3.2 Kecepatan Getaran

Getaran adalah suatu gerakan, karena itu dapat ditanyakan bagaimana sifat gerakan tersebut. Apakah gerakannya berlangsung dengan kecepatan konstan; bila tidak, maka tentunya ada percepatan. Selanjutnya dapat ditanyakan apakah percepatannya konstan. Pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat dijawab dengan meninjau dari berbagai sudut pandang.

Di subbab ini kecepatan getaran akan dibahas dengan melakukan pendekatan energi. Dengan melakukan pendekatan kekekalan energi, maka kecepatan getaran dengan mudah dapat ditentukan, seperti yang akan dibahas berikut ini.

Perhatikan kembali sistem pegas-massa yang berada dalam posisi horisontal. Bila getaran ini dimulai dari posisi simpangan maksimum ($x = A$), atau disebut juga amplitudo simpangan, dan benda semula berada dalam keadaan diam, maka

$$\left(\frac{1}{2}kA^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir} \quad (8.13)$$

Dari Pers.(8.13) ini dengan mudah kecepatan V dapat ditemukan, yaitu dengan menulis terlebih dahulu:

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \left(\frac{1}{2}kA^2\right) + \left(\frac{1}{2}kx^2\right) = \frac{1}{2}k(A^2 - x^2)$$

Dengan demikian diperoleh kecepatan getaran,

$$V = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} \quad (8.14)$$

Dengan Pers.(8.14) ini maka kecepatan di setiap titik x dapat ditentukan dengan mudah.

Dari Pers.(8.14) dan Tabel 8.1 di Subbab 8.3.1, dengan segera dapat dimengerti bahwa benda yang bergetar tidak bergerak dengan kecepatan konstan, namun berubah-ubah dari nol di titik-titik simpangan maksimumnya dan mencapai harga maksimum di posisi kesetimbangannya.

Karena benda yang bergetar tidak bergerak dengan kecepatan konstan, maka tentu ada percepatan yang terkait dengan getaran. Untuk mendapatkan percepatan ini, maka digunakan pendekatan bahwa gaya penggerak ma pada sistem pegas-massa yang bergetar adalah gaya pemulihnya $-kx$. Jadi dapat ditulis:

$$ma = -kx$$

atau

$$a = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x \quad (8.15)$$

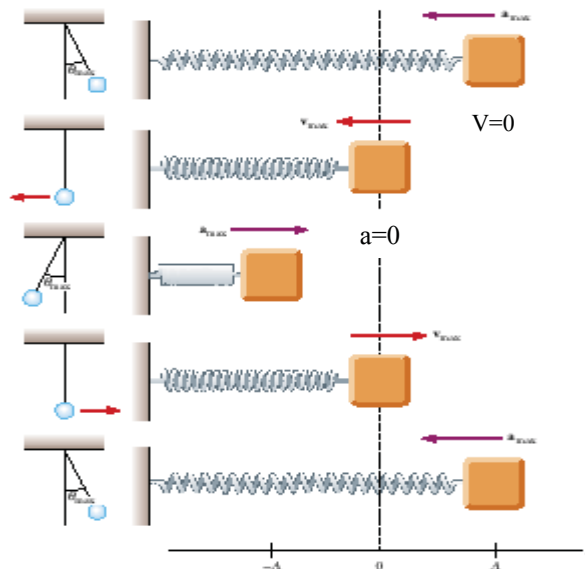
Jadi bila kita mulai dari persamaan simpangan getaran

$$x = A \cos(\omega t)$$

maka persamaan percepatan menjadi:

$$a = -A\omega^2 \cos(\omega t) \quad (8.16)$$

Pers.(8.16) menggambarkan dengan jelas bahwa percepatan a juga tidak konstan. Tidak konstannya kecepatan maupun percepatan, secara fisik sudah dapat diduga, karena adanya gerakan bolak-balik itu, seperti terlihat pada sistem bandul sederhana dan sistem pegas-massa di Gambar 8.9 berikut ini.



Gambar 8.9 Kecepatan dan percepatan tidak konstan pada sistem getaran

Benda berbalik arah, ketika simpangannya maksimum, karena kecepatannya nol. Jadi di sini terlihat bahwa benda yang bergerak (mempunyai kecepatan), tidak bergerak terus ke arah yang sama, namun berbalik karena kecepatannya nol pada saat itu. Berarti kecepatannya makin-lama makin kecil, atau tidak konstan. Pada bagian gerakan yang lain kecepatannya membesar, namun mengecil kembali sampai nol, kemudian membesar kembali dan peristiwa semacam ini berulang-ulang terus. Jadi gerak bolak-balik itu menyiratkan dua jenis perubahan kecepatan, yaitu (1) besarnya, besar \rightarrow kecil \rightarrow besar dan seterusnya, dan (2) arahnya, kanan \rightarrow kiri \rightarrow kanan dan seterusnya.

Contoh Soal 6:

Hitunglah kecepatan maksimum getaran sistem pegas-massa, bila massa beban adalah 1 kg sedangkan konstanta pegas dan amplitudo getaran adalah masing-masing 0,5 N/m dan 0,5 m.

Penyelesaian:

Energi total sistem pegas massa adalah:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(0,5 \text{ N/m})(0,5 \text{ m})^2 = (1/16) \text{ J}$$

Kecepatan maksimum terjadi ketika pegas berada pada posisi kesetimbangan, yaitu $x = 0$, sehingga pada posisi itu $E_p = 0$.

Dari hukum kekekalan energi, dapat ditulis:

$$\frac{1}{2}m(V_{maks})^2 = \frac{1}{2}(1)(V_{maks})^2 = 1/16$$

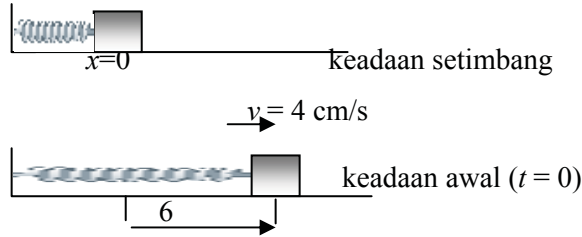
Dengan demikian $(V_{maks})^2 = 1/8$,

sehingga didapat $V_{maks} = \sqrt{1/8} = \underline{0,354 \text{ m/s}}$

Contoh Soal 7:

Sebuah benda yang massanya $m = 10$ gram diikatkan pada pegas yang mempunyai konstanta pegas $k = 40$ dyne/cm. Benda bergerak di atas permukaan licin dan memulai getarannya dari posisi simpangan maksimumnya. Ketika benda berada pada posisi $x = 6$ cm, kecepatannya adalah 4 cm/s. Di manakah posisi benda ini 5 sekon sejak keadaan awal?

Penyelesaian:



Perhatikan persamaan simpangan getaran $x = A \cos(\omega t)$

Di sini

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{40 \text{ dyne/cm}}{10 \text{ gram}}} = 2 \text{ rad/s}$$

Dari kondisi $V = 4 \text{ m/s}$ ketika benda berada di $x = 6 \text{ cm}$, dan dengan menggunakan Pers.(8.14) didapat

$$4 = 2\sqrt{A^2 - 6^2}$$

sehingga diperoleh, $A = 2\sqrt{10} \text{ cm}$.

Dengan demikian, $x = A \cos(\omega t)$ pada $t = 5$ sekon menghasilkan

$$x = 2\sqrt{10} \text{ cm} \cos[(2 \text{ rad/s})(5 \text{ s})] = 2\sqrt{10} \text{ cm} \cos(2 \text{ rad})$$

Jadi pada $t = 5$ sekon, posisi benda ada di $x = \underline{-2,63 \text{ cm}}$ (berarti benda berada 2,63 cm di kiri posisi kesetimbangannya)

8.4 Hakekat Gelombang

8.4.1 Relasi dengan getaran

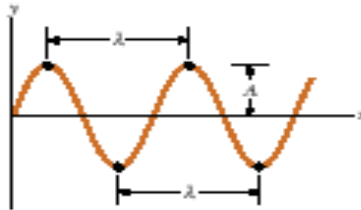
Kita telah belajar tentang getaran dan beberapa sifatnya. Getaran yang dihasilkan suatu sumber getar, seperti garpu tala, pita suara dan lain-lain seringkali dirambatkan lewat medium yang ada di sekitarnya. Getaran yang diteruskan ini yang disebut sebagai gelombang. Jadi, seperti telah disebutkan di awal bab ini, gelombang pada dasarnya adalah gangguan atau getaran yang dirambatkan. Pada Gambar 8.10 di bawah ini tampak bahwa gelombang yang dihasilkan oleh kapal motor dirambatkan lewat air telaga sehingga mengganggu seorang pemancing. Dalam hal ini air hanya menjadi medium perantara. Yang merambat bukanlah air, seperti air sungai yang mengalir, tetapi yang dirambatkan adalah energi yang terkait

gangguan tadi. Bila gangguannya berupa getaran, maka yang dirambatkan di permukaan air adalah energi getarannya.



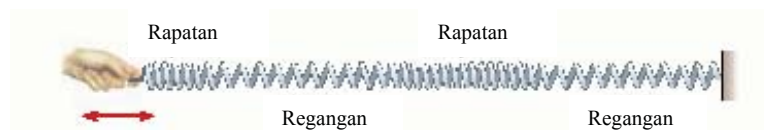
Gambar 8.10 Gelombang yang terjadi karena perahu motor yang lewat (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

Gelombang lain yang juga kita kenal adalah gelombang tali dan gelombang bunyi yang merambat di udara. Pada gelombang tali terlihat deretan lembah-puncak yang merambat di sepanjang tali (lihat Gambar 8.11), sedangkan pada gelombang bunyi di udara terjadi pola pemampatan dan peregangannya.



Gambar 8.11 Gelombang tali

itu juga dapat dilihat pada pegas sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 8.12. Pada dasarnya perambatan gelombang bunyi di udara terbentuk melalui mekanisme yang sama dengan pegas tadi.



Gambar 8.12. Pola rapatan dan regangan pada pegas yang terusik (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

Tugas 5

Dari bacaan-bacaan di internet, cobalah Anda jelaskan kaitan antara getaran dan gelombang Tsunami!

8.4.2 Energi Gelombang

Setiap gelombang merambatkan energi. Pada gelombang mekanik, hal ini diperlihatkan ketika energi yang dirambatkan melalui gelombang air mampu memindahkan gabus yang semula terapung tenang di atas permukaan air. Olenhnya kapal di laut yang sering disebabkan oleh ombak laut membuktikan adanya sejumlah energi yang dibawa oleh gelombang. Panas matahari yang terasa di bumi kita, juga disebabkan karena gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari merambatkan/meradiasikan energi panas ke bumi.

Sementara itu, pemindahan energi melalui gelombang elektromagnetik tanpa disadari, manfaatnya sudah biasa dinikmati dalam kehidupan sehari-hari. Contohnya, seseorang dapat menikmati alunan musik dari stasiun radio yang jauh letaknya karena adanya gelombang radio yang mengangkut energi bunyi musik itu. Berkat gelombang mikro, seorang pemilik perkebunan dapat memberi perintah pada para karyawannya di areal kebun yang luas dan mengendalikan perusahaannya hanya dari sebuah telepon gengggam. Semua cara berkomunikasi ini dapat terlaksana berkat gelombang elektromagnetik, yang dapat mengangkut energi informasi ke berbagai tempat.

Contoh lain bahwa gelombang membawa sejumlah energi adalah terjadinya kerusakan di mana-mana ketika terjadi gempa. Kekuatan gempa biasanya dinyatakan oleh skala Richter yang diusulkan oleh Charles Richter. Richter mengaitkan kekuatan gempa dengan logaritma (basis 10) amplitudo maksimum suatu getaran yang diukur dalam mikrometer. Amplitudo maksimum itu harus diukur pada jarak 100 km dari pusat gempa. Jadi misalkan rekaman gempa yang diperoleh dari alat perekam gempa yang disebut seismometer yang dipasang 100 km dari pusat gempa menunjukkan amplitudo maksimum $1 \text{ mm} = 10^3 \text{ } \mu\text{m}$; maka ini berarti bahwa kekuatan gempa itu (berhubungan dengan energinya) adalah

$$\text{Log } (10)^3 = 3 \text{ skala Richter}$$

Perhatikanlah energi yang terkait dengan kekuatan gempa yang dinyatakan dalam skala Richter dalam Tabel 8.2 berikut ini.

Tabel 8. 2. Skala Richter beserta contohnya

Skala Richter	Energi dalam Joule	Contoh
0,5	23,5 MJ	Granat tangan besar
1,0	134,4 MJ	Ledakan di lahan konstruksi
3,5	747,6 GJ	Malapetaka nuklir Chernobyl, 1986
5,0	134,4 TJ	Bom atom Nagasaki

Tugas 6

Carilah sekali lagi dari bacaan di internet, berapa skala Richter kekuatan gempa yang mengawali gelombang Tsunami, dan berapa pula energi yang terkait peristiwa ini!

8.4.3 Perambatan dalam medium

Gelombang yang dirambatkan, sering membutuhkan medium perantara. Gelombang bunyi misalnya tidak dapat kita dengar bila tidak ada medium perantara. Demikian pula tanpa adanya tali tidak mungkin merambat gelombang tali. Gelombang tali, gelombang bunyi (mencakup pula gelombang infrasonik dan ultrasonik), gelombang air, dan gelombang seismik, merupakan contoh-contoh gelombang mekanik, suatu jenis gelombang yang memerlukan media (dalam hal ini tali, molekul udara, dan air) untuk merambat sampai ke tujuannya. Namun tidak semua gelombang membutuhkan medium perantara. Contohnya adalah gelombang elektromagnetik, seperti gelombang radio, gelombang mikro, radar, cahaya tampak, laser, sinar-X, dan sinar gamma. Gelombang-gelombang ini adalah kelompok gelombang yang dapat merambat walaupun dalam hampa udara. Gelombang elektromagnetik ini dipancarkan ke segala arah oleh medan listrik dan medan magnet berubah, sehingga perambatannya tidak lagi memerlukan media khusus, karena ia dapat melewati ruang hampa.

Sebelum teknologi komunikasi berkembang seperti sekarang, nenek moyang kita telah tahu bahwa getaran merambat lewat tanah, sehingga mereka mengamati derap musuh yang akan menyerang dengan mendekatkan telinga ke tanah. Dengan melakukan upaya itu mereka dapat mengetahui adanya musuh yang masih berada pada jarak yang sangat jauh. Ini tentunya merupakan perambatan gelombang yang alami, melewati tanah yang sudah ada. Tentunya di dalam perjalanannya menuju tempat-tempat tertentu terjadi banyak kehilangan energi, sehingga ketika tiba di tempat tujuannya energi gelombang itu sudah sangat sedikit jumlahnya. Orang sekarang berlomba-lomba mencari bahan/medium perantara yang

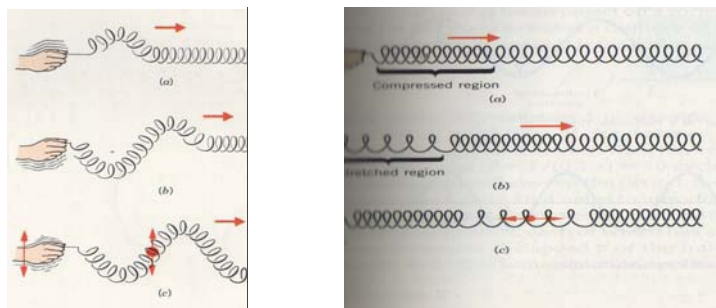
dapat merambatkan gelombang dengan rugi perambatan yang seminim mungkin. Serat optik merupakan salah satu jawabannya dan penemuan ini telah mengubah wajah pertelekomunikasian kita, menjadi sedemikian canggihnya.

8.4.4 Gelombang Transversal dan Longitudinal

Berdasarkan arah rambat terhadap arah getar, maka dikenal dua macam gelombang, yaitu gelombang transversal dan gelombang longitudinal.

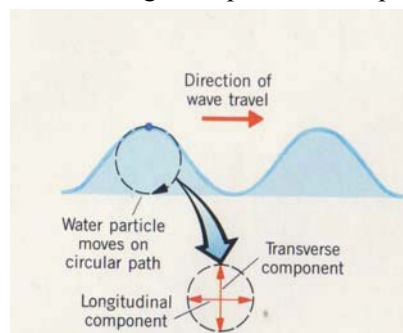
Gelombang transversal adalah gelombang yang arah rambatnya tegak lurus arah getarnya, sedang pada gelombang longitudinal, arah rambat sama dengan arah getarnya.

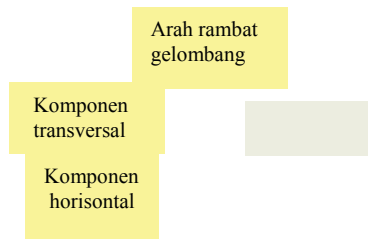
Dengan *slinky*, kedua jenis gelombang itu dapat diperagakan (lihat Gambar 8.13). Ketika tangan digerakkan naik turun, maka pada *slinky* terbentuk gelombang transversal, sementara gelombang longitudinal dihasilkan bila tangan digerakkan maju mundur. Gelombang radio, gelombang cahaya, gelombang tali dan gelombang mikro adalah contoh gelombang transversal. Gelombang transversal juga merambat dalam dawai instrumen musik seperti gitar atau piano. Contoh gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi yang merambat di udara.



Gambar 8.13 Gelombang transversal dan gelombang longitudinal (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

Beberapa gelombang tidak merupakan gelombang transversal maupun gelombang longitudinal, contohnya adalah gelombang air. Pada gelombang air, gerak partikel-partikel air tidak tegak lurus maupun paralel dengan arah rambatnya, artinya pada gelombang air, terdapat komponen transversal maupun longitudinal, karena partikel air di permukaan air bergerak dalam lintasan melingkar seperti terlihat pada Gambar 8.14.

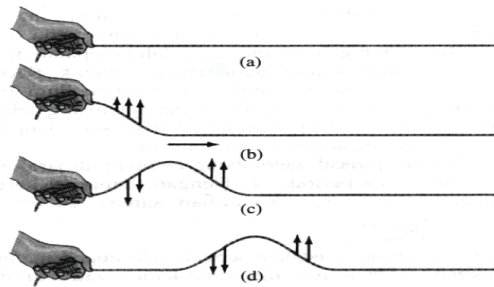




Gambar 8.14 Gelombang air (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

8.5 Kecepatan Rambat Gelombang

Anda tentunya pernah mengamati bahwa ketika kembang api ditembakkan ke atas, maka Anda akan melihat kembang api itu terlebih dulu baru mendengar ledakannya. Peristiwa ini menunjukkan bahwa gelombang cahaya dirambatkan lebih cepat dibandingkan gelombang bunyi. Kecepatan rambat gelombang tergantung pada jenis gelombang apa yang dirambatkan dan juga tergantung pada karakter medium yang merambatkannya. Gelombang bunyi misalnya, dirambatkan lebih cepat di air dibandingkan di udara. Hubungan antara kecepatan rambat gelombang dan karakter medium perantaranya dapat diturunkan lewat langkah-langkah matematis yang cukup rumit. Di sini hasil perhitungannya saja yang akan diberikan, dan dimulai dengan gelombang tali.



Gambar 8.15 Gerak segmen tali dalam menghantarkan gelombang

Seperti telah dijelaskan, gelombang tali muncul sebagai akibat gangguan pada tali (lihat Gambar 8.15). Sesaat setelah tali diganggu, gaya gangguan ini dirambatkan sepanjang tali. Ini berarti bahwa setiap bagian

tali bertindak sebagai penyalur gaya gangguan tadi, dan mekanisme ini menyebabkan terjadinya gelombang tali.

Jika tali dianggap serbasama dengan massa persatuan panjang tali adalah μ , maka didapat kecepatan rambat gelombang v dalam tali adalah:

$$v = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}} \quad (8.17)$$

dengan T_0 = tegangan tali (N)

μ = rapat massa = massa per satuan panjang (kg/m)

Pers.(8.17) menunjukkan bahwa pada tali dengan tegangan yang semakin besar, gelombang akan merambat dengan kecepatan rambat yang semakin besar pula. Sebaliknya semakin besar massa persatuan panjang tali maka gerak gelombang akan semakin lambat.

Contoh Soal 8:

Gelombang dirambatkan pada sebuah tali yang tegang. Tegangan tali diberikan dengan cara menggantung sebuah beban bermassa 2 kg pada salah satu ujungnya. Bila panjang tali adalah 2 m dan massanya 100 g, carilah kecepatan rambat gelombang transversal lewat tali ini.

Penyelesaian:

Dalam keadaan setimbang, pada beban berlaku

$$\text{Tegangan tali } T_0 = mg = 2 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 = 20 \text{ N}$$

Massa persatuan panjang tali adalah

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0,1 \text{ kg}}{2 \text{ m}} = 0,05 \text{ kg/m}$$

Dengan demikian cepat rambat gelombang adalah

$$v = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}} = \sqrt{\frac{20 \text{ N}}{0,05 \text{ kg/m}}} = \underline{20 \text{ m/s}}$$

Telah dijelaskan bahwa kecepatan rambat gelombang akan berbeda di medium yang berbeda dan sangat ditentukan oleh karakter medium perantaranya. Kecepatan rambat gelombang longitudinal dalam fluida dipengaruhi oleh modulus Bulk B, serta rapat massa ρ dan hubungannya adalah:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (8.18)$$

dengan B : modulus Bulk (N/m^2)

ρ : rapat massa fluida (kg/m^3)

Bila gelombang longitudinal itu merambat di zat padat, maka cepat rambat gelombang adalah:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8.19)$$

dengan E : modulus Young (N/m^2)

ρ : rapat massa zat padat (kg/m^3)

Contoh Soal 9:

Bandingkan nilai kecepatan gelombang longitudinal di sepanjang batang baja dan batang aluminium. Modulus Young untuk baja dan aluminium masing-masing adalah $2,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ dan $6,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, sedangkan rapat massa kedua logam masing-masing adalah $7,83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ dan $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Penyelesaian:

Kecepatan dihitung dengan menggunakan rumusan $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, sehingga

untuk baja

$$v = \sqrt{\frac{2,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2}{7,83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}} = 5,3 \times 10^3 \text{ m/s}$$

sedangkan untuk aluminium

$$v = \sqrt{\frac{6,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2}{2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}} = 5,06 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Tampak bahwa kecepatan gelombang longitudinal di dalam baja lebih besar daripada di dalam aluminium.

8.6 Persamaan Gelombang

Perbedaan persamaan gelombang dengan persamaan getaran adalah bahwa bila persamaan getaran hanya merupakan fungsi dari waktu t saja, maka persamaan gelombang adalah fungsi dari waktu t dan posisi x , seperti ditunjukkan oleh Pers.(8.20).

$$y = A \sin(\omega t \pm kx) \quad (8.20)$$

dengan A : amplitudo

$\omega t \pm kx$: fasa gelombang

ω : frekuensi sudut

t : waktu

k : bilangan gelombang = $2\pi/\lambda$ dengan λ = panjang gelombang

x : posisi

Tanda (+) digunakan untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu x negatif, sedangkan tanda (-) digunakan untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu x positif.

Karena panjang gelombang $\lambda = \frac{v}{f}$, maka bilangan gelombang k dapat

ditulis dalam bentuk lain, $k = \frac{2\pi}{v/f} = \frac{\omega}{v}$. Dengan demikian persamaan

gelombang (8.20) dapat ditulis menjadi,

$$y = A \sin\left(2\pi f t \pm \frac{\omega}{v} x\right) \quad (8.21)$$

dengan f : frekuensi gelombang

v : kecepatan rambat gelombang

Cara yang paling mudah memahami makna persamaan gelombang sebagai fungsi dua variabel adalah lewat gelombang tali. Pada gelombang tali, variabel y menyatakan simpangan tali dari posisi setimbangnya [sebelum gelombang dirambatkan melalui tali, atau bagian (a) di Gambar 8.15]. Dari Gambar 8.15 itu terlihat bahwa bila kita ingin mengetahui simpangan tali, maka pertanyaannya adalah simpangan dari bagian tali yang mana (x berapa) dan pada saat t berapa. Secara matematika, dikatakan bahwa simpangan y adalah fungsi dari dua variabel x dan t , dan biasa ditulis sebagai $y(x,t)$. Pers.(8.20) dan (8.21) secara jelas menunjukkan ketergantungan pada dua variabel itu.

Contoh Soal 10:

Sebuah gelombang merambat dengan amplitudo 15 cm dan frekuensi 200 Hz. Bila cepat rambat gelombang adalah 50 m/s, maka hitunglah simpangan sebuah titik yang berada pada jarak 1 m dan sumber gelombang tersebut setelah sumber bergetar 10 sekon!

Penyelesaian:

Simpangan pada sebuah titik yang dirambati gelombang dapat dicari dari Pers.(8.21), yaitu,

$$y = A \sin \left(2 \pi f t \pm \frac{\omega}{v} x \right)$$

Dengan memasukkan data-data yang diberikan, maka didapat

$$y = 15 \sin \left(2 \pi (200)(10) \pm \frac{2\pi(200)}{50} 1 \right)$$

Bila dianggap bahwa gelombang itu merambat dari sumber ke arah kanan, maka

$$y = 15 \sin \left(2 \pi (200)(10) - \frac{2\pi(200)}{50} 1 \right) = 15 \sin(4000\pi - 8\pi) \\ = \underline{0 \text{ cm}}$$

Contoh Soal 11:

Sebuah gelombang merambat ke arah sumbu x negatif dengan amplitudo 5 cm, cepat rambat 50 m/s dan frekuensi 100 Hz. Berapakah beda fasa antara dua titik di sumbu x yang berjarak pisah 3 m?

Penyelesaian:

Persamaan gelombang yang merambat ke arah x negatif adalah

$$y = A \sin \left(2 \pi f t + \frac{\omega}{v} x \right)$$

sehingga fasa gelombang adalah

$$\left(2 \pi f t + \frac{\omega}{v} x \right)$$

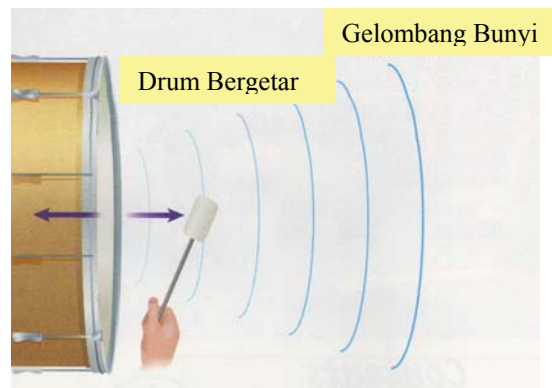
Dengan demikian, untuk dua titik yang terpisah sejauh 3 m beda fasanya pada saat t yang sama adalah

$$\frac{2\pi f}{v} (\Delta x) = \frac{2\pi(100)}{50} (3) = \underline{12 \text{ rad}}$$

8.7 Gelombang Bunyi

8.7.1 Hakekat Bunyi

Bunyi adalah energi yang dirambatkan dalam bentuk gelombang. Gelombang bunyi ini dapat menyebabkan sensasi aural, artinya gelombang bunyi dapat kita dengar. Ada banyak sekali bunyi di sekitar kita, dan ini patut disyukuri. Dapatkah Anda bayangkan andai tidak ada bunyi samasekali di sekitar kita? Perhatikan ketika Anda berjalan-jalan di taman. Anda dapat mendengar burung berkicau, anjing menggonggong dan masih banyak bunyi-bunyian lain. Di tempat yang gelap pun Anda masih dapat mendengarkan dentang lonceng, atau suara kendaraan di jalan. Alat-alat musik, juga menghasilkan bunyi, bunyi yang indah, dan salah satu di antaranya adalah drum yang dipukul (lihat Gambar 8.16). Tampak dari gambar bahwa bunyi dimulai dari getaran drum ketika ia dipukul. Selanjutnya getaran itu dirambatkan dan menghasilkan gelombang, dan karena dapat didengar manusia maka ia disebut gelombang bunyi. Jadi setiap kali Anda mendengar bunyi pasti entah di mana ada sesuatu yang bergetar sebagai sumber bunyi tersebut. Perhatikan Tabel 8.3 yang menggambarkan berbagai sumber bunyi.



Gambar 8.16 Gelombang bunyi yang terjadi ketika drum dipukul (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Tabel 8.3 Sumber bunyi dan bunyi yang dihasilkan

SUMBER-SUMBER BUNYI	
BUNYI	SUMBER GETARAN
Biola	Dawai
Suara Drum	Membran drum
Suara orang	Pita suara
Ketukan pintu	Daun pintu
Deruman mobil	Mesin mobil

Tugas 7

Carilah paling sedikit 5 buah bunyi di sekitar Anda dan sebutkan sumber getarannya!

Tugas 8

Tadi kita telah berbicara tentang bunyi yang dirambatkan lewat udara. Tugas Anda adalah menyelidiki apakah bunyi dapat dirambatkan lewat zat padat. Carilah contoh - contoh yang menopang jawaban Anda.

Kegiatan 5

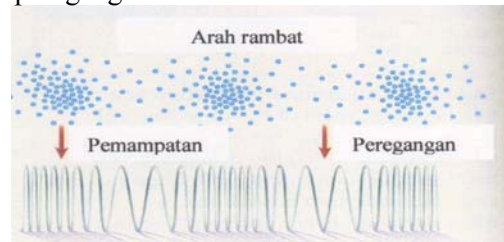
- Letakkanlah gelas yang berisi air di atas meja datar dan tunggu hingga air tidak bergerak (lihat Gambar 8.17)
- Sediakan sebuah garpu tala
- Ketukkanlah garpu tala tersebut di meja, kemudian celupkan garputala yang bergetar itu ke dalam air
- Apa yang Anda lihat di air?
- Apakah Anda mendengar bunyi ketika garpu tala diketukkan di meja?
- Apakah Anda mendengar bunyi ketika garputala yang bergetar itu dimasukkan dalam air?



Gambar 8.17 Garputala bergetar yang dicelupkan dalam air (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

8.7.2 Perambatan Gelombang Bunyi

Gelombang bunyi yang dirambatkan di udara menghasilkan pemampatan dan peregangan (lihat Gambar 8.18), dan pemampatan serta peregangan ini dirambatkan. Jadi gelombang bunyi yang merambat di udara termasuk gelombang longitudinal, karena arah rambatnya sama dengan arah perapatan dan peregangan.



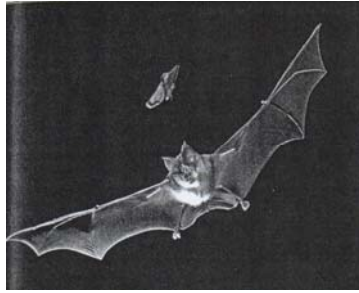
Gambar 8.18 Pemampatan dan peregangan pada gelombang bunyi (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Gelombang bunyi membutuhkan medium untuk merambatkan gelombang bunyi. Ia tidak seperti gelombang elektromagnet yang dapat merambat di ruang hampa. Karena itu para astronaut tidak dapat menggunakan bunyi untuk berkomunikasi di bulan. Di bulan tidak ada udara, sehingga tidak ada bunyi di sana (lihat Gambar 8.19).



Gambar 8.19 Di bulan tidak ada bunyi (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Perambatan gelombang menjadi sarana bagi binatang-binatang untuk berkomunikasi. Kelelawar misalnya menggunakan bunyi ultra untuk mengetahui letak mangsa yang mau ditangkanya (lihat Gambar 8.20).



Gambar 8.20 Kelelawar menemukan mangsanya dengan bunyi ultra (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Gelombang bunyi tidak hanya merambat di udara tetapi dapat juga merambat di zat cair maupun zat padat. Lumba-lumba dan ikan paus misalnya, dapat berkomunikasi dengan sesamanya melalui bunyi yang dirambatkan di air (lihat Gambar 8.21). Bunyi yang dihasilkan lumba-lumba berkisar dari 250 Hz sampai 150.000 Hz. Diduga bahwa lumba-lumba mempunyai bahasa di antara mereka seperti halnya manusia.



Gambar 8.21 Lumba – lumba yang mengeluarkan bunyi untuk menentukan letak suatu objek (*echolocation*) dan berkomunikasi (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Bunyi merambat lebih cepat di air dibandingkan di udara. Gelombang bunyi juga merambat lebih cepat di zat padat. Bukti bahwa gelombang bunyi merambat lewat zat padat dapat dibuktikan kalau telinga

ditempelkan di dinding pemisah antara dua kamar. Bukankah bunyi-bunyi yang ada di ruang sebelah dapat didengar? Jadi gelombang bunyi merambat di zat cair, gas dan zat padat, namun dengan kecepatan rambat yang berbeda. Kecepatan rambat bunyi di udara adalah 346 m/s (jauh lebih kecil dari kecepatan rambat cahaya; itulah sebabnya ketika terjadi badai, kilat akan terlihat terlebih dahulu sebelum suara guruh/petir terdengar), sedangkan di air kecepatan rambatnya 1498 m/s. Di zat padat kecepatan rambatnya tergantung pada jenis zat padatnya. Dalam baja kecepatannya 5200 m/s, di karet hanya 60 m/s, sedangkan di kayu 1850 m/s.

Beberapa pesawat jet dapat bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi, yaitu dua atau tiga kali lebih cepat dibandingkan kecepatan rambat bunyi. Kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan bunyi ini dinamakan supersonik. Bila pesawat bergerak dengan kecepatan supersonik, maka ia bergerak lebih cepat dari bunyi yang dihasilkan mesinnya. Karena itu, ketika sebuah pesawat supersonik lewat di atas Anda, maka pesawat itu sudah akan berada cukup jauh sebelum bunyi pesawatnya terdengar. Glamorous Glennis yang dipiloti oleh Chuck Yeager, adalah pesawat pertama yang bergerak dengan kecepatan yang melebihi kecepatan rambat bunyi. Gerakan pesawat yang melampaui kecepatan rambat bunyi ini akan menimbulkan bunyi yang sangat keras yang disebut sebagai *sonic boom*.

Kecepatan rambat bunyi di udara yang besarnya 346m/s dinamakan 1 Mach. Pada 14 Oktober, 1947 itulah Chuck Yeager menerbangkan pesawat dengan kecepatan yang lebih dari 1 Mach. Dengan berkembangnya teknologi, sekarang pesawat supersonik sudah dapat terbang dengan kecepatan 2 Mach bahkan sampai 3 Mach. Contohnya adalah pesawat Concorde (lihat Gambar 8.22) yang menyeberangi Lautan Atlantic dalam waktu yang sangat singkat. Satu- satunya kerugian dari pesawat supersonik adalah *sonic boom* yang dihasilkannya. *Sonic boom* itu sedemikian kerasnya hingga dapat memecahkan jendela bahkan dapat menjatuhkan pigura-pigura yang digantungkan di dinding. Karena itulah pesawat supersonik tidak diperkenankan terbang di atas daerah yang banyak penduduknya.



Gambar 8.22 Pesawat Concorde yang terbang dengan kecepatan supersonik

(diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

8.7.3 Intensitas Bunyi

Telah dijelaskan bahwa bunyi adalah energi yang dirambatkan dalam bentuk gelombang. Banyak sedikitnya energi bunyi yang diterima di suatu tempat dinyatakan melalui besaran intensitas bunyi, I . Intensitas bunyi I adalah energi yang dirambatkan tiap sekon melalui satu satuan luasan yang tegak lurus arah rambat gelombang bunyi itu. Karena energi per satuan waktu menyatakan daya, maka intensitas dapat juga dikatakan sebagai daya yang menembus tiap satuan luasan yang tegak lurus arah rambat gelombang bunyi itu. Dalam bentuk matematika hubungan itu dituliskan sebagai:

$$I = \frac{P}{A} \quad \text{watt/m}^2 \quad (8.22)$$

dengan: P = daya bunyi (watt)

A = luas bidang yang ditembus tegak lurus oleh gelombang bunyi (m^2)

Bila sumber bunyi berbentuk sumber titik (dimensi sumber kecil), maka bunyi akan disebarkan ke segala arah dengan cara yang sama. Dalam hal ini maka muka gelombangnya akan berbentuk bola, sehingga intensitas bunyi di suatu titik pada jarak r dari sumber bunyi tersebut adalah:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \text{watt/m}^2 \quad (8.23)$$

dengan: P = daya bunyi (watt)

r = jarak dari sumber bunyi ke pendengar/titik ukur (m)

Pers.(8.23) ini menunjukkan bahwa di sebuah lapangan terbuka, kita makin sulit mendengar suatu bunyi (I kecil), semakin jauh kita berada dari sumber bunyi itu (r besar).

Intensitas bunyi 1000 Hz terendah yang dapat didengar manusia (ambang pendengaran) pada umumnya adalah 10^{-12} watt/m², sedangkan intensitas bunyi yang mulai menimbulkan rasa sakit pada telinga manusia adalah 1 watt/m². Tampak di sini bahwa ada rentang intensitas yang dapat didengar manusia yang sangat lebar. Karena itu dimunculkan besaran baru yang disebut Taraf Intensitas (TI) untuk memampatkan rentang yang lebar itu, yaitu dengan mengambil skala logaritmis. Taraf intensitas bersatuan dB (desibel) dan didefinisikan sebagai:

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_{ac}} \text{ dB} \quad (8.24)$$

dengan: I = intensitas bunyi (watt/m²)

I_{ac} = intensitas acuan = 10^{-12} watt/m² (ambang pendengaran)

Berikut ini adalah Taraf Intensitas beberapa bunyi yang sering ada di sekitar kita dan diberikan dalam Tabel 8.4.

Tabel 8.4 Taraf Intensitas beberapa sumber bunyi

Sumber bunyi	TI (dB)	Catatan
Mesin roket besar	180	
Jet lepas landas	150	
Konser rock dengan amplifier pada jarak 2 m	120	Ambang rasa nyaman
Kereta api	100	
Air terjun Niagara	90	Membahayakan pendengaran
Lalulintas padat	70	
Percakapan normal (1 m)	60	
Kantor tenang	50	Tenang
Perpustakaan	30	Sangat tenang
Bisik-bisik (5 m)	20	Hampir tak terdengar
Pernafasan normal	0	Ambang pendengaran

Contoh Soal 12:

Intensitas gelombang bunyi terlemah berfrekuensi 1000 Hz yang masih dapat didengar manusia pada umumnya adalah 10^{-12} watt/m². Berapakah Taraf Intensitasnya?

Penyelesaian:

Dari Pers.(8.24), Taraf Intensitas adalah:

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_{ac}}$$

Jadi untuk bunyi dengan intensitas 10^{-12} watt/m², didapat

$$TI = 10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 10 \log 1 = \underline{0 \text{ dB}}$$

Dari contoh soal ini dapat dibayangkan yang dinamakan Taraf Intensitas 0 dB.

Contoh Soal 13:

Sebuah *speaker* A menghasilkan $TI = 80$ dB di suatu titik P yang berada pada jarak 3 m dari *speaker* A itu. *Speaker* B berada pada jarak 5 m dari titik P, dan menghasilkan $TI = 85$ dB di P. Berapakah TI yang ditangkap di titik P, bila kedua *speaker* itu berbunyi secara serentak?

Penyelesaian:

Untuk *speaker* A:

$$80 = 10 \log \frac{I_A}{10^{-12}} \quad \text{atau} \quad \log \frac{I_A}{10^{-12}} = 8$$

Dengan demikian

$$\frac{I_A}{10^{-12}} = 10^8,$$

sehingga

$$I_A = (10^8)(10^{-12}) = 10^{-4} \text{ watt / m}^2$$

Dengan cara sama,

$$I_B = (10^{8,5})(10^{-12}) = 10^{-3,5} \text{ watt / m}^2$$

Bila dibunyikan secara serentak, maka intensitas total

$$I_{A,B} = I_A + I_B = 10^{-4} + 10^{-3,5} = 4,16 \times 10^{-4} \text{ watt / m}^2$$

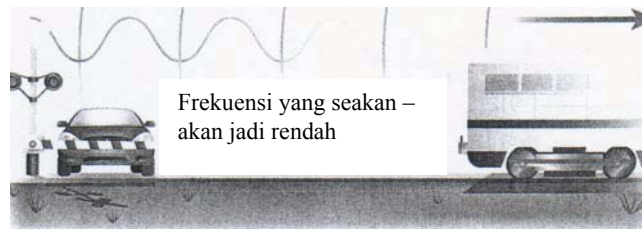
Jadi, Taraf Intensitas total adalah:

$$TI_{A,B} = 10 \log \frac{I_{A,B}}{I_{ac}} = 10 \log \frac{4,16 \times 10^{-4}}{10^{-12}} = \underline{86,2 \text{ dB}}$$

8.8 Efek Doppler

Ketika sedang menunggu kereta api melintasi suatu persimpangan, Anda tentunya pernah mendengar bahwa pluit yang dibunyikan kereta api itu terdengar makin lama makin tinggi ketika kereta api itu mendekat namun frekuensinya terdengar semakin rendah ketika kereta api itu telah melewati Anda dan menjauh (lihat Gambar 8.23). Jadi Anda mendengar peluit itu seakan-akan melagukan suatu musik dengan nada yang semula makin lama makin tinggi, namun kemudian menjadi rendah kembali. Apakah ini terjadi karena operator kereta api memijat tombol nada-nada yang berbeda saat itu? Ternyata tidak. Apa yang Anda dengar itu terjadi karena gejala yang dikenal sebagai Efek Doppler, untuk menghormati seorang Australia bernama, Christian Andreas Doppler (1803-1855), yang pertama kali mengamati gejala ini.

Efek Doppler adalah gejala berubahnya frekuensi yang didengar seseorang karena sumber bunyi bergerak relatif terhadap pendengarnya. Sumber bunyi yang relatif bergerak terhadap pendengarnya, dapat berarti bahwa sumber bunyi diam dan pendengar mendekat atau menjauhi sumber, namun dapat juga pendengarnya yang diam sementara sumber bunyi yang bergerak mendekati atau menjauhi pendengar, bahkan dapat juga kedua-duanya dalam keadaan bergerak.



Gambar 8.23 Efek Doppler yang menyebabkan perubahan frekuensi yang ditangkap pendengar (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Terjadinya efek Doppler tidak hanya dapat didengar tetapi juga dapat dilihat. Ingatlah kembali bahwa frekuensi gelombang

menggambarkan jumlah gelombang yang melewati suatu titik tiap satuan waktunya. Coba ingat-ingatlah ketika Anda sedang memancing di sebuah danau (lihat Gambar 8.24). Ketika perahu motor mendekati Anda, jumlah gelombang yang menumbuk "dermaga" tempat Anda berada, semakin banyak, namun begitu perahu motor itu melewati Anda, jumlah gelombang yang menumbuk dermaga itu menjadi semakin sedikit.



Gambar 8.24 Frekuensi gelombang yang berubah ketika perahu melewati pemancing (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Kembali ke efek Doppler yang berhubungan dengan bunyi. Frekuensi yang dipancarkan peluit kereta api sebenarnya tidak berubah. Yang berubah adalah frekuensi yang terdengar, dan kita katakan bahwa frekuensi sumber bunyi itu seakan-akan berubah, namun sekali lagi, frekuensi sumber bunyi tidak berubah. Hubungan antara frekuensi yang terdengar dan frekuensi bunyi sesungguhnya tergantung pada kecepatan gerak sumber bunyi maupun kecepatan gerak pendengar. Hubungan itu dinyatakan oleh Pers (8.25) berikut ini:

$$\frac{f_p}{V \pm V_p} = \frac{f_s}{V \pm V_s} \quad (8.25)$$

atau

$$f_p = \left(\frac{V \pm V_p}{V \pm V_s} \right) \cdot f_s \quad (8.26)$$

dengan f_p = frekuensi yang ditangkap pendengar (Hz)

f_s = frekuensi sumber bunyi yang sebenarnya (Hz)

V_p = kecepatan pendengar (m/s)

V_s = kecepatan sumber bunyi (m/s)

V = kecepatan rambat gelombang bunyi (biasanya diambil 340 m/s)

Untuk mengisi tanda (+) atau (-) pada Pers.(8.25) dan Pers.(8.26) berlaku ketentuan sebagai berikut:

- a. V_p diisi (+), bila P (pendengar) mendekati S (sumber)
 V_p diisi (-), bila P menjauhi S
- b. V_s diisi (+), bila S menjauhi P
 V_s diisi (-), bila S mendekati P

Contoh Soal 14:

Sebuah mobil bergerak menjauhi pendengar dengan kecepatan 60 m/s sambil membunyikan klaksonnya yang berfrekuensi 300 Hz. Bila kecepatan rambat bunyi adalah 340 m/s, hitunglah frekuensi yang ditangkap pendengar itu yang sedang tidak bergerak!

Penyelesaian:

Karena sumber menjauhi pendengar yang diam maka pada Pers.(8.26), V_p diisi 0 sedangkan V_s diisi (+). Jadi,

$$f_p = \left(\frac{V \pm V_p}{V \pm V_s} \right) \cdot f_s = \left(\frac{340 \text{ m/s} + 0 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 60 \text{ m/s}} \right) (300 \text{ Hz}) = 255 \text{ Hz}$$

Jadi frekuensi yang ditangkap pendengar adalah 255 Hz.

Contoh Soal 15:

Sumber bunyi yang memancarkan bunyi dengan panjang gelombang 10 cm bergerak dengan kecepatan 60 m/s menjauhi pendengar yang juga sedang bergerak dalam arah yang berlawanan dengan kecepatan 40 m/s.

Penyelesaian:

Karena panjang gelombang $\lambda = \frac{c}{f}$, maka frekuensi bunyi itu adalah

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,10 \text{ m}} = 3400 \text{ Hz} .$$

Sumber bunyi menjauhi pendengar, maka V_s diisi (+); Pendengar menjauhi sumber, maka V_p diisi (-).

Dengan demikian

$$f_p = \left(\frac{V \pm V_p}{V \pm V_s} \right) \cdot f_s = \left(\frac{340 \text{ m/s} - 40 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 60 \text{ m/s}} \right) (3400 \text{ Hz}) = 2550 \text{ Hz}$$

Jadi frekuensi yang ditangkap pendengar adalah 2550 Hz.

8.9 Rangkuman

- Getaran adalah gerakan yang berulang-ulang atau gerakan bolak-balik melewati suatu titik kesetimbangan
- Sistem getaran yang dibahas adalah sistem pegas-massa, dan bandul sederhana
- Besaran yang penting pada getaran adalah frekuensi, periode, simpangan, amplitudo, kecepatan, percepatan dan energi
- Bila energi getaran dirambatkan maka diperoleh gelombang
- Berdasarkan arah getar relatif terhadap arah rambatnya, dikenal gelombang transversal dan gelombang longitudinal
- Pada umumnya gelombang yang dirambatkan membutuhkan medium perantara, kecuali gelombang elektromagnetik yang dapat merambat di ruang hampa
- Kecepatan rambat gelombang tergantung pada jenis gelombang yang dirambatkan dan karakteristik medium perantaranya
- Gelombang bunyi adalah gelombang yang dapat didengar dan di udara dirambatkan sebagai gelombang longitudinal
- Di ruang hampa gelombang bunyi tidak dapat didengar
- Keras lemahnya bunyi ditentukan oleh intensitas bunyi atau Taraf Intensitasnya. Makin jauh pendengar dari sumber bunyi, makin lemah pula bunyi yang didengar
- Efek Doppler adalah gejala berubahnya frekuensi yang didengar seseorang karena sumber bunyi bergerak relatif terhadap pendengar

8.10 Soal/Uji Kompetensi

1. Sebuah bandul digantungkan pada seutas tali yang panjangnya 1 m. Dengan mengambil percepatan gravitasi 10 m/s^2 , hitunglah periode serta frekuensi getaran bandul tersebut!
2. Buah mangga yang tergantung di tangkai pohonnya berayun ketika ada angin kencang bertiup. Buah mangga beserta tangkainya dianggap sebagai sebuah bandul sederhana. Jika panjang tangkai adalah 40 cm

dan membuat 30 ayunan dalam 2 menit, berapakah percepatan gravitasi di tempat tumbuhnya pohon mangga tersebut?

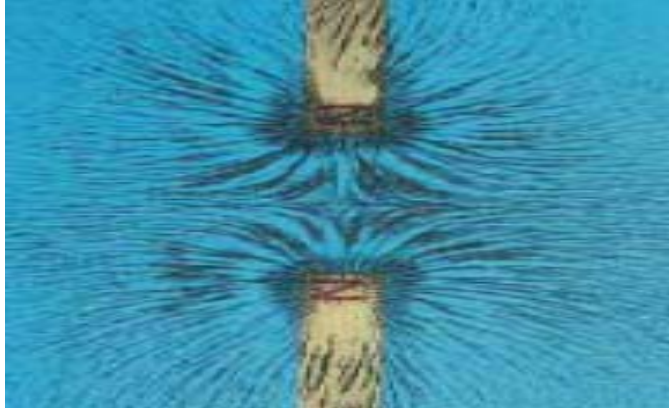
3. Sebuah pegas horisontal menyimpang sejauh 2 cm dari keadaan awalnya ketika ditarik dengan gaya 1 newton. Pada pegas tersebut dikaitkan balok yang massanya 500 gram. Bila pegas-massa tersebut bergetar, berapakah:
 - a. konstanta pegas tersebut?
 - b. periode getaran yang terjadi?
 - c. frekuensi getaran yang terjadi?
4. Sebuah bandul yang massanya 2 kg bergetar dengan periode 10 sekon dan amplitudo $\alpha = 10^\circ$. Hitunglah besarnya simpangan, kecepatan dan percepatan sudut bandul ini setelah bergetar selama $\frac{1}{4} T$ dan $\frac{1}{2} T$!
5. Sebuah bola bergetar harmonik dengan periode 2 sekon dan amplitudo 5 cm. Pada saat awal bola itu melewati titik kesetimbangannya dengan kecepatan $2,5\sqrt{2}$ cm/s dalam arah vertikal ke bawah. Carilah posisi bola tersebut 10 sekon sejak saat awal tadi!
6. Ketika pegas vertikal digantungi beban bermassa 2 kg, pegas menyimpang 1 cm dari posisi kesetimbangannya. Pegas-massa itu diganggu hingga bergetar. Berapakah simpangan pegas ketika energi potensialnya 10 J?
7. Benda yang bergetar harmonik mempunyai jumlah energi kinetik dan energi potensial yang:
 - a. maksimum pada simpangan maksimum
 - b. maksimum pada simpangan nol
 - c. tetap besarnya pada simpangan berapa pun
 - d. berbanding lurus dengan simpangannya
 - e. berbanding terbalik dengan simpangannya
8. Sebuah benda yang diikatkan pada ujung sebuah pegas dengan konstanta pegas k , bergetar harmonik dengan amplitudo A . Ketika benda itu berada pada simpangan $0,5 A$, energi kinetiknya adalah:
 - a. $\frac{1}{8} kA^2$
 - b. $\frac{1}{4} kA^2$
 - c. $\frac{3}{8} kA^2$
 - d. $\frac{1}{2} kA^2$

e. $\frac{3}{4} \text{ kA}^2$

9. Frekuensi sebuah gelombang longitudinal adalah 200 Hz. Bila kecepatan rambat gelombang itu 500 m/s, berapakah jarak antara dua peregangan berturut-turut?
10. Gelombang yang merambat dalam sebuah tali dinyatakan oleh persamaan gelombang, $y = 2 \sin \pi (4t - 3x)$ meter, dengan x dinyatakan dalam meter dan t dalam sekon. Berapakah kecepatan rambat gelombang ini pada $t = 10$ sekon?
11. Kecepatan rambat gelombang transversal yang lewat kawat adalah 25 m/s, ketika tegangan tali itu 50 N. Jika tegangan tali dinaikkan menjadi 80 N, berapakah kecepatan rambat gelombang dalam kawat itu sekarang?
12. Bila tegangan suatu dawai gitar dinaikkan menjadi 4 kali lebih besar, maka nada yang dihasilkan
 - a. menjadi 4 kali lebih tinggi
 - b. menjadi 2 kali lebih tinggi
 - c. menjadi 4 kali lebih rendah
 - d. menjadi 2 kali lebih rendah
 - e. tidak mengalami perubahan
13. Di sawah, suara kereta api yang lewat terdengar lebih keras dibandingkan dengan suara kambing yang mengembek, karena
 - a. frekuensi bunyi kereta api lebih besar dibandingkan frekuensi embekan kambing
 - b. frekuensi bunyi kereta api lebih kecil dibandingkan frekuensi embekan kambing
 - c. energi yang dihasilkan kereta api lebih kecil dari energi embekan kambing
 - d. energi yang dihasilkan kereta api lebih besar dari energi embekan kambing
 - e. massa kereta api lebih besar dibandingkan massa kambing
14. Sebuah pemancar radio memancar pada frekuensi 50 MHz. Bila kecepatan rambat gelombang radio adalah 300.000 km/s, berapakah panjang gelombangnya?

15. Adi yang berada 1 meter dari sebuah kentongan, mendengar suara kentongan dengan taraf intensitas 75 dB. Berapakah taraf intensitas yang diterima Bambang yang berada 5 meter dari kentongan tadi?
16. Sebuah traktor menghasilkan $TI = 90$ dB. Bila terdapat 5 traktor yang identik, berapakah TI yang dihasilkan, bila kelima traktor itu dihidupkan pada saat yang sama?
17. Bunyi tidak dapat merambat dalam medium:
 - a. udara
 - b. air
 - c. bahan padat
 - d. gas nitrogen
 - e. hampa udara
18. Sebuah kereta api yang bergerak dengan kecepatan 36 km/jam menuju ke sebuah stasiun sambil membunyikan peluitnya. Bunyi peluit itu terdengar oleh kepala stasiun yang sedang duduk, dengan frekuensi 1000 Hz. Bila kecepatan rambat bunyi adalah 340 m/s berapakah frekuensi peluit itu sebenarnya?
19. Sebuah mobil pemadam kebakaran bergerak menuju ke arah lokasi kebakaran sambil membunyikan sirene dengan frekuensi 600 Hz. Seorang pendengar yang sedang makan di warung di tepi jalan ternyata menangkap sirene itu dengan frekuensi 500 Hz. Apakah mobil pemadam kebakaran itu sedang mendekati atau menjauhi pendengar? Berapakah kecepatan mobil pemadam kebakaran itu?
20. Sebuah sumber memancarkan gelombang bunyi dengan panjang gelombang 10 m. Pendengar dan sumber bunyi bergerak saling mendekat dengan kecepatan yang sama, yaitu 20 m/s terhadap benda yang diam. Berapakah frekuensi bunyi yang ditangkap oleh pendengar itu?

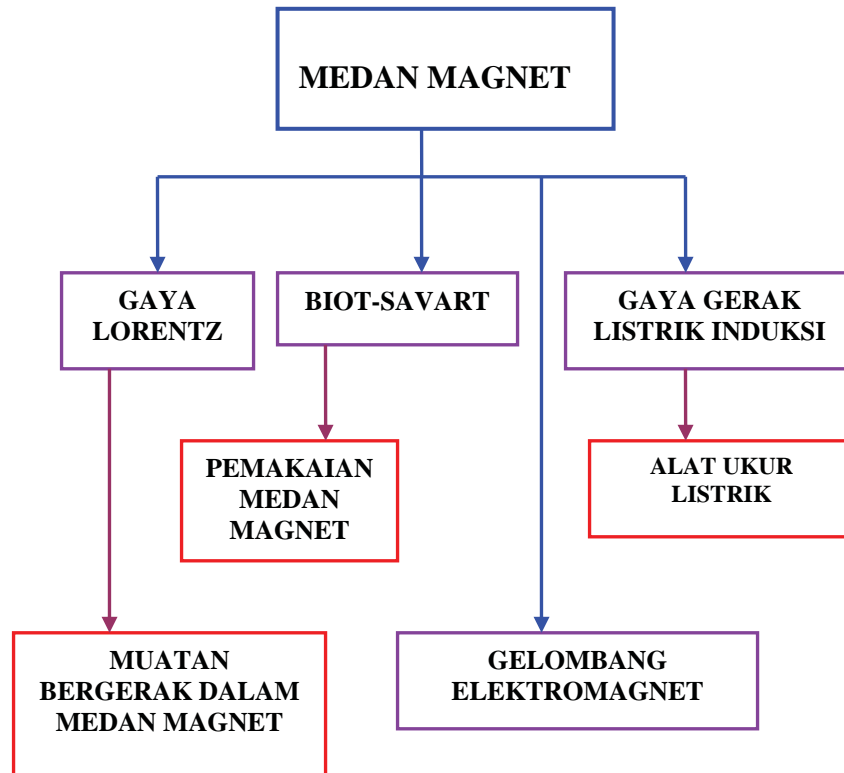
BAB 9 MEDAN MAGNET



Pada kehidupan sehari-hari kita selalu berdekatan dengan magnet. Bumi tempat kita tinggal merupakan magnet raksasa, tubuh kita dan benda-benda sekeliling kita banyak yang mempunyai sifat magnet. Kekuatan magnet sangat tergantung pada sumbernya, dan daerah disekitar sumber magnet dinamakan medan magnet.

Medan magnet mempunyai kekuatan untuk menarik atau menolak bahan/benda yang mempunyai sifat kemagnetan. Sifat kemagnetan bahan sering diukur oleh mudah tidaknya suatu bahan dipengaruhi oleh medan magnet. Medan magnet ini muncul pada suatu konduktor yang dialiri arus. Arus yang berubah terhadap waktu akan menimbulkan medan magnet yang berubah terhadap waktu dan menimbulkan medan listrik induksi. Jadi sifat kemagnetan dan kelistrikan dan terjadi bolak balik sebagai penyebab dan akibat, dan sering dinamakan sebagai medan elektromagnet.

Penerapan medan magnet dan medan elektromagnet sudah sangat banyak dalam berbagai bidang, misangnya bidang kedokteran, permesinan, alat transportasi, komunikasi dan hardware komputer.

PETA KONSEP

Pra Syarat

Untuk dapat mengerti pembahasan bab ini dengan baik, siswa harus telah mempelajari dan mengerti tentang masalah vektor, kinematika, gerakan melengkung, gaya sentrifugal, gaya aksi reaksi, muatan listrik dan arus listrik.

Cek kemampuan

1. Apabila anda mendekatkan batang magnet pada sebuah jarum. Apa yang terjadi?
2. Hitung rapat fluks magnet dari suatu bidang empat persegi panjang yang luasnya 100 cm^2 . Jika fluks magnet serba sama sebesar 10^3 weber menembus tegak lurus pada seluruh bidang.
3. Sebuah kawat melingkar dialiri arus sebesar 1 mA. Jika jari-jari lingkaran kawat adalah 5 cm, berapakah induksi magnet di pusat lingkaran?
4. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan 1000 m/s dalam medan magnet serba sama 10^4 weber. Berapa besar gaya magnet yang dialami elektron tersebut?

9.1 Uraian dan contoh soal

Medan magnet dapat dirasakan atau ada di sekitar kutub magnet. Apabila ada kutub magnet lain dalam medan magnet maka akan ada gaya interaksi magnetik atau disebut sebagai gaya magnet. Medan magnet dapat timbul dari bahan-bahan dari alam yang mempunyai sifat kemagnetan atau bisa juga ditimbulkan oleh adanya arus listrik.

Salah satu tokoh terkenal yang meneliti tentang medan magnet adalah Hans Christian Oersted (1777-1851). Oersted merupakan orang pertama yang dalam percobaannya mengetahui terjadinya medan magnet oleh arus listrik.

Gaya magnet ini dalam aplikasinya banyak digunakan sebagai dasar dalam mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Misalkan dalam pembuatan motor listrik, pembuatan generator.

Selain karena adanya arus listrik medan magnet juga dapat ditimbulkan karena sifat kemagnetan bahan.

Kegiatan 9.1.

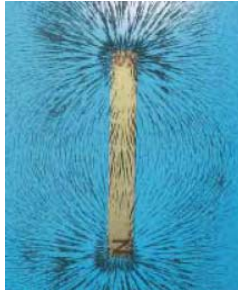
1. Untuk kegiatan ini siapkan sebuah batang magnet, kertas tipis dan serbuk besi
2. Taburkan serbuk besi diatas kertas

3. Ambil batang baja kemudian didekatkan di bawah lembaran kertas.
4. Apakah besi akan membentuk pola tertentu?
5. Seperti apakah pola serbuk besi di atas kertas yang terjadi apabila serbuk besi dikumpulkan ditengan kertas kemudian batang magnet didekatkan di bawah kertas?

9.2 Induksi Magnet

Pada suatu titik ada medan magnet bila muatan yang bergerak pada titik tersebut mengalami gaya magnet. Medan magnet ini dikenal juga sebagai *induksi magnet*. Induksi magnet dapat dilukiskan sebagai garis-garis yang arah singgungnya pada setiap titik menunjukkan arah vektor induksi magnet di titik-titik tersebut.

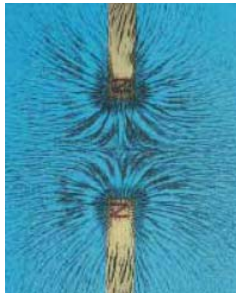
Induksi magnetik pada batang magnet akan muncul seperti diperlihatkan dalam Gambar 9.2



a. batang magnet



b. dua batang magnet dengan kutub berlawanan didekatkan



c. dua batang magnet dengan kutub searah didekatkan

Gambar 9.2 Medan magnet pada batang magnet (diambil dari Serway,2004)

Banyaknya garis-garis induksi magnet yang melalui satuan luas bidang dinyatakan sebagai besar induksi magnet di titik tersebut. Banyaknya garis-garis induksi magnet dinamakan fluks magnet (Φ), sedang banyaknya garis-garis induksi magnet persatuan luas dinamakan rapat fluks magnet (B). Hubungan antara fluks magnet dan rapat fluks magnet dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (9.1)$$

Dalam sistem MKS, satuan fluks magnet adalah weber (W) atau Tesla m^2 , sedang satuan rapat fluks magnet adalah weber/ m^2 (W/m^2) atau dikenal dengan Tesla (T). Untuk sistem CGS satuan fluks magnet adalah Maxwell (M), sedang satuan rapat fluks magnet adalah Maxwell/ cm^2 (M/cm^2). Satuan Maxwell/ cm^2 disebut juga dengan nama Gauss (G). Hubungan satuan sistem MKS dan sistem CGS adalah $1 T = 10^4 G$.

Contoh soal 9.1:

Medan magnet menembus bidang empat persegi panjang ukuran $20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ secara tegak lurus terhadap bidang. Fluks magnet serba sama pada seluruh bidang adalah sebesar 10^4 weber. Tentukan rapat fluks magnet dalam sistem MKS/SI.

Penyelesaian :

$$A = 500 \text{ cm}^2 = 5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$\Phi = BA \cos \theta$$

$$= BA \cos 90$$

$$\Phi = BA$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{10^4}{5 \times 10^{-2}} \frac{W}{m^2} = 2 \times 10^5 \frac{W}{m^2}$$

$$B = 2 \cdot 10^5 \text{ T}$$

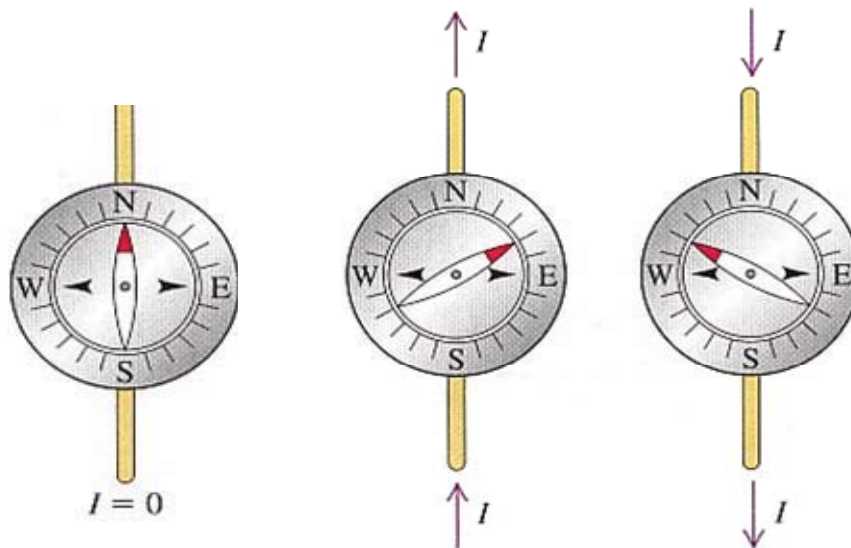
$$1 \text{ W} = 10^8 \text{ Maxwell}$$

$$\frac{1 \text{ W}}{m^2} = \frac{10^8 \text{ maxwell}}{10^4 \text{ cm}^2} = 10^4 \frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2} = 10^4 \text{ Gauss}$$

$$\text{Jadi } B = 5 \times 10^9 \text{ Gauss}$$

9.3 Medan Magnet oleh Arus Listrik

Percobaan yang dilakukan Oersted yaitu dengan mengamati jarum kompas yang ditempatkan di bawah kawat yang dilalui arus listrik. Hasil percobaan diperlihatkan pada Gambar 9.3. Gambar 9.3a. memperlihatkan posisi jarum kompas ketika tidak dialiri arus, jarum kompas tersebut menunjuk arah utara. Selanjutnya jarum kompas dialiri arus ke arah utara seperti diperlihatkan pada Gambar 9.3b, akibatnya penunjukan jarum menyimpang ke arah timur. Apabila jarum kompas dialiri arus ke arah selatan maka penunjukan jarum menyimpang ke arah barat (Gambar 9.3c).



b. Jarum kompas tanpa dialiri arus

c. Jarum kompas dialiri arus arah ke utara

a. Jarum kompas dialiri arus arah ke selatan

Gambar 9.3 Pengaruh arus listrik terhadap penunjukan arah jarum kompas

Hubungan antara besarnya arus listrik dan medan magnet di nyatakan oleh Biot Savart, yang kemudian dikenal dengan Hukum Biot Savart.

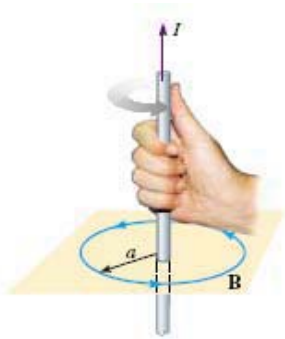
Besarnya induksi magnet pada suatu titik pada jarak a oleh kawat lurus yang tak berhingga panjang seperti pada Gambar 9.4 adalah

$$B = \frac{\mu_0 i}{2 \pi a} \quad (9.2)$$

Selanjutnya didefinisikan tetapan baru yaitu μ_0 .

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4 \times 3.14 \times 10^{-7} \text{ W/Amp.m} \\ &= 12,57 \times 10^{-7} \text{ W/Amp.m} \end{aligned}$$

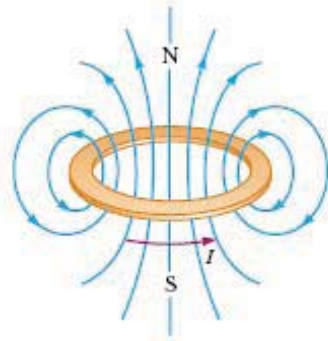
Seperti telah diungkapkan sebelumnya bahwa induksi magnet adalah besaran vektor, sehingga induksi magnet oleh kawat berarus juga mempunyai arah tertentu.



Gambar 9.4 memperlihatkan cara sederhana dalam menentukan arah induksi magnet. Dari gambar tersebut jelas bahwa apabila arus mengalir ke atas arah B berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Dan jika arah arus ke arah bawah maka arah induksi magnet B searah dengan arah putaran jarum jam.

Gambar 9.4 Arah vektor B

Apabila kawat berarus tersebut dilengkungkan dan ujung-ujungnya bertemu, kawat berarus akan berbentuk lingkaran. Pada sebuah kawat berarus berbentuk lingkaran timbul induksi magnet yang arahnya diperlihatkan pada Gambar 9.5. Dari gambar tersebut tampak bahwa arah induksi magnet melingkari kawat dan semakin ke tengah radius lingkarannya semakin besar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa makin besar radius kawat berarus maka radius arah induksi magnet dipusat lingkaran juga semakin besar.



Gambar 9.5 Arah induksi magnet oleh kawat melingkar berarus

Ditinjau suatu kawat arus berbentuk lingkaran jari-jari R , akan dihitung rapat fluks magnetik/induksi magnet suatu titik di sumbu lingkaran yang jaraknya dari pusat lingkaran x .

Induksi magnet ini terjadi di seluruh kawat yang berbentuk lingkaran, hanya ditentukan oleh komponen yang searah dengan sumbu lingkaran

$$B = \frac{\mu_o i R^2}{2 (R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (9.3)$$

Induksi magnet titik dipusat lingkaran dapat diperoleh dari rumus (9.3) dengan menyamakan $x = 0$, diperoleh

$$B = \frac{\mu_o i}{2 R} \quad (9.4)$$

Jika sebanyak N kawat lingkaran disusun sedemikian rupa sehingga membentuk kumparan tipis, maka besarnya induksi magnet pada jarak x yang berada pada sumbu kumparan adalah

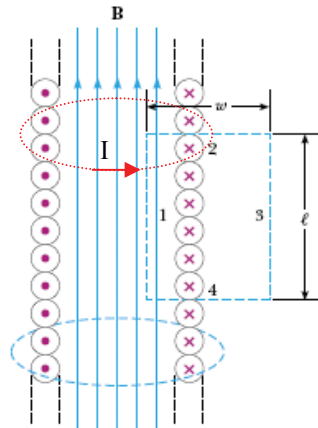
$$B = \frac{\mu_o i a^2 N}{2 (R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (9.5)$$

untuk $N =$ jumlah lilitan kumparan.

Induksi magnet dipusat kumparan adalah

$$B = \frac{\mu_o i}{2 R} N \quad (9.6)$$

Induksi magnet oleh Solenoida.



Gambar 9.6 Solenoida

Suatu solenoida dibayangkan sebagai suatu silinder yang dililiti kawat arus berbentuk lingkaran, masing-masing lingkaran tegak lurus sumbu silinder, arah arus pada solenoida seperti pada Gambar 9.6.

Solenoida dengan N lilitan, panjangnya l , maka jumlah lilitan pesatuan panjang adalah $n = \frac{N}{l}$

Untuk solenoida panjang tak berhingga, maka induksi magnet ditengah-tengah solenoid sepanjang solenoid tersebut adalah

$$B = \frac{\mu_o N i}{L} \quad \text{atau} \quad (9.7)$$

$$B = \mu_o n i$$

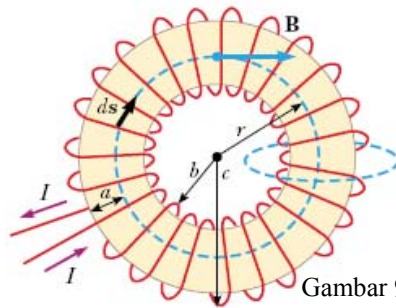
Induksi magnet oleh Toroida.

Suatu toroida adalah bangun berbentuk seperti ban yang dililiti dengan kawat sedemikian hingga tiap lilitan berbentuk lingkaran seperti diperlihatkan dalam Gambar 9.7

Toroida dianggap seperti solenoida sangat panjang yang dilengkungkan sehingga ujung-ujungnya berimpit, sehingga induksi magnet oleh toroida dapat diperoleh dari rumus (9.10).

Keliling lingkaran di tengah-tengah Toroida adalah

$$L = 2\pi \left[b \left(+ \frac{c-b}{2} \right) \right] = \pi(b+c)$$



Gambar 9.7 Toroida

Dari persamaan (9.7) dapat dicari persamaan medan magnet pada Toroida

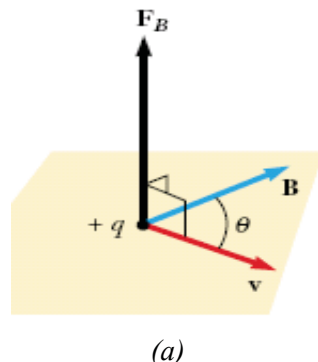
$$B = \frac{\mu_o N i}{L} \quad \text{dengan} \quad L = \pi(b + c) \quad \text{maka}$$

$$B = \frac{\mu_o N i}{\pi(c + b)} \quad (9.8)$$

9.4 Gerak Muatan Listrik Dan Medan Magnet

Gerak muatan listrik dalam medan magnet sangat penting dalam pemakaian sehari-hari. Beberapa contoh gerak muatan listrik dalam medan magnet adalah gerak elektron pada tabung sinar katoda, gerak partikel bermuatan dalam siklotron, gerak elektron yang diproyeksikan dalam layar televisi, gerak ion dalam spektroskop massa dan sebagainya.

Mari kita tinjau muatan positif q yang bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet yang induksi magnetnya B . Muatan $+q$ akan mengalami gaya F_B yang arahnya diperlihatkan seperti pada Gambar 9.8 a-c



Besarnya gaya magnet pada muatan adalah

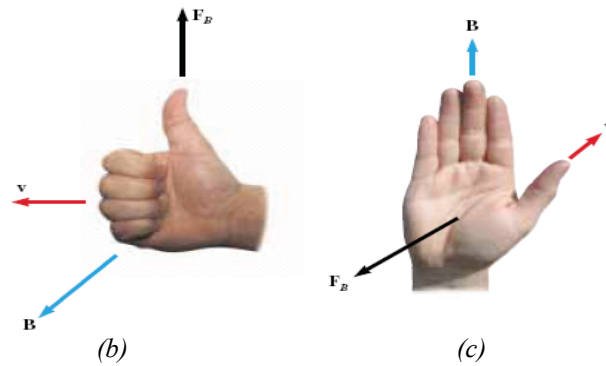
$$F = q v B \sin \theta$$

dimana θ sudut antara arah kecepatan dengan arah induksi magnet.

Arah gaya \vec{F} adalah arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah kecepatan \vec{v} ke arah induksi magnet \vec{B} (perhatikan Gambar 9.8b).

Dalam notasi vektor gaya tersebut dapat ditulis sebagai

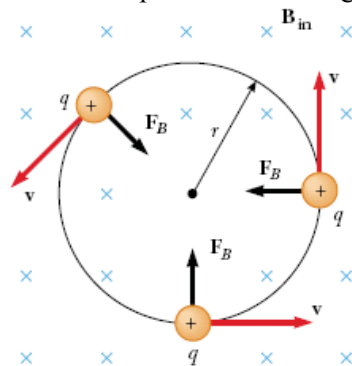
$$\vec{F} = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (9.9)$$



Gambar 9.8 Arah Gaya magnet pada muatan yang bergerak dalam medan magnet B

Gambar 9.11 adalah arah gaya apabila yang bergerak adalah muatan positif, dan jika yang bergerak adalah muatan negatif maka arah gaya adalah arah sebaliknya. Gaya magnet pada muatan yang bergerak ini dinamakan Gaya Lorentz. Gaya Lorentz selalu bergerak tegak lurus terhadap arah kecepatan dan juga tegak lurus terhadap induksi magnet, dan hanya ada jika arah kecepatan tidak sejajar arah medan magnet.

Suatu muatan positif bergerak dalam medan magnet serba sama seperti diperlihatkan pada Gambar 9.9. Arah kecepatan muatan tersebut adalah tegak lurus terhadap arah medan magnet.



Gambar 9.9 Gerak melingkar suatu muatan yang bergerak dalam medan magnet B

Karena gaya magnet tegak lurus dengan arah kecepatan, maka gaya magnet tersebut hanya mengubah arah gerak (arah kecepatan), sedang besar kecepatan tetap.

Percepatan pada muatan adalah percepatan sentripetal, sehingga memenuhi persamaan

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad (9.10)$$

atau

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (9.11)$$

Akibat bergerak dalam medan magnet, lintasan gerakan partikel bermuatan adalah berbentuk lingkaran, maka kecepatan anguler muatan adalah

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (9.12)$$

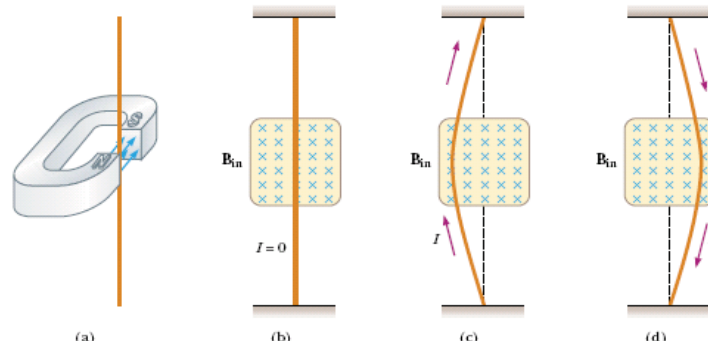
Periode dari gerakan muatan adalah

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (9.13)$$

9.5 Kumparan Dalam Medan Magnet

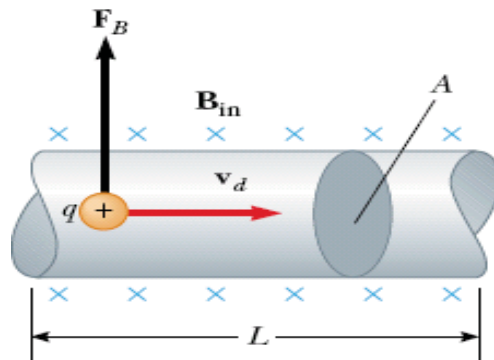
Sebelum membicarakan pengaruh medan magnet pada kumparan yang dilalui arus, dibicarakan dahulu pengaruh medan magnet pada kawat yang dilalui arus listrik.

Perhatikan Gambar 9.10a, adalah penghantar lurus didekatkan pada sebuah batang magnet. Kawat yang tidak dialiri arus tetap dalam keadaan lurus. Pada Gambar 9.10.b penghantar tidak dialiri arus dan ditempatkan dalam medan magnet serba sama. Dari gambar tampak bahwa penghantar tetap dalam keadaan lurus. Selanjutnya penghantar dialiri arus listrik I ke arah atas seperti diperlihatkan dalam Gambar 10.c. Dari gambar tampak bahwa penghantar melengkung ke kiri. Jika arah arus pada penghantar dibalik maka arah lengkungan akan ke kanan seperti terlihat pada Gambar 9.10d.



Gambar 9.10 Pengaruh medan magnet pada kawat yang dilalui arus listrik

Pada Gambar 9.11 diperlihatkan kawat berarus lurus berada dalam medan magnet uniform. Arah medan magnet adalah tegak lurus dengan papan gambar dan menjauhi penggambar. Kawat berarus berada pada bidang gambar, sehingga kawat arus tegak lurus pada arah medan magnet.



Gambar 9.11 Kawat berarus dalam medan magnet

Kita bayangkan ada partikel-partikel bermuatan q dan bergerak dengan kecepatan v_d . Menurut hukum Lorentz Masing-masing partikel akan dipengaruhi gaya magnet sebesar

$$F_B = qvB$$

Arah F_B tegak lurus dengan arah i dan medan magnet. Untuk kawat sepanjang L , jumlah partikel dalam kawat adalah $N = A.l.n$.

Gaya pada seluruh muatan pada kawat sepanjang L adalah

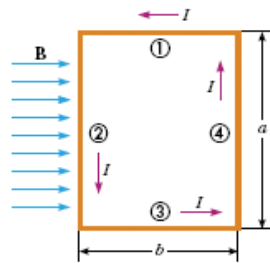
$$\begin{aligned} F &= AL.nq.vB \\ &= B (A.nq.v)L \end{aligned} \quad (9.13)$$

Gaya pada bekerja pada muatan sepanjang kawat dan dapat dinyatakan sebagai

$$F = B i L \quad (9.14)$$

Ditinjau kawat arus tertutup berbentuk empat persegi panjang seperti pada Gambar 9.12 yang dilalui arus i .

Arah induksi magnet adalah ke kanan. Gaya pada kawat a yaitu F_a arahnya masuk bidang gambar (arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah arus ke arah B , besarnya $B i L_a \sin \alpha$).

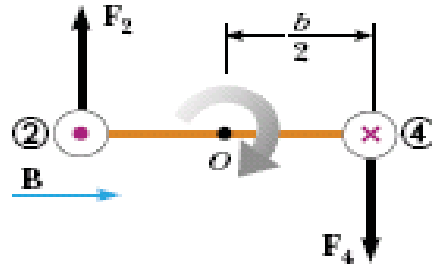


Gaya pada kawat cd adalah ke arah sumbu Z negatif (arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah i ke arah B , besarnya $B i L_{cd} \sin \alpha$).

Gambar 9.12 Kawat berarus dalam medan magnet

Gaya F_{ab} dan F_{cd} besarnya sama dengan arah yang berlawanan dan juga garis kerjanya berimpit, sehingga kedua gaya tersebut saling menetralkan, ini berarti bahwa gaya-gaya tersebut saling meniadakan (gaya resultan ke arah sejajar dengan sumbu Z nol).

Gaya pada kawat $d-a$ yaitu F_{da} ke arah sumbu X negatif (arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah i /sumbu Z positif ke arah B /sumbu Y positif), sebaliknya gaya pada kawat $b-c$ yaitu F_{bc} ke arah sumbu X positif, besar gaya $F_{da} =$ besar gaya $F_{bc} = B i L_{da} = B i L_{bc}$.



Gambar 9.13 Kawat berarus dalam medan magnet

Jika arus dan arah medan magnet dilihat dari atas (kearah sumbu Z negatif) maka arus dan arah B terlihat seperti Gambar 9.13.

Terlihat pada gambar bahwa arah gaya F_{da} dan arah gaya F_{bc} berlawanan dan tidak segaris kerja, sehingga membentuk sebuah kopel dengan momen kopel ;

$$\begin{aligned}\tau &= B i L_{da} L_{ab} \cos \theta \\ &= B i L_{da} L_{ab} \cos (90^\circ - \alpha) \\ \text{atau} \quad \tau &= B i A \sin \alpha\end{aligned}\quad (9.15)$$

dengan

A = Luas bidang kawat arus.

Jika kawat arus tertutup diganti dengan kumparan dengan N lilitan, maka besarnya momen kopel :

$$\tau = B i A N \sin \alpha \quad (9.16)$$

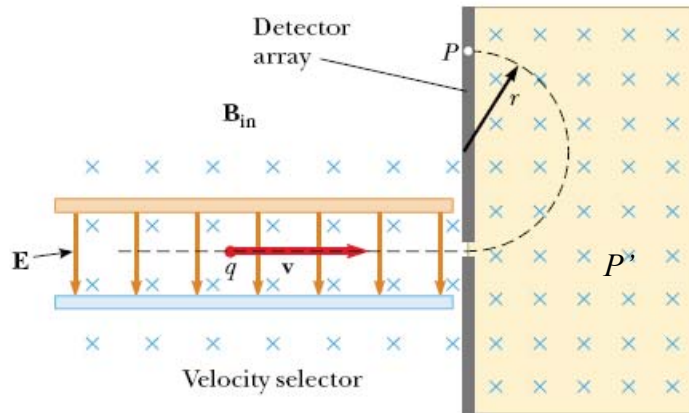
9. 6 Pemakaian Medan Magnet

Medan magnet banyak digunakan dalam peralatan yang digunakan sehari-hari misalnya pada motor listrik, generator listrik, komputer, televisi, tabung sinar katoda, siklotron, spektrograf massa, mikroskop elektron, dsb.

Dalam paragraf ini hanya akan dibahas beberapa alat yang mudah dianalisa pemakaian medan magnetnya, misalnya tabung sinar katoda, siklotron, spektrogram Thomson, spektrograf massa Bainbridge, dan generator arus searah.

Spektrometer massa

Alat ini digunakan untuk mengukur massa partikel bermuatan. Prinsip kerjanya adalah bahwa suatu unsur mempunyai beberapa isotop.



Gambar 9.14 Spektrometer massa

Ion-ion positif dari sumber ion S bergerak dengan kecepatan v masuk celah yang sangat sempit S_1 masuk dalam daerah diantara dua plat sejajar dimana didalamnya terdapat medan magnet dan medan listrik. Pada Gambar 9.14 medan listrik arahnya ke kanan sebesar qE , dimana E adalah kuat medan listrik diantara P dan P', P positif terhadap P'. Agar supaya ion positif dapat melalui S_2 , maka gaya listrik ke arah kanan harus diimbangi oleh gaya magnet qvB ke arah kiri (arah induksi magnet tegak lurus papan gambar dan menuju penggambar, sehingga arah maju sekrup kanan yang diputar dari arah v ke arah B adalah ke kiri). Setelah melewati celah S_2 karena pengaruh medan magnet dengan induksi magnet B' ion-ion bergerak dengan lintasan berupa lingkaran-lingkaran.

Kecepatan ion dapat dihitung sebagai berikut yaitu

Gaya listrik kekanan = gaya magnet kekiri

$$QE = qvB$$

Atau
$$v = \frac{E}{B}$$

$$\text{Radius lintasan ion} \quad R = \frac{m v}{q B'} \quad (9.17)$$

Untuk isotop-isotop v , q , dan B' sama sehingga radius ion sebanding dengan massa ion. Dengan spektrometer ini dapat dipisahkan bermacam-macam isotop. Dari persamaan (9.22), tampak bahwa jari-jari lintasan sebanding dengan massa isotop tersebut.

Contoh soal 1:

Jika pada spektrograf massa Bainbridge kuat medan listrik antara P dan P' $= 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ dan $B = B' = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, Sedang ion-ion yang diselidiki adalah 6^{016} , 8^{017} , 8^{018} bermuatan tunggal. Tentukan jarak antara garis-garis yang terbentuk pada film.

Penyelesaian :

$$e E = e v_o B$$

$$v_o = \frac{E}{B} = \frac{10^4}{0,2} = 5 \times 10^4$$

$$R_1 = \frac{m_1 v_o}{e B'}, m_1 = 16 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kgm.}$$

$$R_2 = \frac{m_2 v_o}{e B'}, m_2 = 17 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kgm.}$$

$$R_3 = \frac{m_3 v_o}{e B'}, m_3 = 18 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kgm.}$$

Jarak antara garis kedua dan pertama,

$$= 2 (R_2 - R_1) = 2 \frac{v_o}{e B'} (m_2 - m_1)$$

$$= 2 \cdot \frac{5 \times 10^4}{1,6 \times 10^{-19} \cdot 0,2} (17 - 16) 1,66 \times 10^{-27} \text{ meter}$$

Jarak antara garis ketiga dan kedua,

$$= \frac{2 \cdot 5 \times 10^4}{1,6 \times 10^{-19} \cdot 0,2} (18 - 17) 1,66 \times 10^{-27} \text{ meter}$$

9.7 Alat-Alat Ukur Listrik

Interaksi medan magnet dengan kumparan yang dilalui arus listrik memungkinkan dikonstruksi alat-alat ukur besaran-besaran listrik, misalnya arus listrik, beda potensial, muatan yang dipindahkan dari dan ke kapasitor, daya dan tenaga listrik. Disamping alat-alat ukur listrik interaksi antara medan magnet dan arus listrik juga digunakan dalam motor arus searah.

Dalam paragraf ini akan dibicarakan prinsip dari galvanometer, amper meter, voltmeter, galvanometer balistik dan dinamometer.

Galvanometer

Prinsip dari suatu galvanometer adalah simpangan kumparan yang dilalui arus listrik dalam medan magnet. Akan tetapi gerakannya dibatasi oleh kedua pegas. Makin besar arus listrik yang mengalir, kumparan berputar semakin besar. Akibatnya, jarum penunjuk akan menunjuk ke arah skala yang lebih besar.

Galvanometer yang memiliki letak skala nol di tengah dapat digunakan untuk mengukur besar arus listrik tanpa memandang arahnya. Namun apabila titik nolnya berada di ujung sebelah kiri, harus diperhatikan kutub positif dan negatif galvanometer.

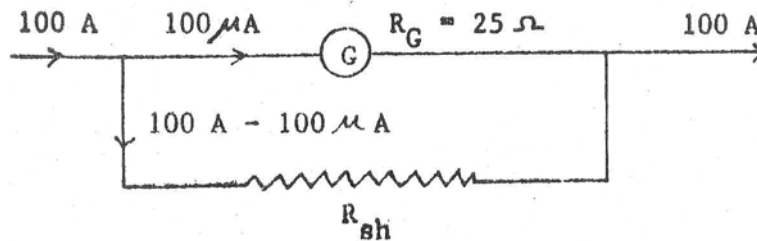
Amperemeter.

Galvanometer hanya untuk mengukur arus dalam orde mikroampere, sedang sehari-hari kita memerlukan arus dalam orde Ampere, karena itu perlu alat ukur arus ini disebut amperemeter.

Suatu amperemeter adalah suatu galvanometer yang diberi tahanan luar paralel dengan tahanan galvanometer (disebut tahanan shunt).

Fungsi dari tahanan shunt adalah untuk mengalirkan arus sedemikian hingga arus maksimum yang lewat galvanometer tetap dalam orde mikroampere.

Misalnya suatu galvanometer dengan tahanan 25 ohm hanya mampu dialiri arus 100 mikroampere pada simpangan maksimum, galvanometer ini akan dijadikan amperemeter yang mampu mengukur arus sebesar 100 ampere pada simpangan maksimum. Arus sebesar 100 ampere – 100 mikroampere harus dilewatkan pada tahanan shunt R_{sh} (Gambar 9.20).



Gambar 9.15 Ampermeter

Besarnya tahanan shunt yang harus dipasang pada galvanometer agar mampu menjadi ampermeter dengan batas ukur 100 A (simpangan maksimum bila dilalui arus 100 A) dapat dihitung sebagai berikut :

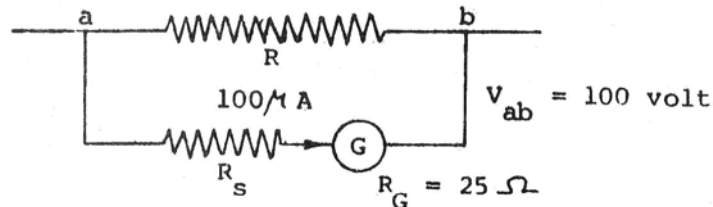
$$0,0001 \times 25 = (100 - 0,0001)R_{sh}$$

$$R_{sh} = \frac{25 \times 0,0001}{1000 - 0,0001}$$

$$= 2,5 \times 10^{-5} \text{ ohm.}$$

Voltmeter.

Prinsip suatu voltmeter adalah galvanometer yang diberi tahanan muka (tahanan luar yang seri dengan tahanan galvanometer). Misalkan tahanan galvanometer 25 ohm, simpangan maksimum galvanometer terjadi bila galvanometer dilalui arus 0,1 mikroampere. Galvanometer akan dijadikan voltmeter dengan batas ukur 100 volt, tahanan muka yang dipasang R_s (Gambar 9.18) harus sedemikian sehingga bila dipasang pada antara titik a dan b yang beda potensialnya 100 volt, arus yang lewat galvanometer 100 mikroampere.



Gambar 9.16 Voltmeter

Tahanan seri pada galvanometer agar dapat dipakai sebagai voltmeter dengan batas ukur 100 volt dapat dihitung sebagai berikut

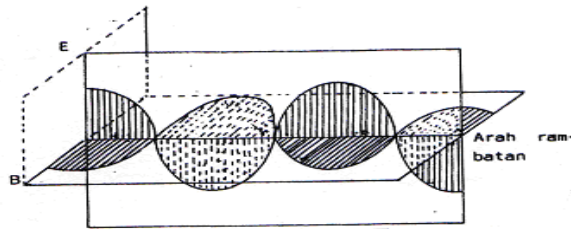
$$(R_s + 25)10^{-4} = 100$$

$$R_s = \frac{100}{10^{-4}} - 25 = 5.999,9925 \text{ ohm.}$$

9.8 Gelombang Elektromagnetik

Bila dalam kawat PQ terjadi perubahan-perubahan tegangan baik besar maupun arahnya, maka dalam kawat PQ elektron bergerak bolak-balik, dengan kata lain dalam kawat PQ terjadi getaran listrik. Perubahan tegangan menimbulkan perubahan medan listrik dalam ruangan disekitar kawat, sedangkan perubahan arus listrik menimbulkan perubahan medan magnet. Perubahan medan listrik dan medan magnet itu merambat ke segala jurusan. Karena rambatan perubahan medan magnet dan medan listrik secara periodik maka rambatan perubahan medan listrik dan medan magnet lazim disebut Gelombang Elektromagnetik.

Percobaan-percobaan yang teliti membawa pada kesimpulan, bahwa pola gelombang elektromagnetik sama dengan pola gelombang transversal dengan vektor perubahan medan listrik tegak lurus pada vektor perubahan medan magnet.



Gelombang elektromagnetik menunjukkan gejala-gejala :

1. Pemantulan, pembiasan, difraksi, polarisasi seperti halnya pada cahaya.
2. Diserap oleh konduktor dan diteruskan oleh isolator.

Gelombang elektromagnetik lahir sebagai paduan daya imajinasi dan ketajaman akal pikiran berlandaskan keyakinan akan keteraturan dan kerapian aturan-aturan alam.

Hasil-hasil percobaan yang mendahuluinya telah mengungkapkan tiga aturan gejala kelistrikan :

- Hukum Coulomb : Muatan listrik menghasilkan medan listrik yang kuat.
- Hukum Biot-Savart : Aliran muatan (arus) listrik menghasilkan medan magnet disekitarnya.
- Hukum Faraday : Perubahan medan magnet (B) dapat menimbulkan medan listrik (E).

Didorong oleh keyakinan atas keteraturan dan kerapian hukum-hukum alam, Maxwell berpendapat bahwa masih ada kekurangan satu aturan kelistrikan yang masih belum terungkap secara empirik.

Jika perubahan medan magnet dapat menimbulkan perubahan medan listrik maka perubahan medan listrik pasti dapat menimbulkan perubahan medan magnet, demikianlah keyakinan Maxwell.

Dengan pengetahuan matematika yang dimilikinya, secara cermat Maxwell membangun teori yang dikenal sebagai teori gelombang elektromagnetik. Baru setelah bertahun-tahun Maxwell tiada, teorinya dapat diuji kebenarannya melalui percobaan-percobaan. Menurut perhitungan secara teoritik, kecepatan gelombang elektromagnetik hanya bergantung pada permitivitas (ϵ_0) dan permeabilitas (μ_0).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (9.18)$$

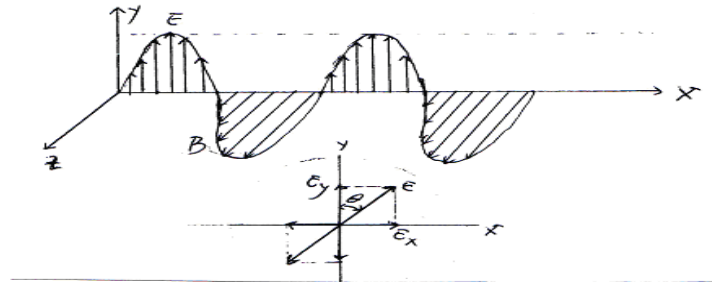
Dengan memasukkan $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9} \cdot 10^{-9}$ C/N.m² dan

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ W/A.m}$$

Diperoleh nilai $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, nilai yang sama dengan kecepatan cahaya. Oleh sebab itu Maxwell mempunyai cukup alasan untuk menganggap cahaya adalah gelombang elektromagnetik, yang merupakan penyokong teori HUYGENS tentang cahaya sebagai gerak gelombang.

9.9 Intensitas Gelombang Elektromagnetik.

Energi rata-rata per satuan luas yang dirambatkan oleh gelombang elektromagnetik disebut dengan **intensitas gelombang elektromagnetik**. Intensitas tersebut sebanding dengan harga maksimum medan magnet (B) dan sebanding pula dengan harga maksimum medan listriknya (E).



Gambar 9.17 Perambatan gelombang

Kedua medan listrik dan medan magnet tersebut saling tegak lurus, merambat ke arah sumbu X.

Kedua gelombang tersebut dapat dituliskan menjadi :

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t) \quad (9.19)$$

$$E_z = B_0 \sin(kx - \omega t) \quad (9.20)$$

Intensitas gelombang elektromagnetik dituliskan menjadi

$$s = \frac{E_y \cdot B_z}{\mu_0}$$

$$s = \frac{E_0 \cdot B_0}{\mu_0} \sin^2(kx - \omega t) \quad (9.21)$$

Jadi hanya intensitas (s) tergantung dari $\sin^2(kx - \omega t)$, s akan berharga maksimum bila harga $\sin^2(kx - \omega t) = 1$, atau

$$s_{maks} = \frac{E_0 \cdot B_0}{\mu_0} \text{ , atau}$$

$$s_{maks} = \frac{E_{max} \cdot B_{max}}{\mu_0}$$

Sedangkan s akan berharga minimum bila harga $\sin^2(kx - \omega t)$ adalah nol. Jadi intensitas rata-rata (s) adalah :

$$\bar{s} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$$

$$\bar{s} = \frac{E_{max} + B_{max}}{2\mu_0}$$

Selain itu \bar{s} juga dapat dituliskan menjadi :

$$\bar{s} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 c$$

Karena : 1) $E_0 = c B_0$; $E_0 = E_{max}$ dan $B_0 = B_{max}$

$$2) \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Nilai \bar{s} juga dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\bar{s} = \frac{E_0^2}{2c\mu_0} \quad (9.22)$$

Gejala gelombang elektromagnetik baru dapat ditunjukkan beberapa tahun setelah Maxwell meninggal yaitu oleh H.R. Hertz.

Beberapa gelombang-gelombang yang dapat dilihat oleh mata yaitu gelombang cahaya yang mempunyai panjang gelombang antara $8 \cdot 10^{-7}$ meter yaitu warna merah - $4 \cdot 10^{-7}$ meter yaitu warna ungu. Gelombang yang mempunyai daya tembus yang sangat besar adalah sinar X dan sinar γ .

Dimana sinar X dihasilkan oleh radiasi 'pengereman' (bremsstrahlung) sewaktu elektron yang dipercepat menumbuk target/logam dan kehilangan energinya berupa sinar X . Selain itu sinar X juga dihasilkan karena eksitasi (menyerap energi) dan deeksitasi (memancarkan energi) elektron-elektron atom kulit dalam sedangkan sinar γ dihasilkan oleh inti-inti yang tidak stabil (bersifat radioaktif). Manfaat gelombang elektromagnetik dapat diterangkan sesuai urutan spektrumnya

1. Daerah frekuensi antara 10^4 sampai 10^7 Hz dikenal sebagai gelombang radio, yaitu sebagai salah satu sarana komunikasi. Karena sifat gelombangnya yang mudah dipantulkan ionosfer, yaitu lapisan atmosfer

bumi yang mengandung partikel-partikel bermuatan, maka gelombang ini mampu mencapai tempat-tempat yang jaraknya cukup jauh dari stasiun pemancar.

Informasi dalam bentuk suara dibawa oleh gelombang radio sebagai perubahan amplitudo (modulasi amplitudo).

2. Daerah frekuensi sekitar 10^8 Hz, gelombang elektromagnetik mampu menembus lapisan ionosfer sehingga sering digunakan sebagai sarana komunikasi dengan satelit-satelit. Daerah ini digunakan untuk televisi dan radio FM (frekuensi modulasi) dimana informasi dibawa dalam bentuk perubahan frekuensi (modulasi frekuensi).

3. Daerah frekuensi sekitar 10^{10} Hz, digunakan oleh pesawat RADAR (Radio Detection and Ranging). Informasi yang dikirim ataupun yang diterima berbentuk sebagai pulsa. Bila pulsa ini dikirim oleh pesawat radar dan mengenai suatu sasaran dalam selang waktu t , maka jarak antara radar ke sasaran :

$$s = \frac{c \times \Delta t}{2} \quad (9.23)$$

untuk c = kecepatan cahaya (3×10^8 m/det)

4. Daerah frekuensi $10^{11} - 10^{14}$ Hz, ditempati oleh radiasi infra merah, dimana gelombang ini lebih panjang dari gelombang cahaya tampak dan tidak banyak dihamburkan oleh partikel-partikel debu dalam atmosfer sehingga mengurangi batas penglihatan manusia.

5. Daerah frekuensi $10^{14} - 10^{15}$ Hz, berisi daerah cahaya tampak (visible light), yaitu cahaya yang tampak oleh mata manusia dan terdiri dari deretan warna-warna merah sampai ungu.

6. Daerah frekuensi $10^{15} - 10^{16}$ Hz, dinamakan daerah ultra ungu (ultra violet). Dengan frekuensi ultra ungu memungkinkan kita mengenal lebih cepat dan tepat unsur-unsur yang terkandung dalam suatu bahan.

7. Daerah frekuensi $10^{16} - 10^{20}$ Hz, disebut daerah sinar X. Gelombang ini dapat juga dihasilkan dengan menembakkan elektron dalam tabung hampa pada kepingan logam. Karena panjang gelombangnya sangat pendek, maka gelombang ini mempunyai daya tembus yang cukup besar sehingga selain digunakan di rumah sakit, banyak pula digunakan di lembaga-lembaga penelitian ataupun industri.

8. Daerah frekuensi $10^{20} - 10^{25}$ Hz, disebut daerah sinar gamma. Gelombang ini mempunyai daya tembus yang lebih besar daripada sinar X, dan dihasilkan oleh inti-inti atom yang tidak stabil.

9.11. Uji Kompetensi

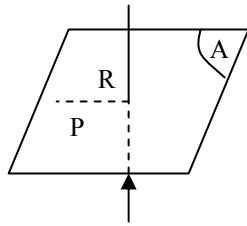
1. Dua kutub magnet sejenis kekuatannya 10^{-3} A.m
 - a. Beberapa gaya tolak menolaknya jika jaraknya 25 cm.
 - b. Berapa jarak antara kutub-kutub itu bila gaya tolak-menolaknya 10 N.
2. Sebuah kutub magnet mempunyai kekuatan 10^{-5} A.m
 - a. Berapa kuat medan di satu titik yang jaraknya 1 m.
 - b. Berapa induksi magnetik di tempat itu ?
 - c. Berapa kuat medan dan induksi magnetik pada jarak 0,25 m.
3. Kuat medan di titik dalam medan magnet 5 N/A.m
 - a. Berapa besar gaya yang bekerja pada magnet yang kekuatannya 10 A.m dititik itu ?
 - b. Berapa besar induksi magnetik di tempat itu ?
4. Berapa fluks magnetik kutub magnet yang kekuatannya 10^{-2}
5. Medan magnet yang serba sama mempunyai kuat medan sebesar 10^7 N/A.m
 - a. Berapa induksi magnetiknya ?
 - b. Berapa fluks magnetik yang tegak lurus bidang seluas 2 m^2
 - c. Jika bidang itu mengapit sudut 30° dengan medan magnet. Berapa fluks magnetik yang menembus bidang itu ?
6. Sebuah penghantar bergerak dengan kecepatan 15 m/s pada suatu medan magnet homogen. Berapa *tesla* kuat medan magnet tersebut jika ggl induksi yang timbul 10^2 volt dan panjang kawatnya 10 cm?
7. sebuah kawat berbentuk persegi panjang dengan luas 20 cm^2 diletakkan didalam medan magnet $B = 10^{-2}$ tesla. Hitung fliks magnet pada kawat tersebut jika :
 - B tegak lurus bidang kawat!
 - B membentuk sudut 30° dengan bidang kawat!

Soal pilihan ganda

1. Medan magnet dapat ditimbulkan oleh
 1. muatan listrik yang bergerak
 2. konduktor yang dialiri arus listrik

3. konduktor yang dialiri arus bolak – balik
 4. muatan listrik yang tidan bergerak
 pernyataan yang benar yaitu ...
 A. 1,2 dan 3 D. 4 saja
 B. 1 dan 3 E. Semua benar
 C. 2 dan 4
2. Bila kawat yang dialiri arus diletakkan diatas sebuah kompas, maka jarum kompas....
 A. tidak terpengaruh oleh arus listrik
 B. menyimpang ke arah tegak lurus kawat
 C. cenderung menyimpang ke arah sejajar kawat
 D. cenderung menyimpang searah dengan arus
 E. berputas terus-menerus
3. Besar kuat medan magnet di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus listrik I adalah sebanding dengan
- | | |
|--------|-----------|
| A. I | D. I/r |
| B. rI | E. I/(rI) |
| C. r/I | |
4. Sebuah kawat lurus yang panjang, ber arus listrik 10 Ampere. Sebuah titik berada 4 cm dari kawat. Jika $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$, maka kuat medan magnet dititik tersebut adalah...
- | |
|--|
| A. $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2$ |
| B. $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2$ |
| C. $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2$ |
| D. $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2$ |
| E. $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2$ |

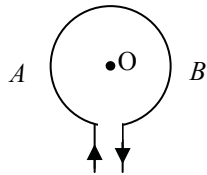
5.



Kawat lurus yang panjang menembus tegak lurus bidang kertas (A). Titik P berada pada jarak R dari kawat itu, seperti tampak pada gambar. Bila kawat dialiri arus i dengan arah dari bawah ke atas, maka arah induksi magnetik B di titik P adalah

- tegak lurus bidang A arah ke bawah
- tegak lurus bidang A arah ke atas
- menuju ke P
- menyinggung lingkaran dengan jari-jari R di P awah ke belakang menyinggung lingkaran dengan jari-jari R di P awah ke muka

6.



- Arah garis gaya magnet dipusat lingkaran O adalah
 - tegak lurus bidang kertas menjauhi pembaca
 - tegak lurus bidang kertas mendekati pembaca
 - menuju O melalui A
 - meninggalkan O melalui A
 - meninggalkan O melalui B
- Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari 1 dialiri arus i . Besar kuat medan magnet pada pusat lingkaran itu adalah....
 - tidak bergantung pada i
 - sebanding dengan i^2
 - berbanding terbalik dengan i
 - berbanding lurus dengan i
 - berbanding terbalik dengan i^2
- Induksi magnetik disebuah titik yang berada ditengah sumbu solenoida yang berarus listrik berbanding

1. lurus dengan jumlah lilitan
 2. lurus dengan besarnya kuat arus
 3. lurus dengan besarnya permeabilitas zat dalam solenoida
 4. terbalik dengan panjang solenoida
10. pernyataan diatas yang benar yaitu..
- | | |
|--------------|----------------|
| a. 1,2 dan 3 | D. 4 saja |
| b. 1 dan 3 | E. Semua benar |
| c. dan 4 | |
11. Suatu solenoida panjang 2 meter dengan 800 lilitan dan jari-jari 2 cm. Bila solenoida itu dialiri arus sebesar 0,5 A, maka induksi magnet pada ujung solenoida tersebut adalah... ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)
- a. $4 \times 10^{-5} \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-2}$
 - b. $8 \times 10^{-7} \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-2}$
 - c. $4 \times 10^{-8} \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-2}$
 - d. $8 \times 10^{-5} \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-2}$
 - e. $x \cdot 10^{-4} \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-2}$
12. besar gaya yang dialami seutas kawat lurus berarus listrik di dalam suatu medan magnet yang serba sama tidak bergantung pada ...
posisi kawat di dalam medan magnet
panjang kawat

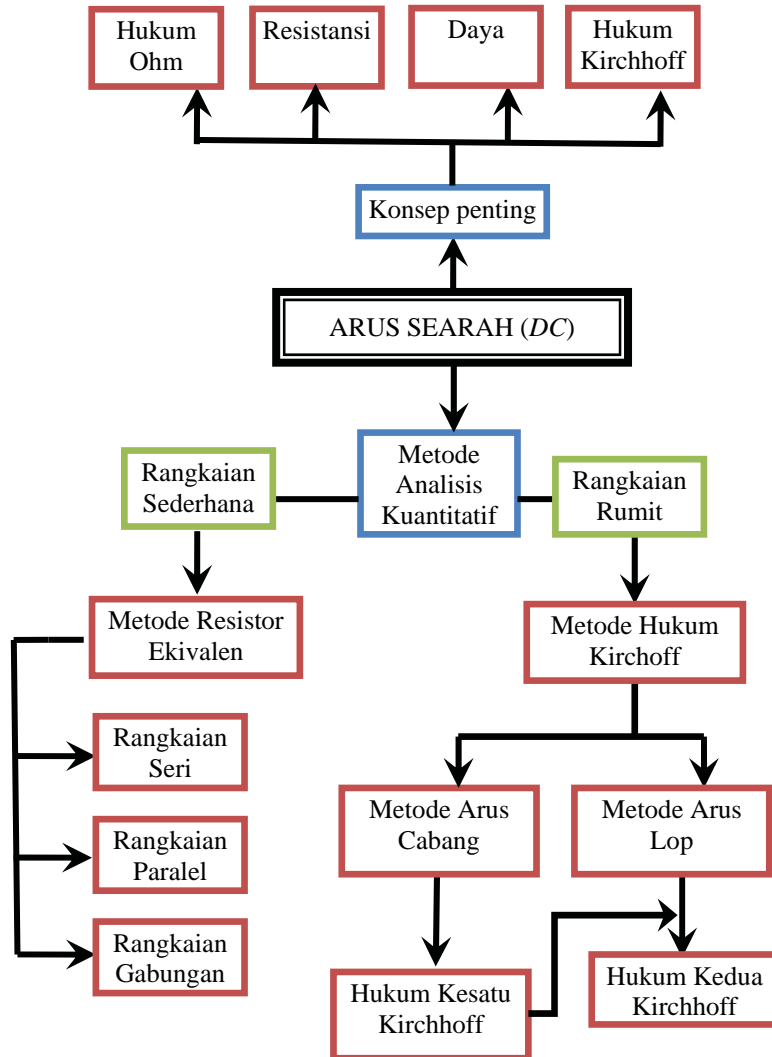
BAB 10 RANGKAIAN ARUS SEARAH



Membahas arus listrik searah tidak terlepas dari pemakaian suatu sumber energi. Sumber energi arus searah yang mudah dijumpai di pasaran adalah berupa baterai. Kebutuhan energi listrik untuk rumah tangga biasanya dipenuhi melalui sumber arus bolak balik dari PLN. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada kelompok rumah di daerah terpencil yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN dapat menggunakan sumber energi dari tenaga surya, yang merupakan energi terbarukan dan tidak menggunakan energi dari fosil, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada kenaikan harga minyak bumi yang kini mencapai 100 dolar Amerika per barel dan berakibat memberatkan negara dalam memberikan subsidi terhadap bahan bakar minyak yang kita gunakan.

Energi surya bersifat bersih lingkungan, karena tidak meninggalkan limbah. Karena harga sel surya cenderung semakin menurun dan dalam rangka memperkenalkan sistem pembangkit yang ramah lingkungan, maka pemanfaatan listrik sel surya dapat semakin ditingkatkan. Di samping itu, terdapat lima keuntungan pembangkit listrik dengan sel surya. Pertama energi yang digunakan adalah energi yang tersedia secara cuma-cuma. Kedua perawatannya mudah dan sederhana. Ketiga tidak menggunakan mesin (peralatan yang bergerak), sehingga tidak perlu penggantian suku cadang dan penyetelan pada pelumasan. Keempat peralatan dapat bekerja tanpa suara dan sehingga tidak berdampak kebisingan terhadap lingkungan. Kelima dapat bekerja secara otomatis.

PETA KONSEP



Pra Syarat

Pada bab ini dibahas tentang resistansi, konduktansi, hukum Ohm, konsep arus searah kaitannya dengan kecepatan derip, jenis sambungan resistor. Juga daya pada resistor, Hukum Kesatu Kirchhoff, Hukum Kedua Kirchhoff untuk loop sederhana maupun yang rumit.

Cek Kemampuan Anda, apakah:

- Anda telah memahami konsep mengapa muatan listrik dapat bergerak.
- Anda telah memahami konsep resistansi pada suatu bahan.
- Anda telah memahami dan dapat menuliskan rumusan untuk beda tegangan pada kedua ujung untuk resistor yang dilewatkan arus I dan suatu batere yang memiliki gaya gerak listrik (ggl) ε .
- Anda memahami konsep daya pada rangkaian listrik tersebut.

Konduktor (misalkan logam) memiliki sifat mudah melepaskan elektron untuk bergerak dari satu atom ke atom lain apabila ada medan listrik E . Konduktor yang baik sekaligus menjadi penghantar panas yang baik pula. Sebaliknya, bahan isolator tidak mudah melepaskan elektronnya, sehingga bukan merupakan penghantar yang baik. Namun, isolator padat dapat berubah menjadi konduktor apabila dipanasi karena sifat cairnya yang menghasilkan ion bebas sehingga dapat menghantarkan muatan listrik.

Semikonduktor merupakan suatu bahan yang dicirikan oleh kemampuannya untuk menghantarkan arus listrik yang kecil. Hal ini dimungkinkan karena dalam model pita energi, maka tingkat energi yang rendah terisi pada temperatur rendah. Sedangkan daerah yang tidak boleh dihuni kebanyakan elektron dari pengisian tingkat energi paling atas dan mampu membawa arus.

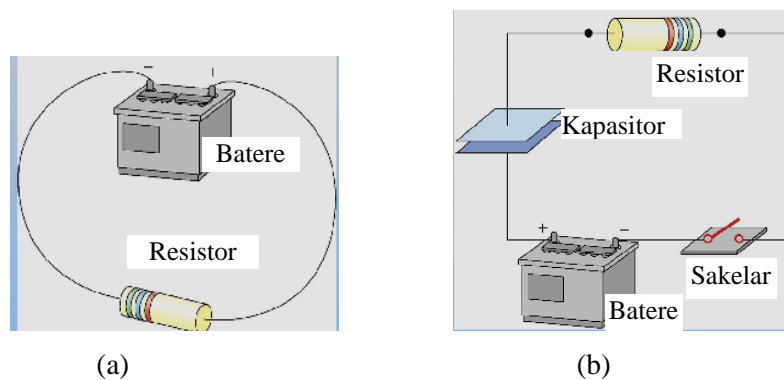
Resistansi (R) merupakan ukuran daya hambat (perlawanan) bahan terhadap aliran arus listrik, (diukur dalam satuan Ohm, Ω). Resistansi menghambat aliran muatan listrik. Aliran muatan listrik dalam bahan menghasilkan tumbukan yang ditandai berupa kenaikan temperatur bahan. Hal ini mirip dengan timbulnya panas akibat gesekan antar benda.

Dengan kata lain, konduktor memiliki resistansi rendah, namun isolator memiliki resistansi yang tinggi. Resistansi dapat dinyatakan dengan rumusan $R = \rho L/A$, yang berarti bahwa resistansi suatu kawat

- ❖ bergantung pada panjang kawat, yaitu makin panjang kawat makin besar pula resistansinya.
- ❖ berbanding terbalik dengan luas penampang kawat

- ❖ berbanding lurus dengan jenis bahan. Misal kawat tembaga memiliki resistansi yang rendah. Dalam rumusan di atas dinyatakan dengan besaran ρ (dibaca: *rho*), yaitu resistivitas.

Arus listrik searah (*direct current, DC*) adalah arus yang besar dan arah alirannya selalu sama. Sebagai contoh batere aki (*accu*), yang biasa dipasang pada mobil atau motor merupakan sumber arus searah yang digunakan sebagai penggerak motor atau sebagai pemanas. Untuk kepentingan tertentu diperlukan tegangan yang lebih besar sehingga diperlukan modifikasi, yaitu dengan menambahkan kapasitor sebagai penyimpan muatan sementara dari batere. Pada saat sakelar ditutup muatan batere mengalir untuk mengisi muatan pada kapasitor seperti pada Gambar 10.1.



Gambar 10.1 (a) Resistor dihubungkan dengan sumber tegangan searah. (b) Resistor dan kapasitor disambungkan seri dan dihubungkan dengan batere lewat sakelar S .

10.1. Arus Searah dalam Tinjau Mikroskopis

Pengertian arus adalah jumlah muatan yang mengalir per satuan waktu. Secara umum, arus rerata adalah perbandingan antara jumlah muatan ΔQ yang mengalir terhadap waktu Δt .

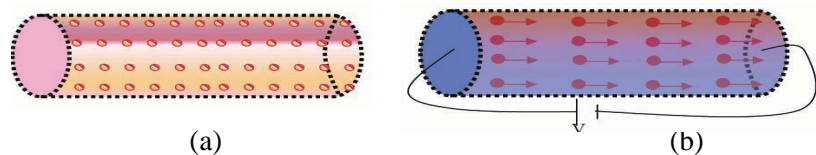
$$I_{\text{rerata}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Hal ini berarti bahwa arus sesaat merupakan tinjauan dalam, yaitu sejumlah kecil muatan ΔQ yang mengalir secara tegak lurus terhadap penampang kawat yang luasnya A dalam waktu Δt yang sangat singkat. Karena besar dan arah arus sesaat tersebut tidak berubah terhadap waktu,

maka untuk selanjutnya istilah arus sesaat dinyatakan dengan arus searah (biasa disebut arus *DC*), yang disimbolkan dengan I ditulis dengan huruf besar.

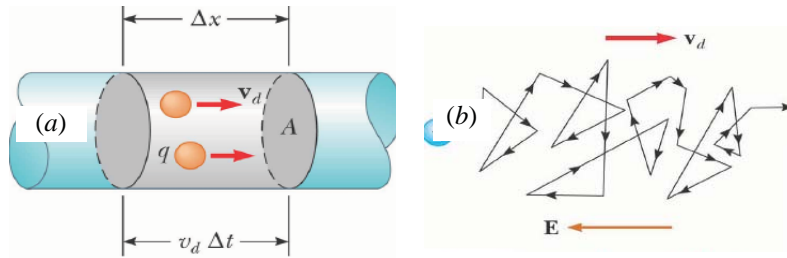
Satuan arus listrik adalah Coulomb/sekon atau Ampere (A). Arah arus adalah sama dengan arah gerak muatan positif atau kebalikan arah gerak muatan negatif.

Perhatikan Gambar 10.2 (a) yang menyatakan kondisi muatan dalam bahan tanpa pengaruh batere luar, sehingga tidak ada muatan di dalam konduktor, semua terdistribusi di bagian luar permukaan bahan. Gerakan muatan listrik di dalam bahan adalah gerakan akibat temperatur bahan (efek termal), namun secara rerata posisi partikel pembawa muatan tidak berubah. Kecepatan gerak elektron pada bahan dengan temperatur sekitar 300K adalah 10^5 m/s. Berikutnya tinjau kondisi lain, yaitu pada bahan dikenakan batere luar seperti Gambar 10.2 (b) ternyata muatan akan terkena gaya dorong akibat medan listrik dari batere. Pada prinsipnya, batere luar akan memberikan medan listrik di dalam bahan. Apabila medan listrik tersebut mengenai muatan maka akan memberikan gaya pada muatan tersebut sehingga mengakibatkan muatan positif bergerak searah dengan arah medan listrik, sebaliknya muatan negatif akan bergerak berlawanan dengan arah medan listrik. Gabungan antara gaya dorong dari batere dan kemampuan gerak akibat temperatur bahan menghasilkan kecepatan derap v_d , yaitu kecepatan rerata muatan bergerak di dalam bahan. Arah arus listrik diperjanjikan mengikuti arah gerakan muatan positif, atau kebalikan dari arah gerak muatan negatif.



Gambar 10.2 (a) Kondisi muatan dalam bahan tanpa pengaruh batere luar. (b) Kondisi muatan dalam bahan dengan diberikan pengaruh batere luar.

Untuk memahami arus listrik dengan mudah, gunakan n untuk menyatakan jumlah partikel pembawa muatan per satuan volume, q untuk muatan tiap partikel, v menyatakan kecepatan derap muatan, A adalah luas penampang lintang kawat yang dilalui muatan.



Gambar 10.3 (a) Gerak muatan di dalam bahan luas penampang lintang A , kecepatan derip v_d (b) Arah gerak muatan di dalam bahan secara acak dikenai medan listrik E .

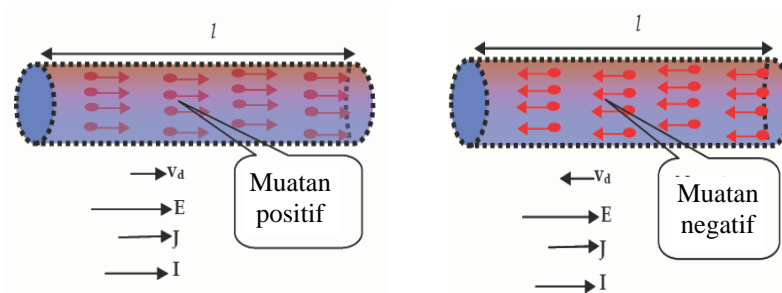
Gambar 10.3 (a) menunjukkan gerak muatan di dalam bahan dengan luas penampang lintang A dengan kecepatan derip (laju aliran) v_d yang merupakan resultan kecepatan gerak muatan sehingga dalam waktu Δt mampu menempuh jarak $\Delta L = \Delta t v_d$. Sedangkan Gambar 10.3 (b) memperlihatkan arah gerak muatan di dalam bahan secara acak dan dipengaruhi medan listrik E . Bagi elektron yang bermuatan negatif arah gerak berlawanan dengan arah medan listriknya.

Tinjaulah perpindahan partikel pembawa muatan dalam waktu Δt . Bila dalam waktu Δt terdapat n partikel per satuan volume dan tiap partikel bermuatan q maka jumlah muatan per satuan volume yang berpindah dalam waktu Δt adalah nq . Karena selama Δt muatan menempuh jarak $v\Delta t$ dengan luas penampang lintang A , maka jumlah muatan yang berpindah dalam waktu Δt adalah $nq(Av\Delta t)$. Volume kawat yang memberikan andil muatan yang bergerak dalam waktu Δt adalah $Av\Delta t$. Jadi jumlah muatan yang berpindah posisi per satuan waktu Δt adalah $nqvA$. Jadi besar arus listrik pada kawat dengan luas penampang lintang A dapat dinyatakan dengan $nqvA$.

Satuan arus listrik adalah

$$[I] = \frac{[Q]}{[t]} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ s}} \equiv 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ Amp} = 1 \text{ A}$$

Besaran, yaitu rapat arus \mathbf{J} yang didefinisikan sebagai arus per satuan waktu luas. Untuk \hat{n} adalah vektor yang tegak lurus dengan bidang luasan dA .



Gambar 10.4 (a) Arah gerak muatan positif (b) Arah gerak muatan negatif.

Satuan rapat arus adalah Coulomb/m². Arah rapat arus sama dengan arah arus. Bila panjang kawat L dilalui elektron dengan kecepatan derip v dalam waktu t detik maka berlaku:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{v}$$

Dari rumusan arus listrik searah

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{nqA(v\Delta t)}{\Delta t} = nqvA$$

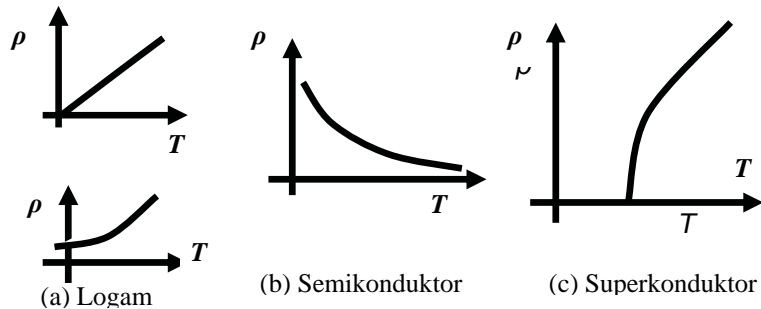
sehingga rapat arus dapat ditulis

$$J = \frac{I}{A} = nqv$$

dan kecepatan derip adalah

$$v = \frac{I}{Anq} = \frac{J}{nq}$$

Berbagai eksperimen menunjukkan bahwa resistivitas suatu bahan bergantung pada temperatur, seperti ditunjukkan pada Gambar 10.5 yang menyatakan hubungan antara resistansi dengan temperatur.



Gambar 10.5 Hubungan antara resistansi (ordinat) dengan temperatur (absis). (a) Pada logam, (b) pada semikonduktor, dan (c) pada superkonduktor.

Contoh Soal 10.1.

Suatu kawat aluminum memiliki luas penampang lintang $4 \times 10^6 \text{ m}^2$ mengalirkan arus sebesar 5 A. Tentukan kecepatan derip (laju aliran) elektron dalam kawat. Rapat massa aluminum adalah $2,7 \text{ g/cm}^3$. Anggap setiap atom aluminum menyumbang satu elektron bebas.

Penyelesaian:

Melalui kecepatan derip (laju aliran) elektron v_d , maka arus dalam konduktor logam adalah

$$I = nqv_dA$$

untuk n adalah jumlah elektron bebas per satuan volume dan A adalah luas penampang lintang kawat konduktor. Karena anggapan tiap atom memberikan andil satu elektron maka jumlah atom per satuan volume dalam bahan aluminum juga sama dengan n .

$$n = \frac{\text{massa per satuan volume}}{\text{massa per atom}} = \frac{\text{rapat massa}}{\text{massa per atom}}$$

$$m_{\text{atom}} = \frac{\text{massa per mol}}{\text{atom per mol}} = \frac{\text{berat molekul}}{\text{bilangan Avogadro}}$$

$$m_{\text{atom}} = \frac{27 \text{ g}}{6,02 \times 10^{23}} = 4,5 \times 10^{-23} \text{ g}$$

Rapat massa elektron bebas adalah

$$n = \frac{\rho}{m_{\text{atom}}} = \frac{27 \text{ g/cm}^3}{4,5 \times 10^{-23} \text{ g}} = 6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$n = (6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}) \left(\frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \right) = 6 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

Kecepatan derip (laju aliran) v_d elektron dalam kawat aluminum adalah

$$v_d = \frac{5 \frac{\text{C}}{\text{s}}}{(6 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(4 \times 10^{-6} \text{ m}^2)}$$

$$= 1,3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

(Bila dianggap sebuah elektron ‘berukuran’ dalam orde 10^{-15} m, berarti elektron itu bergerak dengan kecepatan 100 milyar kali ukurannya dalam satu sekon! Bandingkan dengan manusia tercepat yang hanya dapat bergerak kira-kira 10 m dalam 1 sekon).

Contoh Soal 10.2.

Tentukan kecepatan derip elektron pada kawat tembaga berdiameter 4 mm yang dialiri arus listrik 1 A. Bila jumlah elektron pada kawat tembaga per m^3 adalah $8,5 \times 10^{28}$ elektron/ m^3 .

Penyelesaian:

Rapat arus adalah nilai arus dibagi dengan luas penampang lintang kawat

$$J = \frac{I}{A} = \frac{1}{\pi(2 \times 10^{-3})^2} = 79545,45 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

$$v = \frac{I}{Anq} = \frac{J}{nq} = \frac{\left(79545,45 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}\right)}{\left(8,85 \times 10^{28} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}\right) (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}$$

$$= 5,6 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Kegiatan:

Dari perhitungan kecepatan derip elektron didapat sekitar $5,6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ yang tampak sangat kecil, padahal kalau kita menyalakan lampu melalui sakelar, maka lampu begitu cepat menyala. Carilah penjelasan tentang hal ini di berbagai literatur atau internet kemudian diskusikanlah dengan temanmu.

Tabel 10.1 menunjukkan nilai resistivitas beberapa bahan.

Tabel 10.1 Nilai resistivitas untuk kelompok bahan yang bersifat sebagai isolator, semikonduktor dan konduktor

Bahan	Resistivitas	Sifat
Kaca	$>10^{10}$	Isolator
Air Murni	2×10^5	
Karbon	$3,5 \times 10^5$	Semikonduktor
Silikon	2300	
Air Laut	0,2	Elektrolit

Emas	$2,4 \times 10^8$	Konduktor
Tembaga	$1,7 \times 10^8$	




Latihan:

Bagaimana resistivitas suatu bahan berubah terhadap temperatur? Berikan ulasannya dengan menggunakan pengertian bahwa bila temperatur bahan bertambah maka muatan muatan di dalam bahan juga bertambah energinya.

Adapun rumusan yang memberikan hubungan antara resistivitas dan temperatur

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

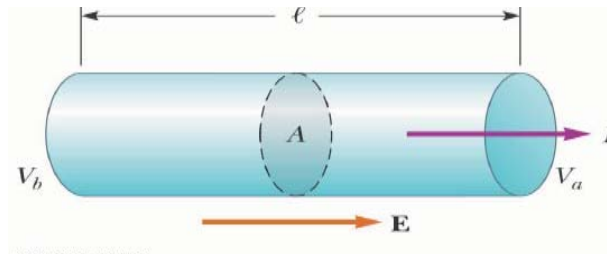
Simbol simbol yang akan digunakan dalam pembahasan selanjutnya adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 10.6.

Sumber Tegangan	
Resistor	
Sakelar	

Gambar 10.6 Simbol yang digunakan dalam rangkaian arus listrik.

10.2. Hukum Ohm

Secara makroskopis hukum Ohm dinyatakan dalam hubungan $V = IR$.



Gambar 10.7 Arah gerak muatan positif, sesuai dengan arah arus I dan medan E . [Diambil dari PY212 R. D. Averitt 2007].

Tinjau kawat konduktor dari titik A ke B sepanjang l , dengan luas penampang lintang A , dalam pengaruh medan listrik E yang memberikan beda potensial $V_a - V_b = \Delta V = V_{ab}$. Tanpa melakukan pembahasan secara rinci untuk menghindari pemakaian rumusan matematis yang rumit, didapat bahwa hubungan antara potensial listrik dengan medan listrik adalah

$$V = EL$$

Karena $J = \frac{I}{A}$ maka

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

Kegiatan:

Carilah dua kawat tembaga yang biasa digunakan untuk kabel listrik. Potonglah kawat tersebut sehingga panjang kawat 2 adalah dua kali panjang kawat 1. Hubungkan kawat 1 dengan batere dan bohlam lampu kecil hingga menyala, amatilah nyala lampu. Lakukan hal yang sama dengan menggunakan kawat 2. Diskusikan kaitannya dengan rumusan resistansi yang telah kamu pelajari.

Latihan:

Kawat 1 memiliki resistansi R_1 , Kawat 2 berasal dari bahan yang sama dengan bahan kawat pertama, namun memiliki luas penampang lintang 4 kali luas penampang lintang kawat pertama. Tentukan resistansi kawat 2 (R_2) terhadap resistansi R_1 .

10.3. GGL dan Resistansi Dalam

Untuk menjaga agar arus yang memiliki besar dan arahnya konstan, maka pada rangkaian tertutup tersebut harus diberikan energi listrik. Sumber energi listrik yang biasa disebut gaya gerak listrik (ggl) dengan simbol ε , sebagai contoh batere, sel surya, dan termokopel. Sumber energi listrik tersebut dapat “memompa” muatan sehingga muatan negatif bergerak dari tempat dengan potensial listrik rendah ke tempat dengan potensial listrik yang lebih tinggi.

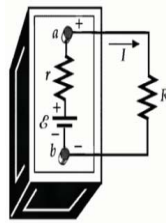
Adapun hubungan antara gaya gerak listrik dengan kerja, yaitu diperlukan kerja sebesar satu joule agar muatan sebesar satu coulomb dapat bergerak ke tempat yang memiliki potensial listrik lebih tinggi akibat ggl sebesar satu volt. Suatu batere adalah merupakan generator atau sumber energi listrik yang memiliki gaya gerak listrik (ggl) sebesar ε volt.

Gaya gerak listrik suatu batere bernilai sama dengan beda potensial listrik di antara kedua ujung batere apabila tidak ada arus yang mengalir. Apabila ada arus yang mengalir, beda potensial menjadi lebih kecil dari pada ggl ε tersebut karena adanya resistansi dalam r pada batere. Bila arus sebesar I mengalir pada resistansi dalam batere r maka turunnya potensial di dalam sumber adalah rI . Jadi, bila tegangan pada kedua ujung batere adalah V sedangkan tegangan pada ggl batere adalah ε maka berlaku

$$V = \varepsilon - rI$$

Tegangan pada kedua ujung batere sama dengan tegangan ggl batere ε dikurangi tegangan akibat resistansi dalam rI . Sehingga apabila sebuah batere dengan ggl ε dan memiliki resistansi dalam r dihubungkan dengan resistor luar R maka arus yang mengalir adalah

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

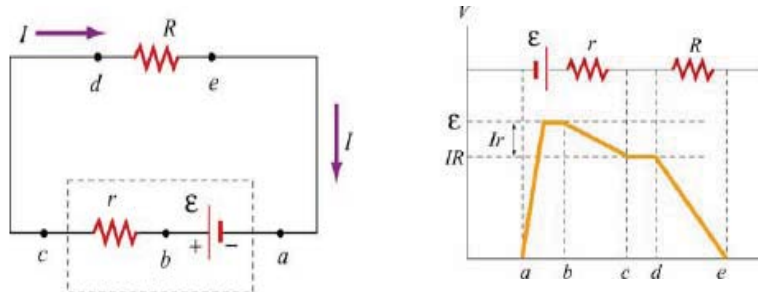


Gambar 10.8 Gambaran komponen suatu batere dalam kaitannya dengan resistansi internal dan resistansi luar R .

Bila tegangan antara kedua ujung batere dengan ggl sebesar ε adalah $V_a - V_b$ yang dihubungkan dengan resistor luar R seperti pada gambar

$$V_a - V_b = IR = \varepsilon - rI$$

Adapun grafik tegangan untuk komponen komponen dalam rangkaian tersebut ditunjukkan Gambar 10.9.



Gambar 10.9 Nilai tegangan di antara komponen batere dalam kaitannya dengan resistansi internal dan resistansi luar R .

Kegiatan:

Untuk lebih memahami penerapan hukum Ohm, cobalah gunakan internet dan kunjungi situs berikut.

<http://www.sciencejoywagon.com/physicszone/otherpub/wfendt/ohmslaw.htm>

Di situs ini Anda dapat melakukan perubahan nilai terhadap salah satu besaran beda potensial V , resistansi R atau nilai arus I . Amati perubahannya. Ulangilah untuk besaran yang berbeda. Untuk dapat menjalankan program tersebut komputer yang digunakan harus tersambung internet dan sudah diinstal program Java (java.sun.com) terlebih dahulu.

Contoh Soal 10.3.

Suatu resistor 11Ω dihubungkan dengan batere $6 V$ yang memiliki resistansi dalam $r = 1 \Omega$. Tentukan:

- Arus pada rangkaian,
- tegangan pada kedua ujung batere
- daya yang diberikan oleh sumber ggl
- daya yang digunakan untuk resistor luar R
- daya yang hilang akibat adanya resistansi dalam
- jumlah energi batere, bila batere memiliki kemampuan 150 Ampere-jam,

Penyelesaian:

- a. Arus yang mengalir pada rangkaian adalah

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R} = \frac{6 V}{(1 + 11)\Omega} = 0,5 A$$

- b. Gunakan nilai arus tersebut untuk menghitung tegangan pada kedua ujung batere

$$V_a - V_b = IR = \varepsilon - rI = 6 V - (1 \Omega)(0,5 A) = 5,5 V$$

- c. Daya yang diberikan oleh sumber ggl adalah

$$P = I\varepsilon = (0,5 A)(6 V) = 3 VA = 3 \frac{J}{s} = 3 W$$

- d. Daya yang digunakan untuk resistor luar R adalah

$$P = RI^2 = (11 \Omega)(0,5 A)^2 = 2,75 W$$

- e. Daya yang hilang akibat adanya resistansi dalam adalah

$$P = rI^2 = (1 \Omega)(0,5 A)^2 = 0,25 W$$

- f. Jumlah energi yang tersimpan dalam batere adalah

$$W = q\varepsilon = (150 \text{ Amp.jam}) \left(\frac{360 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Amp.jam}} \right) (6 \text{ V}) = 3,24 \text{ MJ}$$

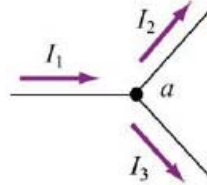
10.4. Hukum Kirchhoff

Dalam melakukan analisis rangkaian terdapat dua hukum dasar, yaitu hukum kesatu Kirchhoff dan hukum kedua Kirchhoff.

10.4.1 Hukum Kesatu Kirchhoff

Biasa juga dikenal sebagai hukum titik cabang, yang artinya jumlah arus yang masuk suatu titik cabang sama dengan jumlah arus yang keluar titik cabang tersebut. Pengertian ini sama dengan kalau dikatakan bahwa jumlah muatan adalah tetap, tidak ada penambahan ataupun pengurangan muatan selama muatan melewati titik cabang, seperti pada Gambar 10.10.

$$\sum I_{\text{masuk A}} = \sum I_{\text{keluar A}}$$



Gambar 10.10 Pada setiap titik cabang berlaku jumlah arus masuk sama dengan jumlah arus keluar.

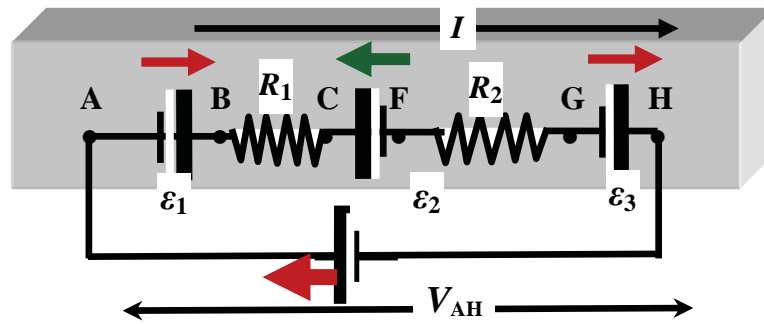
sehingga di titik cabang A berlaku

$$I_1 = I_2 + I_3$$

10.4.2 Hukum Kedua Kirchhoff

Secara matematis, hukum kedua Kirchhoff menyatakan bahwa jumlah beda potensial di antara kedua ujung setiap elemen dalam rangkaian tertutup adalah nol.

Penerapan hukum kekekalan energi pada rangkaian arus listrik diberikan oleh hukum kedua Kirchhoff. Tinjaulah rangkaian listrik seperti pada Gambar 10.11 yang terdiri atas: Tiga batere ε_1 , ε_2 dan ε_3 disusun seri dengan dua resistor R_1 dan R_2 , kemudian dihubungkan dengan batere luar V_{AB} . Perhatikan arah batere seperti arah anak panah.



Gambar 10.11 Tiga batere ε_1 , ε_2 dan ε_3 disusun seri dengan dua resistor R_1 dan R_2 , kemudian dihubungkan dengan batere luar V_{AH} . Perhatikan arah batere seperti arah anak panah.

Dari rumusan daya pada resistor R yang dilalui arus I adalah I^2R dan daya pada batere ε adalah $I\varepsilon$. maka daya listrik pada keseluruhan rangkaian tersebut adalah memenuhi hukum kekekalan energi (daya). Bahwa daya yang diberikan batere luar V_{AH} sama dengan daya yang dipergunakan pada setiap elemen di dalam rangkaian $A-B-C-F-G-H$

$$IV_{AH} = I(V_{AB} + V_{BC} + V_{CF} + V_{FG} + V_{GH})$$

$$IV_{AH} = -I\varepsilon_1 + I^2R_1 + I\varepsilon_2 + I^2R_2 - I\varepsilon_3$$

$$IV_{AH} = I^2R_1 + I^2R_2 - I\varepsilon_1 + I\varepsilon_2 - I\varepsilon_3$$

$$V_{AH} = IR_1 + IR_2 - (+\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

Perjanjian yang berlaku untuk arus dan tegangan adalah sebagai berikut


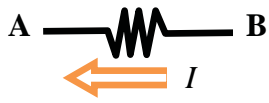


- V_{AH} = bertanda positif, karena arah ggl pada V_{AH} adalah searah dengan arah penelusuran, maka $V_{AH} = IR - \sum \varepsilon = 0 - (-V_{AH})$
- ε_1 = bertanda positif, karena arah batere ε_1 adalah searah dengan arah penelusuran demikian juga ε_3 .
- ε_2 = bertanda negatif, karena arah batere ε_2 adalah berlawanan arah dengan arah penelusuran.

Jadi secara umum, hukum kedua Kirchhoff dapat ditulis

$$V_{ab} = \sum_{s=1}^N I_s R_s - \sum_{s=1}^M \varepsilon_s$$

bila di antara titik A dan B, terdapat N buah resistor, dan M buah batere untuk arah penelusuran dari A ke B dan perjanjian tanda bahwa arus atau tegangan bertanda positif bila arah I atau ε searah dengan arah penelusuran. Sebaliknya I atau ε akan bertanda negatif bila arah I atau ε adalah berlawanan dengan arah penelusuran.

Tabel 10.2 Hubungan antara arah penelusuran, arah batere, arah arus dengan pemakaian tanda plus atau minus.

Perjanjian Tanda untuk Arus I	
Arah Penelusuran A ke B	Arah Penelusuran A ke B
Arah arus A ke B	Arah arus A ke B
$V_{ab} = V_a - V_b = + IR$	$V_{ab} = V_a - V_b = - IR$
	
Arus bertanda positif karena searah dengan arah penelusuran.	Arus bertanda negatif karena berlawanan dengan arah penelusuran.
Perjanjian Tanda untuk Batere ϵ	
Arah Penelusuran A ke B	Arah Penelusuran A ke B
Arah tegangan A ke B	Arah tegangan B ke A
$V_{ab} = V_a - V_b = + \epsilon$	$V_{ab} = V_a - V_b = - \epsilon$
	
Batere ϵ bertanda positif karena searah dengan arah penelusuran.	Batere ϵ bertanda negatif karena berlawanan dengan arah penelusuran.

Tampak bila arus atau tegangan melawan arah penelusuran, maka beda tegangan di antara kedua ujung adalah negatif. Dan sebaliknya, bila arus maupun tegangan searah dengan arah penelusuran maka nilai beda tegangan di antara kedua ujung adalah positif.

Selanjutnya kita tinjau pemakaian hukum pertama dan kedua Kirrhoff untuk menghitung besar arus pada suatu cabang dan beda tegangan atau beda potensial di antara dua titik pada rangkaian listrik.

10.5. Sambungan Resistor

Dalam rangkaian sederhana yang dicirikan dengan adanya sambungan dari beberapa komponen sejenis, sering kali menjadi lebih mudah bila dilakukan penggabungan terhadap komponen sejenis tersebut. Hal ini berlaku pula untuk resistor. Terdapat dua tipe sambungan resistor, yaitu sambungan seri dan sambungan paralel.

Dalam menganalisis rangkaian listrik sederhana hal hal yang perlu dilakukan adalah

- Kelompokkan resistor-resistor yang tersambung secara seri dan paralel.
- Lakukan penyederhanaan rangkaian dengan mengganti kelompok resistor tersebut dengan resistor pengganti atau resistansi ekuivalennya.
- Bila masih terdapat beberapa resistor dalam satu cabang upayakan agar tergantikan dengan satu resistor pengganti. Ulangi langkah tersebut sampai hanya ada resistor pengganti dalam setiap cabang.

10.6. Sambungan Seri

Tinjau rangkaian dua resistor yang disambung secara seri kemudian dihubungkan dengan batere dengan ggl sebesar ϵ yang resistansi dalamnya dapat diabaikan seperti pada Gambar 10.12.



Gambar 10.12 (a) Gambaran secara sederhana dua resistor R_1 dan R_2 disambungkan seri dan dilalui arus I . (b) Resistansi ekuivalen atau resistansi pengganti menyatakan semua arus dalam rangkaian seri adalah sama.

Sesuai dengan hukum Ohm $V = IR$ maka berlaku

$$V_{ac} = V_{ab} + V_{bc}$$

Arus yang melalui R_1 dan R_2 sama besar, karena jumlah muatan yang melewati suatu alur tertentu haruslah besarnya konstan.

$$V_{ac} = IR_{ab} + IR_{bc} = I(R_{ab} + R_{bc}) = IR_{\text{seri}}$$

$$R_{ac} = R_{ab} + R_{bc}$$

atau bila dalam rangkaian terdapat dua resistor R_1 dan R_2 yang disamping seri maka resistansi ekuivalen atau resistansi total adalah

$$R_{\text{seri}} = R_1 + R_2$$

Kegiatan:

Rangkailah sebuah bohlam lampu senter dengan batere dan amatilah terang dari nyala lampu tersebut. Ulangi lagi hal tersebut dengan menggunakan dua bohlam lampu yang diserikan, bandingkan terangnya nyala kedua lampu ini dengan apabila hanya satu lampu. Mengapa hal ini terjadi, diskusikanlah dengan temanmu.

Latihan:

Suatu batere sebagai sumber arus searah yang memiliki ggl $\varepsilon = 3$ volt dengan resistansi dalam $r = 0,48 \Omega$ yang kemudian dihubungkan seri dengan bohlam lampu senter dengan karakteristik 250 mW apabila dikenai tegangan 3 volt.. Tentukan resistansi bohlam lampu senter tersebut.

[Gunakan hukum Ohm $V = IR$ sehingga daya $P = IV = \frac{V^2}{R}$]

10.7. Sambungan Paralel

Tinjau dua resistor yang dihubungkan sejajar kemudian dihubungkan dengan batere yang memiliki beda potensial di antara kedua ujung adalah ΔV . Misalkan arus searah yang keluar dari kutub positif batere adalah I menuju ke R_1 dan R_2 lewat titik A yang kemudian bertemu kembali di titik B yang besar arus masing masing secara berturut-turut adalah I_1 dan I_2 seperti pada Gambar 10.13 (a).

Dengan prinsip jumlah muatan yang masuk harus sama dengan yang keluar di A ataupun B, sehingga kedua resistor dapat digabung seperti

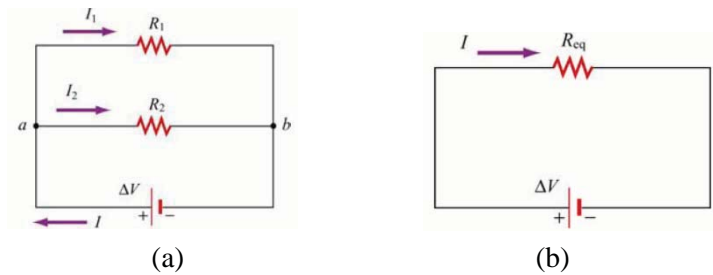
Gambar 10.13 (b) $I = I_1 + I_2$

Berlaku hukum Ohm pada tiap cabang

$$\frac{\Delta V}{R_{\text{par}}} = \frac{\Delta V_1}{R_1} + \frac{\Delta V_2}{R_2}$$

karena $\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2$

$$\frac{1}{R_{\text{par}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



Gambar 10.13 (a) Gambaran sederhana dua resistor R_1 dan R_2 disambungkan paralel dan arus I dari baterai ε , terpecah menjadi I_1 dan I_2 . (b) Resistansi ekuivalen atau pengganti pada sambungan paralel menyatakan bahwa semua sambungan paralel memiliki beda potensial yang sama.

sehingga jika terdapat N resistor yang disambungkan paralel maka resistansi ekuivalennya adalah:

$$\frac{1}{R_{\text{par}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{s=1}^N \frac{1}{R_s}$$

Kegiatan:

Rangkailah sebuah bohlam lampu senter dengan baterai dan amatilah terang dari nyala lampu tersebut. Ulangi lagi hal tersebut dengan menggunakan dua bohlam lampu yang diparalel, bandingkan terang nyala kedua lampu ini dengan apabila hanya satu lampu. Mengapa hal ini terjadi, diskusikanlah dengan temanmu.

Latihan:

Suatu baterai sebagai sumber arus searah yang memiliki ggl $\varepsilon = 3$ volt dengan resistansi dalam $r = 0,48 \Omega$ yang kemudian dihubungkan seri dengan empat bohlam lampu senter yang disambung paralel dengan karakteristik 250 mW apabila dikenai tegangan 3 volt. Tentukan resistansi bohlam lampu senter tersebut. [Gunakan hukum Ohm $V = IR$ dan

$$\frac{1}{R_{\text{par}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \text{ sehingga daya } P = IV = \frac{V^2}{R_{\text{par}}}]$$

Berikut adalah contoh berbagai bentuk resistor .

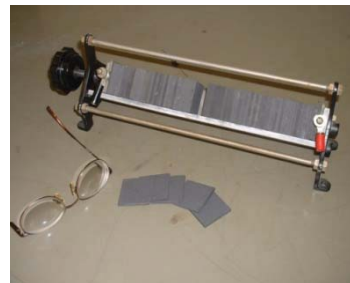
Gambar 10.14 Berbagai bentuk dan ukuran resistor, sesuai keperluan, kebanyakan rangkaian elektronika menggunakan resistor karbon. Berbentuk silindris kecil terbuat dari karbon, dan kedua kakinya keluar dari kedua ujung resistor. Biasanya nilai resistansi ditampakkan sebagai urutan warna cat.



Gambar 10.15 Suatu resistor daya, biasanya berbentuk lebih panjang terbuat kawat tebal yang digulung pada tabung keramik agar dapat melewati arus yang besar tanpa melelehkan resistor. Arus yang besar tentu menghasilkan panas yang besar pula.



Gambar 10.16 Resistor pelat karbon merupakan resistor daya yang dibuat khusus untuk mampu melewatkan arus yang besar karena terdiri atas pelat karbon yang disusun berderet. Bila susunan rapat maka lebih banyak titik kontak di antara pelat karbon. Jadi panjang resistor ini konstan, tetapi luas permukaan kontak yang dapat diubah-ubah sesuai yang dibutuhkan.



Gambar 10.17 Resistor pelat karbon yang terhubung dengan penguat suara. Resistor ini berfungsi mengatur



kuat lemahnya suara dari penguat suara.

Gambar 10.18 Resistor gulungan kawat yang disebut rheostats, terbuat dari kawat panjang digulung membentuk *loop*. Nilai resistansi bergantung pada rumusan

$$\text{Resistansi} = \frac{(\text{Resistivitas})(\text{Panjang})}{\text{Luas}}$$



Tampak ada yang berbentuk mirip donat, misalkan untuk pengatur volume radio analog (non digital).

Kegiatan:

Carilah baterai yang dapat diisi ulang. Misalkan baterai yang diperoleh adalah baterai 1,2 V seperti gambar berikut dan pada baterai terdapat petunjuk 1800 miliAmpere-jam (mAh). Carilah penjelasan cara kerja baterai tersebut. Kemudian diskusikan hal itu dengan kawan-kawanmu. Selanjutnya tentukan energi maksimum yang dapat disimpan dalam baterai tersebut.

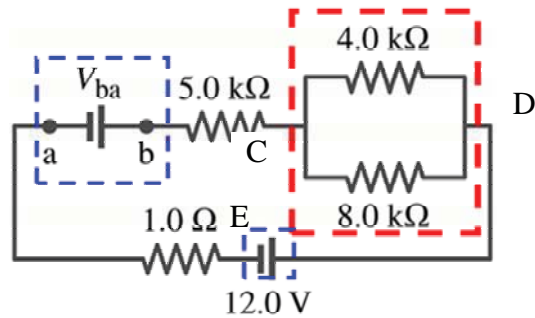


Penjelasan:

Ampere-jam adalah satuan untuk besar muatan yang dapat disimpan dalam baterai.

Contoh Soal 10.4.

Arus mengalir melalui resistor $4 \text{ k}\Omega$ adalah 3.50 mA . Berapakah tegangan di antara kedua ujungnya (V_{ba}) ?



Penyelesaian:

- a. Lakukan pengelompokan komponen, seperti pada gambar. Dua resistor paralel di antara titik CD diganti dengan nilai penggantinya, yaitu

$$\frac{1}{R_{cd}} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$$

- b. Karena arus mengalir melalui resistor 4 kΩ adalah 3.50 mA, sehingga beda potensial di antara titik *cd* adalah

$$V_{CD} = I_{CD} R_{CD} = I_{4k\Omega} R_{4k\Omega} = (3,5 \times 10^{-3} \text{ A})(4 \times 10^3 \Omega) = 14 \text{ volt}$$

Karena paralel maka berlaku

$$V_{CD} = V_{4k\Omega} = V_{8k\Omega}$$

$$V_{CD} = I_{8k\Omega} R_{8k\Omega} = 14 \text{ volt} = I_{8k\Omega} (8 \times 10^3 \Omega) = 14 \text{ volt}$$

$$I_{8k\Omega} = \frac{14 \text{ volt}}{(8 \times 10^3 \Omega)} = 1,75 \text{ mA}$$

$$I = I_{tot} = I_{4k\Omega} + I_{8k\Omega} = 3,5 \text{ mA} + 1,75 \text{ mA} = 5,25 \text{ mA}$$

untuk *I* adalah arus pada rangkaian untuk *loop* tertutup *abcda*.

- c. Gunakan hukum kedua Kirchhoff pada *loop* tertutup yang intinya adalah jumlah beda potensial dalam rangkaian tertutup harus nol.

$$V_{abcdea} = \sum I_s R_s - \sum \epsilon_s$$

$$I(R_{bc} + R_{cd} + R_{ea}) - (-12 + V_{ba}) = 0$$

$$I(5 + 2,67 + 1) \times 10^3 \Omega = (-12 + V_{ba})$$

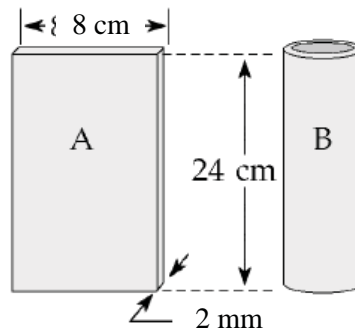
$$(5,25 \times 10^{-3} \text{ A})(8,67 \times 10^3 \Omega) = (-12 + V_{ba})$$

$$45,5 = (-12 + V_{ab})$$

$$V_{BA} = \boxed{57,5 \text{ volt}}$$

Contoh Soal 10.5.

- a. Keping tembaga (resistivitas $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) memiliki rapat masa $8,92 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ dengan ketebalan 2 mm dan ukuran permukaan 8 cm \times 24 cm. Jika kedua tepi panjang tersebut digulung hingga membentuk seperti tabung yang panjangnya 24 cm, seperti tampak dalam gambar berikut. Berapakah resistansi di antara kedua ujung.



- b. Berapakah massa tembaga yang diperlukan untuk menghasilkan gulungan kabel tembaga dengan resistansi total 4,5 Ω .

Penyelesaian:

- a. Apabila bagian tepi panjangnya keping tembaga (A) digabungkan sepanjang 24 cm sehingga membentuk silinder berrongga (B) dengan keliling sepanjang 8 cm panjang 24 cm dan tebalnya 2 mm. Luas penampang lintang adalah sama dengan luas bagian atas silinder, yaitu $A = (2 \times 10^{-3} \text{ m})(8 \times 10^{-2} \text{ m}) = 1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Resistivitas tembaga adalah $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, sehingga resistansi di antara kedua ujung silinder berrongga adalah

$$R = \frac{\rho L}{A} = (1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \left(\frac{24 \times 10^{-2} \text{ m}}{1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right) = 2,6 \times 10^{-5} \Omega$$

- b. Suatu kabel tembaga silinder padat yang panjang 1500 m memiliki resistansi 4,5 Ω . Volume tembaga yang diperlukan adalah

$$Vol = AL$$

gunakan

$$A = \frac{Vol}{L}$$

untuk

$$Vol = \frac{\text{massa}}{\text{rapat massa}} = \frac{m}{8,92 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L^2}{Vol}$$

$$m = \rho L^2 \left(\frac{\text{rapat massa}}{R} \right)$$

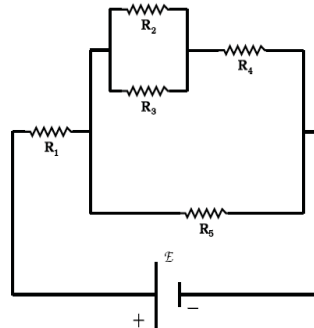
$$= (1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{m})(1500 \text{ m})^2 \left(\frac{8,92 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{4,5 \Omega} \right) = 76 \text{ kg}$$

adalah massa tembaga yang diperlukan untuk membuat kabel tembaga dengan spesifikasi resistansi total 4,5 Ω .

Contoh Soal 10.6.

Diketahui lima buah resistor dirangkai seperti gambar, untuk $R_1 = 3 \Omega$; $R_2 = 10 \Omega$; $R_3 = 5 \Omega$; $R_4 = 4 \Omega$; dan $R_5 = 3 \Omega$;

- tentukan resistansi ekuivalen (resistansi pengganti)
- tentukan gaya gerak listrik (ggl) batere bila daya listrik total pada rangkaian adalah 400 W.



Penyelesaian:

Hasil Paralel R_2 dan R_3 memberikan

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{10} + \frac{1}{5} = \frac{3}{10}$$

Serikan R_{23} dengan R_4 menghasilkan

$$R_{234} = R_{23} + R_4 = \frac{10}{3} + 4 = \frac{22}{3} = 7,33 \Omega$$

Paralelkan R_{234} dengan R_5 didapat

$$\frac{1}{R_{2345}} = \frac{1}{R_{234}} + \frac{1}{R_5}$$

$$\frac{1}{R_{2345}} = \frac{3}{22} + \frac{1}{3} = \frac{9 + 22}{66} = \frac{31}{66}$$

$$R_{2345} = \frac{66}{31} \Omega$$

Akhirnya serikan R_{2345} dengan R_1 sehingga diperoleh

$$R_{\text{total}} = R_{2345} + R_1 = \left(\frac{66}{31} + 3\right) \Omega = \left(\frac{66 + 93}{31}\right) \Omega = \frac{159}{31} \Omega = \boxed{5,13 \Omega}$$

Daya total pada rangkaian adalah

$$P = I \times V = I \times \varepsilon = I^2 \times R_{\text{total}} = 400 \text{ W}$$

untuk ε adalah gaya gerak listrik (ggl) batere, dan gunakan hukum Ohm sehingga

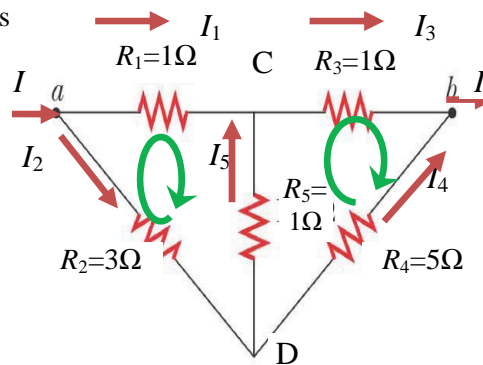
$$I = \frac{V}{R} = \frac{\varepsilon}{R}$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R_{\text{total}}}} = \sqrt{\frac{400 \text{ W}}{5,13 \Omega}} = 8,83 \text{ A}$$

$$\varepsilon = I \times R_{\text{total}} = (8,83 \text{ A})(5,13 \Omega) = 45,3 \text{ V}$$

Contoh Soal 10.7.

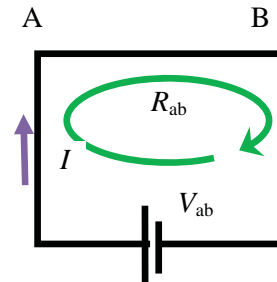
Tinjau rangkaian ter-diri atas lima resistor yang disambung se-perti pada gambar disamping. Diketahui $R_1 = R_3 = R_5 = 1 \Omega$



Ω ; $R_2 = 3\Omega$; dan $R_4 = 5\Omega$.
Tentukan resistansi total
rangkain (R_{ab}).

Penyelesaian:

Misal resistansi total R_{ab} dan terhubung dengan batere ϵ , maka dapat digambarkan seperti gambar disamping.



Gunakan metode arus cabang. Buat arus cabang I_1, I_2, I_3, I_4 dan I_5 .

Pada titik (A) berlaku

$$I = I_1 + I_2 \quad (1)$$

Pada titik (B) berlaku

$$I = I_3 + I_4 \quad (2)$$

Pada titik (C) berlaku

$$I_3 = I_1 + I_5 \quad (3)$$

Pada titik (D) berlaku

$$I_2 = I_4 + I_5 \quad (4)$$

Buat dua buah *loop* dengan arah searah jarum jam, yaitu *loop* kiri (1) *acda* dan *loop* kanan (2) *cbdc*. Gunakan hukum kedua Kirchhoff untuk kedua *loop*, yaitu

$$\begin{aligned} \text{loop (1)} \quad V_{acda} &= \sum I_s R_s - \sum \epsilon_s \\ 0 &= I_1 R_1 - I_5 R_5 - I_2 R_2 \\ 0 &= I_1 - I_5 - 3I_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{loop (2)} \quad V_{cbdc} &= \sum I_s R_s - \sum \epsilon_s \\ 0 &= I_3 R_3 - I_4 R_4 + I_5 R_5 \\ 0 &= I_3 + I_5 - 5I_4 \end{aligned} \quad (6)$$

Substitusikan I_5 dari persamaan (3) ke (5) sehingga

$$\begin{aligned} 0 &= I_1 - (I_3 - I_1) - 3I_2 \\ I_1 &= 1,5 I_2 + 0,5 I_3 \end{aligned} \quad (5)$$

Gabungkan persamaan (1) dan (2) didapat

$$I_1 = -I_2 + I_3 + I_4 \quad (6)$$

Gabungkan persamaan (5) dan (6) didapat

$$\begin{aligned} 1,5 I_2 + 0,5 I_3 &= -I_2 + I_3 + I_4 \\ 0 &= -2,5 I_2 + 0,5 I_3 + I_4 \end{aligned} \quad (7)$$

Substitusikan I_5 dari persamaan (4) ke (6)

$$\begin{aligned} 0 &= I_3 + (I_2 - I_4) - 5I_4 \\ I_2 &= 6I_4 - I_3 \end{aligned} \quad (8)$$

Substitusikan I_5 dari persamaan (8) ke (7)

$$\begin{aligned} 0 &= -2,5(6I_4 - I_3) + 0,5I_3 + I_4 \\ 0 &= 14I_4 - 3I_3 \\ I_3 &= (14/3)I_4 \end{aligned} \quad (9)$$

Substitusikan I_3 dari persamaan (9) ke (8)

$$\begin{aligned} I_2 &= 6I_4 - (14/3)I_4 \\ I_2 &= (4/3)I_4 \end{aligned} \quad (10)$$

Substitusikan I_3 dari persamaan (9) ke (2)

$$I = (14/3)I_4 + I_4 = (17/3)I_4$$

karena $I = V/R$

maka

$$\frac{V}{R} = \frac{17}{3}I_4 \quad (11)$$

Dari hubungan seri dan substitusikan I_4 dari persamaan (10)

$$\begin{aligned} V &= V_{ab} = V_{ad} + V_{db} \\ &= I_2 R_2 + I_4 R_4 \\ &= 3I_2 + 5I_4 \\ &= 3(4/3)I_4 + 5I_4 = 9I_4 \end{aligned} \quad (12)$$

Dari (1) dan (12)

$$\frac{V}{R} = \frac{17}{3}I_4 = 9\frac{I_4}{R}$$

Jadi

$$R = \boxed{\frac{27}{17} \Omega}$$

Contoh Soal 10.8.

Tinjau rangkaian listrik yang terdiri atas dua batere $\varepsilon_1 = 12 \text{ V}$ dan $\varepsilon_2 = 5 \text{ V}$, serta tiga resistor, yaitu $R_1 = 4\Omega$; $R_2 = 2\Omega$ dan $R_3 = 3\Omega$. Hitunglah

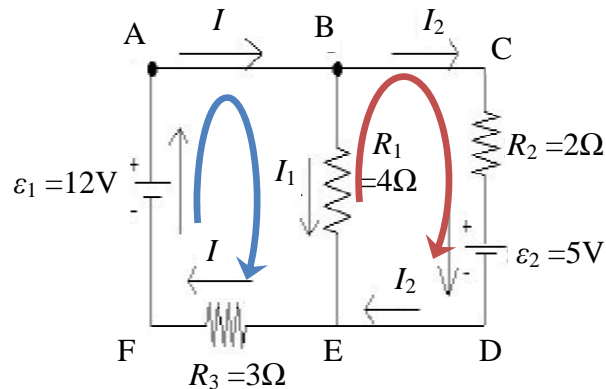
- Arus pada masing masing cabang, dengan menggunakan metode arus cabang.
- Beda potensial di antara be ; cd dan ef
- Lakukan penyelesaian yang sama menggunakan arus *loop*.

Penyelesaian:

- Dengan menggunakan hukum pertama Kirchhoff bahwa pada suatu titik cabang maka jumlah arus masuk sama dengan jumlah arus keluar sehingga di titik B berlaku $I = I_1 + I_2$

Selanjutnya gunakan hukum kedua Kirchhoff untuk *loop* kiri dan *loop* kanan. Gunakan arah *loop* dan arah penelusuran yang sama, yaitu searah jarum jam, sehingga

$$V_{fabef} = 0 = \sum IR - \sum \varepsilon$$



Tinjau *loop* kiri *fabef*: $+ I_1 R_1 + IR_3 - \varepsilon_1 = 0$

Tinjau *loop* kanan *cdebc*: $+ I_2 R_2 - I_1 R_1 - (-\varepsilon_2) = 0$

Substitusikan I dengan $I_1 + I_2$ maka persamaan pada B dan C dapat ditulis

$$+ 4 I_1 + 3(I_1 + I_2) - 12 = 0 \quad (1)$$

$$+ 2 I_2 - 4 I_1 + 5 = 0 \quad (2)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (3)$$

$$\text{persamaan (1) } \times 2 \quad + 8I_1 + 6(I_1 + I_2) - 24 = 0$$

$$\text{persamaan (2) } \times 3 \quad + 6I_2 - 12I_1 + 15 = 0$$

$$+ 26I_1 - 39 = 0$$

kurangkan kedua persamaan tersebut maka diperoleh $I_1 = 1,5\text{A}$;

substitusikan I_1 tersebut ke persamaan (2) didapat

$$+ 2 I_2 - 4 (1,5\text{A}) + 5 = 0$$

$$+ 2 I_2 = 1 \quad \text{atau} \quad I_2 = 0,5\text{A}.$$

Gunakan persamaan (3) $I = I_1 + I_2$ didapat $I = 1,5 + 0,5 = 2\text{ A}$

$$V_{be} = I_1 R_1 = (1,5\text{A}) \times (4\ \Omega) = 6\ \text{V};$$

Untuk menghitung V_{cd} gunakan hukum kedua Kirchhoff

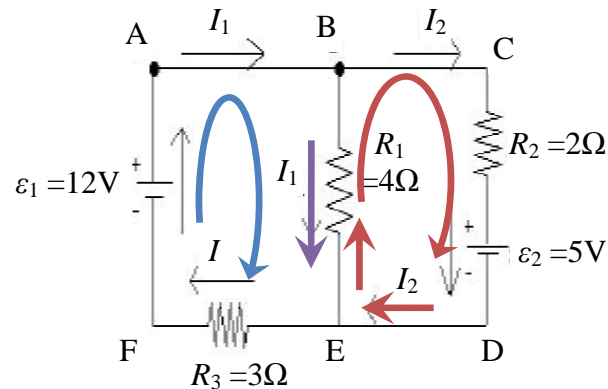
$$V_{cd} = \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s$$

$$V_{cd} = I_2 R_2 - (-\varepsilon_2) = (0,5\ \text{A})(2\ \Omega) + 5 = 6\ \text{V}$$

$$V_{ef} = IR_3 = (2\ \text{A}) \times (3\ \Omega) = 6\ \text{V}$$

Penyelesaian: Menggunakan Arus Loop

Buat loop 1 dan loop 2 sama dengan cara arus cabang. Namun, di sini hanya ada dua arus, yaitu arus loop 1 = I_1 dan arus loop 2 = I_2 . Pilih arah arus loop sama dengan arah penelusuran, yaitu searah jarum jam.



Perbedaan utama, yaitu untuk arus pada cabang be bukan lagi I_1 tetapi

$$I_{be} = I_1 - I_2$$

Hukum kedua Kirchhoff $V_{abef} = 0 = \sum IR - \sum \varepsilon$

$$\text{Loop 1: } abefa \quad + I_1 (R_1 + R_3) - I_2 R_1 - \varepsilon_1 = 0$$

$$\text{Loop 2: } cdebc \quad I_2 (R_1 + R_2) - I_1 R_1 - (-\varepsilon_2) = 0$$

Masukan nilai resistornya sehingga

$$\begin{aligned} + I_1 (R_1 + R_3) - I_2 R_1 - \varepsilon_1 &= 0 \\ + 7I_1 - 4I_2 - 12 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

dan

$$\begin{aligned} I_2 (R_1 + R_2) - I_1 R_1 - (-\varepsilon_2) &= 0 \\ 6I_2 - 4I_1 + 5 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Hilangkan I_2 dengan menambah Pers. (1)×3 dengan (1)×3

$$\begin{aligned} + 21I_1 - 12I_2 - 36 &= 0 && (1) \times 3 \\ \underline{12I_2 - 8I_1 + 10} &= 0 && (2) \times 2 \\ \hline 13I_1 &= 26 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\text{Jadi } I_1 = \boxed{2 \text{ A}}$$

Substitusikan I_1 ke (1)

$$\begin{aligned} + 7I_1 - 4I_2 - 12 &= 0 \\ 14 - 4I_2 - 12 &= 0 \end{aligned}$$

Jadi $I_2 = \boxed{0,5 \text{ A}}$

Arus pada cabang *be* adalah

$$I_{BE} = I_1 - I_2 = (2 - 0,5) \text{ A} = 1,5 \text{ A}$$

Untuk menentukan beda potensial antara dua titik gunakan hukum kedua

$$\text{Kirchhoff } V_{BE} = \sum I R - \sum \varepsilon$$

$$V_{BE} = I_1 R_1 = (1,5 \text{ A}) \times (4 \Omega) = 6 \text{ volt}$$

$$V_{EF} = I_1 R_3 = (2 \text{ A}) \times (3 \Omega) = 6 \text{ volt}$$

Dengan ini pula terbukti bahwa

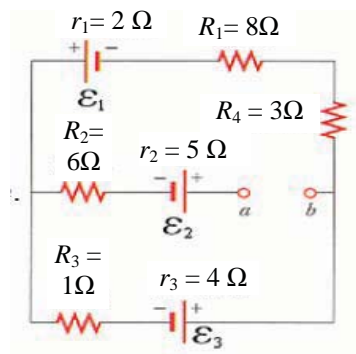
$$V_{AF} = V_{AB} + V_{BE} + V_{EF} = 0 + 6 \text{ volt} + 6 \text{ volt}$$

yaitu $V_{AF} = \varepsilon_1 = 12 \text{ volt}$.

Contoh Soal 10.9.

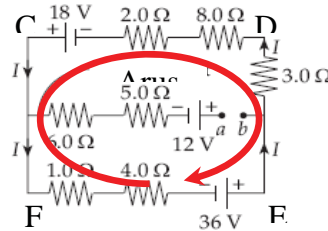
Rangkaian listrik terdiri atas tiga baterai $\varepsilon_1 = 18 \text{ V}$; $\varepsilon_2 = 12 \text{ V}$; $\varepsilon_3 = 36 \text{ V}$ yang masing masing memiliki hambatan dalam $r_1 = 2 \Omega$; $r_2 = 5 \Omega$; $r_3 = 4 \Omega$ yang selanjutnya dirangkai dengan empat resistor $R_1 = 8 \Omega$; $R_2 = 6 \Omega$; $R_3 = 1 \Omega$; $R_4 = 3 \Omega$. Hitunglah:

- Arus yang melewati R_1
- Arus yang melewati R_2
- Arus yang melewati R_3
- Beda potensial antara titik A dan B



Penyelesaian:

Rangkaian diatas dapat digambar ulang sebagai berikut. Resistansi internal baterai digambarkan di luar baterai. Buat *loop* dengan arah searah jarum jam seperti arah penelusuran Arus *loop* dimisalkan dalam arah kebalikan arah jarum jam.



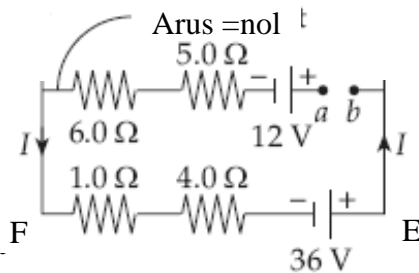
Karena cabang tengah dari rangkaian tersebut tidak kontinu maka tidak dilewati arus listrik. Gunakan hukum kedua Kirchhoff untuk *loop* rangkaian bagian luar. Ambil arah penelusuran adalah kebalikan arah jarum jam. Sehingga arus *I* bertanda positif, yaitu searah dengan arah penelusuran.

Sedangkan batere $\epsilon_1 = 18\text{V}$ dan $\epsilon_3 = 36\text{V}$ bertanda negatif karena berlawanan dengan arah penelusuran, yaitu kebalikan arah jarum jam.

$$\begin{aligned} V_{CDEFC} = V_C - V_C = 0 &= \sum I_s R_s - \sum \epsilon_s \\ I(1 + 4 + 3 + 8 + 2) - (-18 - 36) &= 0 \\ I = (54/18) \text{ A} &= 3\text{A} \end{aligned}$$

Jadi, arus yang melewati R_1 sama dengan arus yang melewati R_3 , yaitu 3A. Sedangkan arus yang melewati R_2 adalah nol karena rangkaian terputus di antara titik A dan B.

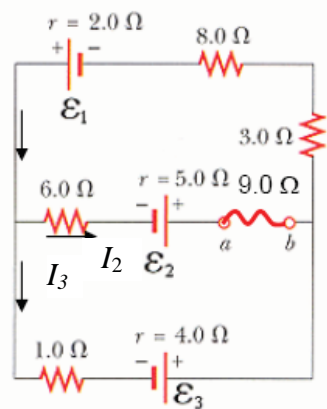
Selanjutnya lakukan penelusuran sesuai arah *afeb*, yaitu dari titik A ke arah kebalikan arah jarum jam melalui rangkaian bagian bawah menuju ke B. Gunakan hukum kedua Kirchhoff, yaitu



Bila antara titik A dan B diberikan resistansi sebesar $9\ \Omega$, tentukan arus pada setiap cabang dengan menggunakan metode arus cabang.

Penyelesaian:

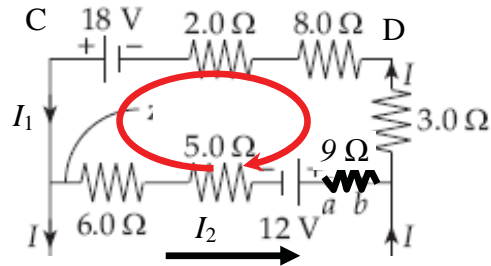
Gunakan hukum kedua Kirchhoff untuk kedua *loop*. Tinjau *loop* atas (*loop* 1), lakukan penelusuran dengan arah sejajar dari A kembali ke A, pilih arah arus pada *loop* 1 kebalikan arah jarum jam, seperti pada gambar.



Secara lebih mudah dapat digambar sebagai berikut

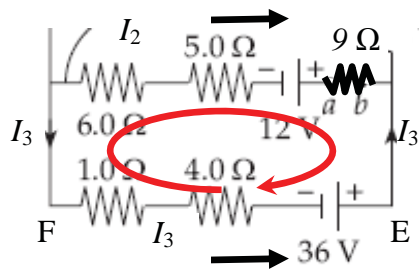
Yang memberikan persamaan

$$\begin{aligned}
 V_{ACDBA} = 0 &= \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s \\
 0 &= -I_1(2 + 8 + 3) - I_2(9 + 5 + 6) - (-\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \\
 I_1(2 + 8 + 3) + I_2(9 + 5 + 6) &= -(-18 - 12) \\
 13I_1 + 20I_2 &= 30
 \end{aligned} \tag{1}$$



Dengan cara yang sama dilakukan untuk *loop* bawah (kedua) memberikan persamaan

$$\begin{aligned}
 V_{ABEFA} = 0 &= \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s \\
 0 &= +I_2(9 + 5 + 6) - I_3(1 + 4) - (12 - 36) \\
 0 &= +20I_2 - 5I_3 + 24
 \end{aligned} \tag{2}$$



Hilangkan I_2 dengan mengurangkan $(1) \times 1$ dengan $(2) \times 1$

$$13I_1 + 20I_2 = 30 \tag{1}$$

$$+20I_2 - 5I_3 = -24 \quad -$$

$$+13I_1 + 5I_3 = 54 \tag{3}$$

Dari Hukum Kesatu Kirchhoff di titik cabang berlaku

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{4}$$

Substitusikan (4) ke Persamaan (3) sehingga

$$+13(I_2 + I_3) + 5I_3 = 54$$

$$+13I_2 + 18I_3 = 54 \tag{5}$$

Hilangkan I_3 dengan menambahkan (5)×5 dengan (3)×18

$$\begin{aligned} 65 I_2 + 90 I_3 &= 270 \\ \underline{360 I_2 - 90 I_3} &= \underline{-432} + \end{aligned}$$

Jadi $I_2 = -(162/425) \text{ A} = \boxed{-0,38 \text{ A}}$ (6)

Substitusikan (6) ke (1) didapat

$$\begin{aligned} 13 I_1 + 20 I_2 &= 30 \\ 13 I_1 + 20(-0,38 \text{ A}) &= 30 \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{20(0,38 \text{ A}) + 30}{13} = \boxed{2,89 \text{ A}} \quad (7)$$

Jadi $I_1 = 2,89 \text{ A}$

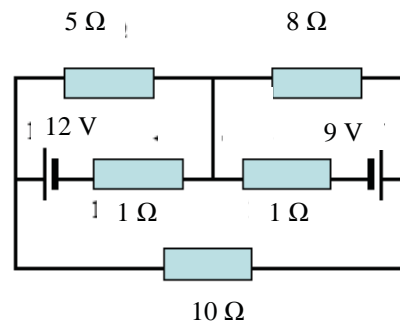
Substitusikan (7) ke (3) didapat

$$\begin{aligned} +13 I_1 + 5 I_3 &= 54 \\ +13(2,89 \text{ A}) + 5 I_3 &= 54 \end{aligned}$$

$$I_3 = \frac{54 - 13(2,89 \text{ A})}{5} = \boxed{3,28 \text{ A}}$$

Contoh Soal 10.10.

Rangkaian arus searah terdiri atas dua batere $\varepsilon_1 = 12\text{V}$; $\varepsilon_2 = 9\text{V}$ dan lima resistor yang dirangkai seperti pada gambar. Tentukan besar arus pada cabang, yaitu I_1 , I_2 dan I_3 .



Penyelesaian:

Buat tiga *loop* dengan arah searah jarum jam, seperti pada gambar.

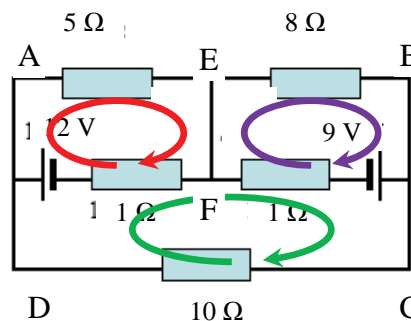
Gunakan hukum kedua Kirchhoff untuk masing masing *loop*.

Untuk *loop* 1, sehingga didapat

$$\begin{aligned} V_{\text{aefa}} = 0 &= \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s \\ 6I_1 - I_3 &= 12 \quad (1) \end{aligned}$$

Untuk *loop* kedua

$$\begin{aligned} V_{\text{ebfe}} = 0 &= \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s \\ (8 + 1)I_2 - I_3 &= -9 \end{aligned}$$



$$9I_2 - I_3 = -9 \quad (2)$$

Untuk *loop* ketiga

$$\begin{aligned} V_{\text{fcdf}} = 0 &= \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s \\ (1 + 1 + 10)I_3 - I_1 - I_2 &= 9 - 12 \\ 12I_3 - I_1 - I_2 &= -3 \end{aligned} \quad (3)$$

Langkah berikutnya adalah menghilangkan I_3 dengan cara mengurangkan persamaan (1) dengan persamaan (2)

$$6I_1 - I_3 = 12 \quad (1)$$

$$\underline{9I_2 - I_3 = -9} \quad (2)$$

$$6I_1 - 9I_2 = 21$$

atau

$$2I_1 - 3I_2 = 7 \quad (4)$$

Hal yang sama dilakukan dengan cara mengurangkan persamaan (1) yang telah dikalikan dengan 12 terhadap persamaan (3)

$$72I_1 - 12I_3 = 144 \quad (1) \times 12$$

$$\underline{12I_3 - I_1 - I_2 = -3} \quad + \quad (3)$$

$$71I_1 - I_2 = 141$$

atau

$$I_2 = 71I_1 - 141 \quad (5)$$

Selanjutnya, substitusikan I_2 dari persamaan (5) ke (4) didapat

$$2I_1 - 3I_2 = 7 \quad (4)$$

$$2I_1 - 3(71I_1 - 141) = 7$$

$$2I_1 - 213I_1 = -416$$

Jadi $I_a = I_1 = 416/211 \text{ A} = \boxed{1,97 \text{ A}}$

adalah arus yang lewat titik A. Substitusikan I_1 ke (3) didapat

$$I_2 = 71I_1 - 141$$

$$I_2 = 71(416/211 \text{ A}) - 141 \text{ A} =$$

Jadi $I_b = I_2 = \boxed{-1,02 \text{ A}}$

Tanda (-) menyatakan bahwa arah I_b adalah kebalikan arah jarum jam.

Arus I_3 didapat dengan substitusikan I_1 ke (1) sehingga

$$6I_1 - I_3 = 12$$

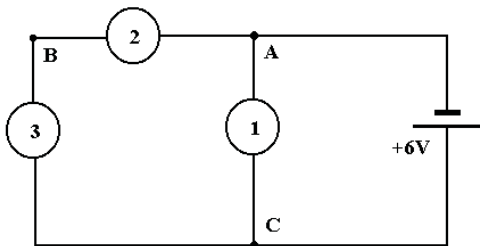
$$6(416/211 \text{ A}) - I_3 = 12$$

Jadi $I_c = I_3 = \boxed{-0,17 \text{ A}}$

Tanda (-) menyatakan bahwa arah I_c adalah kebalikan arah jarum jam.

Contoh Soal 10.11.

Tiga buah lampu bohlam masing masing dengan resistansi $R = 15 \Omega$.
dihubungkan sebuah batere $\varepsilon = 6 \text{ V}$.



- Tentukan resistansi ekivalen (hambatan pengganti) untuk ketiga lampu bohlam.
- Tentukan arus dari batere
- Bila kecerahan lampu sebanding dengan daya pada resistor, yaitu IR^2 , jelaskan lampu bohlam mana yang paling terang nyalanya

Penyelesaian:

Serikan resistor R_2 dan R_3 , didapat

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 30 \Omega$$

Kemudian hasil gabungan tersebut paralelkan dengan R_1 , yaitu

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_1} = \frac{1}{30} + \frac{1}{15} = \frac{1}{10}$$

Jadi nilai resistansi ekivalen (hambatan pengganti) ketiga lampu bohlam tersebut adalah 10Ω .

Arus daya batere adalah

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{tot}} = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ A}$$

Gunakan prinsip dasar bahwa pada sambungan paralel maka nilai tegangannya adalah sama besar, gabungkan dengan hukum Ohm $V = IR$. Untuk kasus ini, berlaku tegangan paralel

$$V_1 = V_{23} = \varepsilon = 6 \text{ V}$$

$$I_1 \times R_1 = I_{23} \times R_{23} = 6 \text{ V}$$

sehingga

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{6}{15} = 0,4 \text{ A}$$

$$I_{23} = \frac{V_{23}}{R_{23}} = \frac{\varepsilon}{R_{23}} = \frac{6}{30} = 0,2 \text{ V}$$

Terlihat bahwa besarnya I_1 dua kali lebih besar dibandingkan dengan I_{23} .

Karena terangnya sebuah lampu bergantung pada daya $P = RI^2$

Sehingga daya lampu dengan resistor R_1 adalah

$$P_1 = (I_1)^2 \times R_1 = (0,4)^2 15 = 2,4 \text{ J}$$

daya lampu dengan resistor R_2 adalah

$$P_2 = (I_{23})^2 \times R_2 = (0,2)^2 15 = 0,6 \text{ J}$$

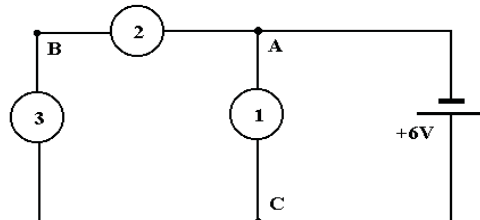
daya lampu dengan resistor R_3 adalah

$$P_3 = (I_{23})^2 \times R_3 = (0,2)^2 15 = 0,6 \text{ J}$$

Jadi cabang rangkaian yang memiliki resistansi kecil, yaitu dengan resistor R_1 yang dilalui arus yang dua kali lebih besar sehingga memiliki nyala lampu empat kali lebih terang dibandingkan dengan terangnya lampu 2 ataupun lampu 3.

Kegiatan:

Rangkailah tiga lampu bohlam seperti gambar. Lakukanlah hal hal berikut kemudian amati dan diskusikanlah dengan kawan kawanmu.



- Setelah ketiga lampu bohlam terpasang dan teramati terangnya. Copotlah lampu bohlam kedua. Catatlah apakah terang lampu bohlam 1 dan 3 berubah terhadap semula. Jelaskan.

- b. Hubungkan antara titik A dan B dengan kawat secara langsung, amati dan bandingkanlah terang lampu bohlam 1,2 dan 3. Catatlah apakah terang lampu bohlam 1,2 dan 3 berubah terhadap semula. Jelaskan.

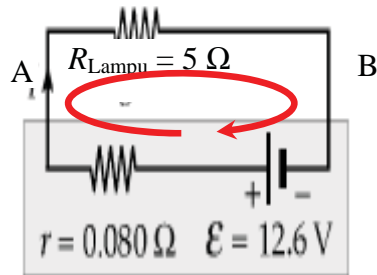
Contoh Soal 10.12.

Sebuah batere mobil dengan ggl $\varepsilon = 12,6 \text{ volt}$ memiliki resistansi dalam sebesar $0,08 \Omega$ digunakan menyalakan lampu depan yang memiliki resistansi total 5Ω (anggap konstan). Berapakah beda potensial di antara kedua ujung lampu bohlam depan.

- Apabila hanya dibebankan pada batere saja
- Apabila motor starter digunakan akan mengambil tambahan 35 A dari batere.

Penyelesaian:

- Apabila lampu depan hanya dibebankan pada batere, seperti pada gambar. Gunakan hukum kedua Kirchhoff untuk *loop* tertutup $V_{\text{aba}} = \sum I_s R_s - \sum \varepsilon_s$, yaitu



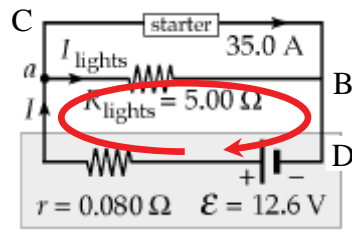
$$+Ir + IR_{\text{lampu}} - \varepsilon = 0$$

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R_{\text{lampu}}} = \frac{12,6}{0,08 + 5} = \boxed{2,48 \text{ A}}$$

Sehingga beda potensial pada kedua ujung lampu bohlam adalah

$$\Delta V_{\text{lampu}} = IR_{\text{lampu}} = (2,48\text{A})(5 \Omega) = \boxed{12,4 \text{ V}}$$

Apabila motor strter dinyalakan, rangkaian listrik yang terjadi adalah seperti pada gambar.



Gunakan hukum pertama Kirchoff bahwa jumlah arus yang masuk pada titik cabang harus sama dengan jumlah arus yang keluar, yaitu

$$I = I_{\text{lampu}} + I_{\text{starter}} = I_{\text{lampu}} + 35 \text{ A}$$

Selanjutnya gunakan hukum kedua Kirchoff untuk *loop* tertutup bagian bawah rangkaian

$$V_{ABA} = 0 = \sum IR - \sum \varepsilon$$

$$0 = +Ir + I_{\text{lampu}} R_{\text{lampu}} - \varepsilon$$

Gabungkan kedua persamaan di atas sehingga didapat

$$+(I_{\text{lampu}} + 35 \text{ A})r + I_{\text{lampu}} R_{\text{lampu}} - \varepsilon = 0$$

atau

$$I_{\text{lampu}} = \frac{\varepsilon - (35 \text{ A})r}{r + R_{\text{lampu}}} = \frac{12,6 \text{ V} - (35 \text{ A})(0,08 \Omega)}{5 \Omega + 0,08 \Omega} = \boxed{1,93 \text{ A}}$$

Beda potensial di antara kedua ujung lampu bohlam mobil adalah

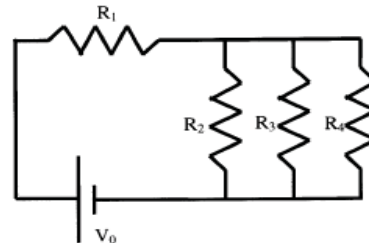
$$\Delta V_{\text{lampu}} = I_{\text{lampu}} R_{\text{lampu}} = (1,93 \text{ A})(5 \Omega) = \boxed{9,65 \text{ V}}$$

Contoh Soal 10.13.

Tiga buah resistor R_2 , R_3 dan R_4 dihubungkan secara paralel kemudian diserikan dengan satu resistor R_1 dan diserikan juga dengan batere $V_m = 12 \text{ V}$, seperti pada gambar berikut.

Diketahui $R_1 = R$; $R_2 = 2R$; $R_3 = 3R$ dan $R_4 = 6R$. Tentukan

- Resistansi ekivalen, nyatakan dalam R .
- Arus I_2 ; I_3 dan I_4 masing masing adalah arus yang



secara berturut-turut melewati R_2 ,
 R_3 dan R_4 , bila arus yang melewati
 R_1 adalah $I_1 = 6 \text{ A}$

Penyelesaian:

a. Resistansi ekuivalen untuk resistor yang diparalel adalah

$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{3R} + \frac{1}{6R} = \frac{6}{6R} = \frac{1}{R}$$

$$R_{234} = R$$

Resistansi total adalah

$$R_{tot} = R_1 + R_{234} = R + R = 2R$$

Arus total dalam rangkaian adalah

$$I_{tot} = \frac{V_{tot}}{R_{tot}} = \frac{12 \text{ volt}}{2R}$$

$$V_{tot} = V_{R_1} + V_{R_{234}} = 12 \text{ volt}$$

Karena arus yang lewat R_1 adalah 6 A, maka

$$V_{tot} = V_{R_1} + V_{R_{234}} = 12 \text{ volt}$$

$$12 = I_1 R_1 + I_{234} R_{234} = 6R + 6R$$

$$R = \boxed{1\Omega}$$

$$V_{234} = 12 - V_1 = 12 - 6 = 6 \text{ volt}$$

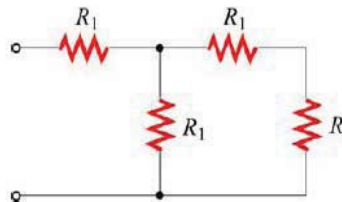
$$V_{234} = V_2 = V_3 = V_4 = 6 \text{ volt}$$

$$I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4 = 6 \text{ volt}$$

$$I_2 = \frac{6 \text{ volt}}{2\Omega} = \boxed{3 \text{ A}}; I_3 = \frac{6 \text{ volt}}{3\Omega} = \boxed{2 \text{ A}}; I_4 = \frac{6 \text{ volt}}{6\Omega} = \boxed{1 \text{ A}}$$

Contoh Soal 10.14.

Tinjau rangkaian empat buah resistor, seperti gambar berikut, tentukan nilai R_1 agar nilai total resistansi dalam rangkaian tersebut sama dengan R_0



$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_0 + R_1}$$

$$= \frac{R_0 + 2R_1}{R_1(R_0 + R_1)}$$

$$R' = \frac{R_1(R_0 + R_1)}{R_0 + 2R_1}$$

Kemudian serikan R' dengan R_1 sehingga didapat

$$\begin{aligned} R_{total} &= R_1 + R' = R_1 + \frac{R_1(R_0 + R_1)}{R_0 + 2R_1} \\ &= \frac{R_1(R_0 + 2R_1) + R_1(R_0 + R_1)}{R_0 + 2R_1} \end{aligned}$$

$$R_{total} = R_0 = \frac{3R_1^2 + 2R_1R_0}{R_0 + 2R_1}$$

$$R_0(R_0 + 2R_1) = 3R_1^2 + 2R_1R_0$$

$$R_0^2 = 3R_1^2$$

$$R_1 = \sqrt{\frac{R_0}{3}}$$

Contoh Soal 10.15.

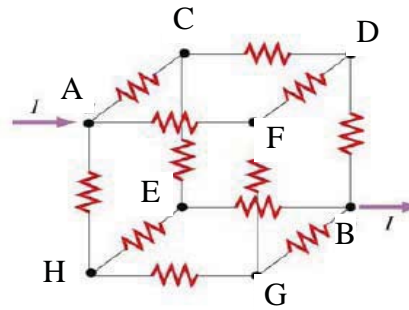
Dua belas resistor dirangkai seperti pada gambar. Tunjukkan bahwa resistansi di antara A dan B adalah $R_{tot\ ab} = 5R/6$

Penyelesaian

Misal arus masuk I di A keluar menjadi 3 arus, yaitu i_{ac} , i_{af} , i_{ah} masing masing adalah $I/3$, keluar C menuju D dan E menjadi arus CE dan CD sebesar $I/6$ sampai di D dilanjutkan ke B kembali menjadi $I/3$ berasal dari EB; GB dan DB

$$I_a = 3 I_{ac} = 6 I_{cd} = I_{fd} + I_{cd} =$$

$$V_{ab} = V_{ac} + V_{cd} + V_{db} = \frac{I}{3}R + \frac{I}{6}R + \frac{I}{3}R = \frac{5R}{6}I$$

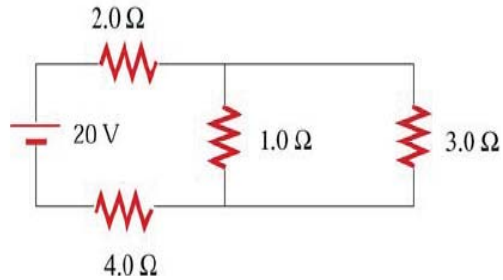


$$V_{ab} = IR_{ab} = \frac{5R}{6} I$$

$$R_{ab} = \frac{5R}{6}$$

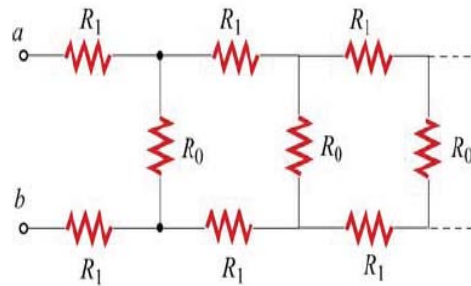
Soal 1.

- a. Dengan mengabaikan resistansi dalam baterai, tentukan arus pada tiap cabang.
- b. Hitunglah daya yang setiap resistor



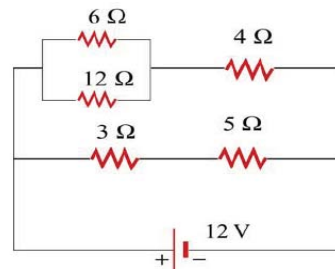
Soal 2.

Tunjukkan resistansi total adalah $R_{tot} = R_1 + \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_0}$



Soal 3. :

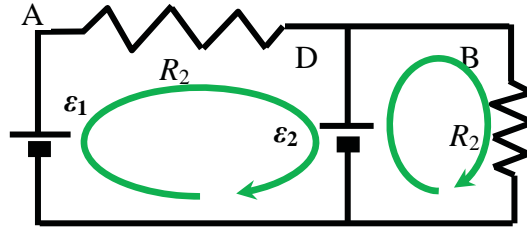
Lima resistor disusun seperti gambar berikut, dihubungkan dengan baterai $\varepsilon = 12$ volt, tentukan beda potensial pada kedua ujung resistor 5Ω . (7,5volt)



Soal 4.

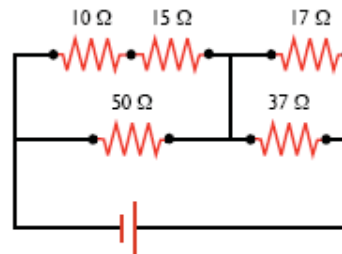
Rangkaian arus searah (*dc*) terdiri atas dua batere $\varepsilon_1 = 12 \text{ V}$; $\varepsilon_2 = 9 \text{ V}$ yang hambatan dalamnya dapat diabaikan, disambungkan dengan dua resistor $R_1 = 150 \Omega$; $R_2 = 50 \Omega$ seperti pada gambar.

- Berapakah beda potensial pada R_2 ?
- Berapakah arus pada resistor R_2 ?
- Lakukan perhitungan yang sama untuk R_1 .

**SOAL UJI KOMPETENSI**Soal 10.1.

Tentukan resistansi ekuivalen (resistansi pengganti) dari lima resistor pada rangkaian disamping.

- 28Ω
- 74Ω
- 22Ω
- 54Ω**

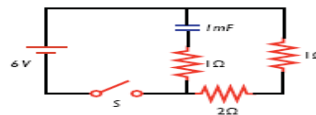
Soal 10.2.

Hukum Kirchhoff dihasilkan dari dua hukum dasar dalam Fisika, yaitu

- Hukum Kekekalan Energi dan perhitungan Muatan
- Hukum Kekekalan Energi dan Kekekalan Momentum
- Hukum Kekekalan Muatan dan Hukum Kekekalan Energi**
- Hukum Coulomb dan Hukum Kekekalan Muatan.

Soal 10.3.

Tinjau rangkaian sebuah kapasitor dirangkai dengan tiga resistor seperti



gambar berikut. Bila sakelar S ditutup, kemudian dibiarkan dalam waktu yang lebih besar daripada tetapan waktu kapasitor, maka arus pada resistor $2\ \Omega$ adalah

- a. **2 A**
- b. 4 A
- c. 3 A
- d. 1 A

Soal 10.4.

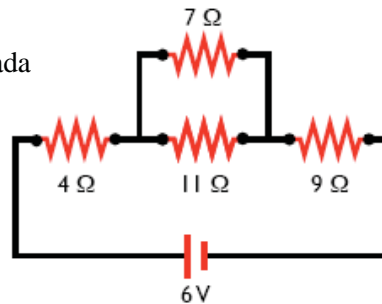
Tinjau kawat pertama berbentuk silindris dari bahan tembaga, kawat kedua juga terbuat dari bahan yang sama tetapi ukuran panjang dan jejaringnya dibuat dua kali ukuran kawat pertama, maka kawat kedua memiliki resistansi

- a. sama dengan resistansi kawat pertama
- b. dua kali resistansi kawat pertama
- c. **setengah resistansi kawat pertama**
- d. empat kali resistansi kawat pertama
- e. seperempat kali resistansi kawat pertama

Soal 10.5.

Arus yang melewati resistor $9\ \Omega$ pada rangkaian disamping adalah

- a. **347 mA**
- b. 581 mA
- c. 716 mA
- d. 1,32 A



Soal 10.6.

Suatu kawat yang dialiri arus listrik memiliki luas penampang irisan yang berubah semakin kecil secara bertahap sepanjang kawat, sehingga bentuk kawat mirip corong yang sangat panjang. Bagaimanakah perubahan kecepatan derip terhadap panjang kawat.

- a. Mengecil secara bertahap mengikuti perubahan luas penampang irisan yang juga semakin kecil.

- b. **Semakin bertambah besar bila luas penampang irisan mengecil**
 c. Tidak berubah
 d. Berubah secara kuadratis terhadap perubahan luas penampang irisan kawat

Soal 10.7.

Suatu pemanggang roti dengan nilai daya 550 W dihubungkan dengan sumber 130 V. Maka arus yang melewati pemanggang adalah

- a. 5,04 A
 b. 1,83 A
 c. 2,12 A
 d. **4,23 A**

Soal 10.8.

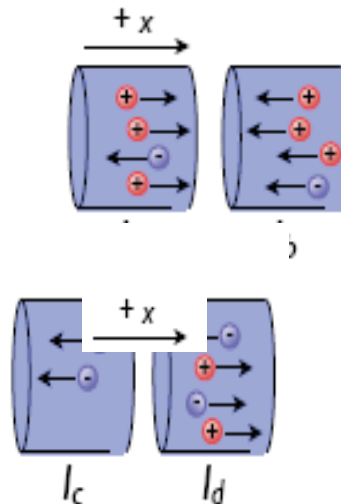
Suatu beda potensial sebesar 11 volt digunakan untuk menghasilkan arus sebesar 0,45 A pada kawat sepanjang 3,8 m. Resistivitas kawat adalah

- a. 204 $\Omega \cdot m$
 b. $2,04 \times 10^6 \Omega \cdot m$
 c. 2,94 $\Omega \cdot m$
 d. **$2,94 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$**

Soal 10.9.

Tinjau muatan positif dan muatan negatif yang bergerak horisontal melalui empat daerah seperti pada gambar. Bila arus positif didefinisikan sebagai muatan positif yang bergerak dalam arah X+. Susunlah urutan besar arus yang melewati empat daerah tersebut dari yang paling tinggi sampai dengan yang paling rendah.

- a. **$I_a > I_c = I_d > I_b$**
 b. $I_a > I_d > I_c > I_b$
 c. $I_d > I_a > I_b > I_c$
 d. $I_a > I_d = I_b > I_c$



Soal 10.10.

Dalam rentang waktu 1,37 s muatan berjumlah 1,73 C melewati lampu bohlam. Berapakah jumlah elektron yang lewat dalam waktu 5 s?

- a. $8,47 \times 10^{19}$
- b. $4,58 \times 10^{17}$
- c. **$3,95 \times 10^{19}$**
- d. $7,90 \times 10^{18}$

Penjelasan:

Arus yang mengalir $I = (1,73\text{C})/1,37 \text{ s} =$ Jumlah muatan per detik.

Muatan satu elektron $1,6 \times 10^{-19} \text{ C/elektron}$

Jumlah elektron yang mengalir = $[5 \times (1,73\text{C})/1,37 \text{ s}] / [1,6 \times 10^{-19} \text{ C/elektron}]$
 $= \mathbf{3,95 \times 10^{19} \text{ elektron}}$

Soal 10.11.

Suatu beda potensial 11 volt digunakan menghasilkan arus 0,45 A dalam kawat serbasama sepanjang 3,8 m dengan jejari 3,8 mm. Tentukan resistivitas kawat tersebut.

- a. $200 \Omega \cdot \text{m}$
- b. $2,9 \Omega \cdot \text{m}$
- c. $2 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$
- d. **$2,9 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$**

Penjelasan:

Resistansi

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

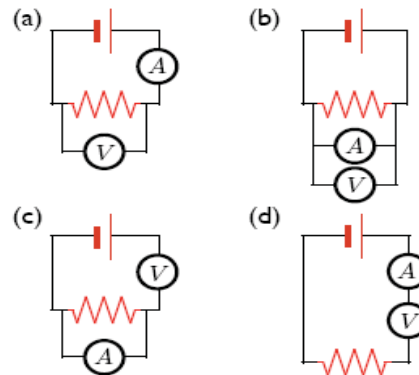
atau

$$\begin{aligned} \rho &= R \frac{A}{L} = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} = \left(\frac{11 \text{ volt}}{0,45 \text{ A}} \right) \frac{\pi (3,8 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{3,8 \text{ m}} \\ &= 2,9 \times 10^{-4} \frac{\text{volt} \cdot \text{m}}{\text{A}} \\ \rho &= \boxed{2,9 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}} \end{aligned}$$

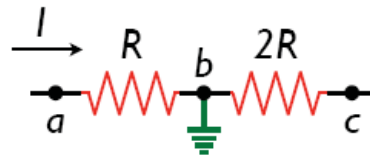
Soal 10.12.

Tinjau salah satu dari empat rangkaian yang tepat apabila digunakan mengukur arus dan tegangan pada resistor? Anggaphlah voltmeter, amperemeter dan batere adalah ideal.

- rangkaian (a)**
- rangkaian (b)
- rangkaian (c)
- rangkaian (d)

Soal 10.13.

Suatu arus I mengalir pada dua resistor yang besarnya masing masing adalah R dan $2R$ yang terangkai seri seperti pada gambar. Di titik B pada kawat penghubung kedua resistor dikaitkan dengan tanah (*ground*). Tentukan beda potensial antara titik A dan C relatif terhadap tanah.



- $V_a = -IR$ $V_c = -2IR$
- $V_a = 0$ $V_c = -3IR$
- $V_a = +IR$ $V_c = +2IR$
- $V_a = +IR$ $V_c = -2IR$**

Penjelasan: $V_{ab} = V_a - V_b = IR$ dan $V_b = 0$ sehingga **$V_a = +IR$**
 $V_{cb} = V_c - V_b = -2IR$ dan $V_b = 0$ sehingga **$V_c = -2IR$**

Soal 10.14.

Untuk mengisi kembali batere 9 volt diperlukan energi $3,6 \times 10^6$ J. Tentukan jumlah elektron yang harus bergerak melewati beda potensial 9 volt hingga penuh.

- 1×10^{25} elektron
- 2×10^{24} elektron**
- 4×10^{12} elektron
- 81×10^{13} elektron

Penjelasan:

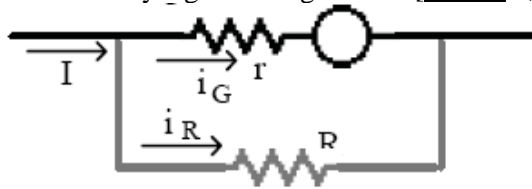
Prinsipnya Hukum Kekekalan Energi, energi total untuk mengisi baterai sama dengan jumlah energi untuk menggerakkan satu elektron melewati beda potensial 9 volt dikalikan dengan jumlah elektron n .

$$\text{Energi Potensial} = ne \Delta V = n (1,6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb})(9 \text{ volt}) = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{Jumlah elektron yang bergerak} = n = (3,6 \times 10^6 \text{ J}) / (1,6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb})(9 \text{ volt}) = \mathbf{2 \times 10^{24} \text{ elektron}}$$

Soal 10.15.

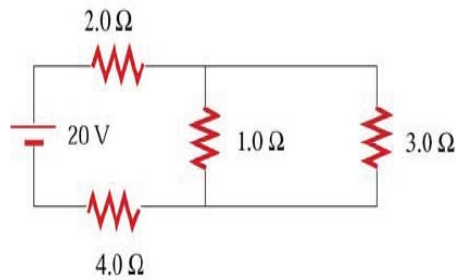
Suatu Galvanometer memiliki resistansi dalam $0,12 \Omega$; Arus maksimum yang dapat dilewatkan galvanometer adalah $15 \mu\text{A}$. Bila galvanometer dirangsang untuk dapat digunakan membaca arus sebesar 1 A , tentukan hambatan R yang harus digunakan. [Jawab: $1,8 \mu\Omega$]

Soal 10.16.

Dengan mengabaikan resistansi dalam baterai, tentukan arus pada tiap cabang.

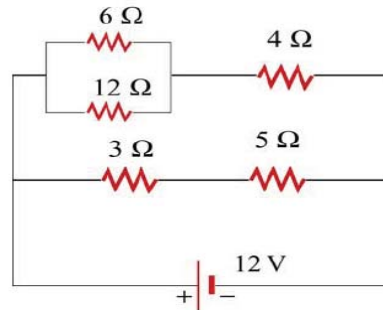
Soal 10.17.

Hitunglah beda potensial pada resistor 2Ω dan resistor 4Ω untuk rangkaian pada soal no 2. [Jawab: $160/27$ volt dan $320/27$ volt]



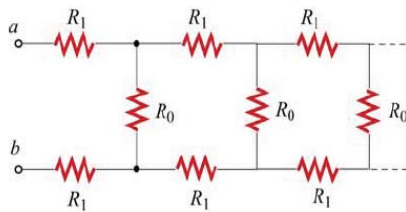
Soal 10.18.

Lima resistor disusun seperti gambar berikut, dihubungkan dengan baterai $\varepsilon = 12$ volt. Tentukan beda potensial pada kedua ujung resistor 5Ω . [Jawab: 7,5volt]

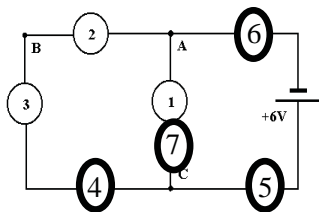
Soal 10.19.

Tunjukkan bahwa resistansi total untuk rangkaian pada Gambar berikut adalah:

$$R_{tot} = R_1 + \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_0}$$

Soal 10.20.

Tujuh buah lampu bohlam masing masing dengan resistansi $R = 15 \Omega$. dihubungkan sebuah baterai $\varepsilon = 6$ V.

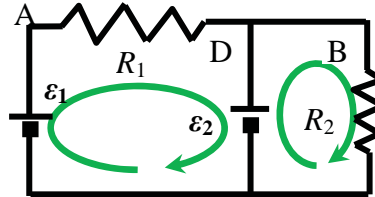


- Tentukan resistansi ekivalen (hambatan pengganti) untuk ketiga lampu bohlam. [Jawab: 48Ω]
- Tentukan arus dari baterai [Jawab: $0,125$ A]

Soal 10.21.

Rangkaian arus searah (*dc*) terdiri atas dua batere $\epsilon_1 = 12 \text{ V}$; $\epsilon_2 = 9 \text{ V}$ yang hambatan dalamnya dapat diabaikan, disambungkan dengan dua resistor $R_1 = 150 \Omega$; $R_2 = 50 \Omega$ seperti pada gambar.

- Berapakah beda potensial pada R_2 ?
- Berapakah arus pada resistor R_2 ?
- Lakukan perhitungan yang sama untuk R_1 .

Soal 10.22.

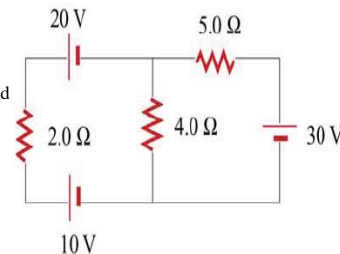
- Dengan mengabaikan resistansi dalam batere, tentukan arus pada tiap cabang.

Jawab: $I_1 = -5,53 \text{ A}$; $I_2 = -5,79 \text{ A}$

- Hitunglah beda potensial V_{af} ; V_{be} ; V_{bd}

Jawab: $V_{af} = 11,06 \text{ volt}$;

$V_{be} = 1,05 \text{ volt}$; $V_{bd} = 1,05 \text{ volt}$

**10.8. Rangkuman**

- Bahan isolator tidak mudah melepaskan ikatan elektronnya, bukan merupakan penghantar yang baik.
- Isolator padat dapat berubah menjadi konduktor apabila dipanasi. Sifat cairnya memberikan ion bebas sehingga dapat menghantarkan muatan listrik.
- Resistansi (R) merupakan ukuran daya hambat (perlawanan) bahan terhadap aliran arus listrik, (diukur dalam satuan Ohm (Ω)). Resistansi menghambat aliran muatan listrik.
- Aliran muatan listrik dalam bahan menghasilkan proses tumbukan yang ditandai berupa kenaikan temperatur bahan, timbulnya panas adalah seperti pada proses terjadinya gesekan antar benda.
- Konduktor memiliki resistansi rendah, namun isolator memiliki resistansi yang tinggi.

- g. Resistansi dapat dinyatakan dengan rumusan $R = \rho L/A$, L adalah panjang dan A adalah luas penampang kawat
- h. Arus Listrik Searah (dc) adalah arus yang besar dan arah alirnya selalu sama. Arah arus listrik diperjanjikan sama dengan arah gerak muatan positif. Kecepatan derip v_d dapat dipandang sebagai aliran muatan positif yang arahnya sesuai dengan arah medan atau sebagai aliran muatan negatif dalam arah yang berlawanan dengan arah medan listrik E .
- i. Jadi resistansi total atau resistansi ekivalen untuk sambungan seri adalah dijumlahkan langsung seluruh resistor yang disambungkan tersebut.

$$R_{seri} = R_1 + R_2$$

- j. Sedangkan resistansi rang-kaian resistor yang disambungkan secara paralel adalah

$$\frac{1}{R_{par}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

BAB 11 ARUS BOLAK BALIK



GI PLTGU CILEGON

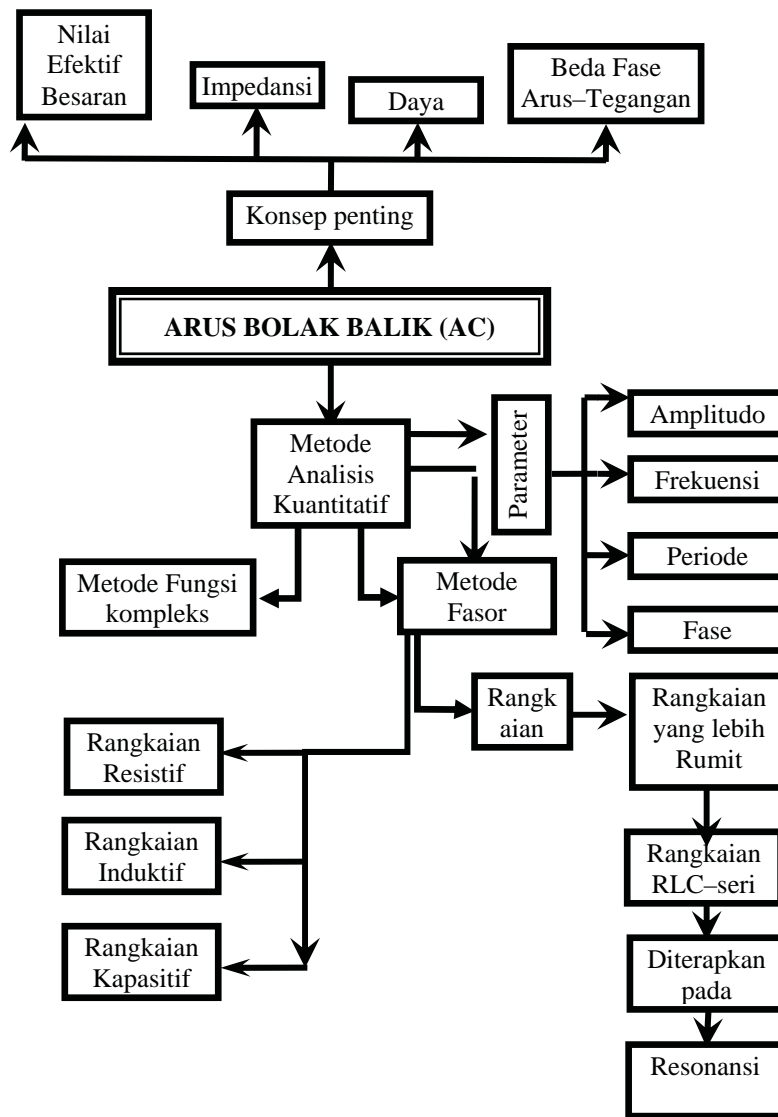
Jaringan listrik PLN melalui kabel untuk mendistribusikan daya dari generator arus bolak balik selalu terdapat hampir di setiap rumah. Namun kebutuhan kita saat ini tidak sekedar memiliki saluran listrik, tetapi juga butuh berkomunikasi dengan dunia luar melalui internet secara mudah dan murah. Persoalannya adalah bagaimana memanfaatkan kabel jaringan listrik yang ada untuk melakukan komunikasi antara sumber informasi satu dengan lain.

Media transmisi kabel saat ini merupakan salah satu media transmisi data yang cukup populer digunakan dalam melakukan komunikasi data dari sumber daya informasi satu dengan sumber daya informasi lain, walau beberapa tahun terakhir ini keberadaannya digeser oleh teknologi nirkabel (wireless) yang menggunakan udara sebagai media transmisi data.

Konsep internet melalui kabel listrik, bukanlah hal yang baru. Selama ini telah diusahakan untuk mengimplementasikan internet melalui kabel listrik namun terhambat karena ketidakmampuan mengatasi solusi ekonomis dalam memfilter gangguan sinyal (noise) listrik pada kabel listrik.

Secara teknis pada substasiun listrik di mana jaringan distribusi tegangan rendah berasal (di mana tegangannya telah diturunkan dari jaringan tegangan tinggi dengan menggunakan transformer), sinyal-sinyal diinjeksikan ke dalam jaringan tegangan rendah dari jaringan data konvensional eksternal (kabel tembaga koaksial, kabel optik fiber, jaringan nirkabel, atau bahkan jaringan satelit). Meskipun komunikasi data dapat dirambatkan melalui kabel listrik, jaringan konvensional harus tetap ada. Sampai saat ini belum ada metode yang ditemukan untuk melakukan propagasi sinyal-sinyal data melalui jaringan tegangan tinggi (> 415 volt). Secara khusus, frekuensi sinyal daya listrik adalah dalam jangkauan 50/60Hz. Dengan pengondisian tertentu, sinyal-sinyal data ini dinaikkan ke frekuensi ultra tinggi dalam jangkauan 500/600MHz, sehingga data dapat ditumpangkan ke kabel utama listrik tanpa terjadi kondisi saling melemahkan.

PETA KONSEP



Pra Syarat

Pada Subbab Gejala Peralihan dibahas tanggapan yang berupa perubahan arus atau muatan saat-saat awal pada rangkaian yang terdiri atas resistor yang digabungkan dengan induktor atau kapasitor, yaitu pada saat sumber tegangan yang mengenainya berubah terhadap waktu. Selesai bab ini Anda diharapkan mampu memahami perubahan kondisi tersebut secara matematis.

Pada Subbab kedua dibahas tanggapan fase untuk arus atau tegangan pada resistor, induktor dan kapasitor pada saat dikenai sumber tegangan bolak balik. Selesai bab ini Anda diharapkan mampu memahami gejala dan dapat menyelesaikan soal-soal yang terkait dengan rangkaian yang mengandung resistor, induktor dari kapasitor baik secara sendiri (murni) maupun dengan gabungan ketiganya apabila rangkaian tersebut dikenai arus bolak balik, antara lain:

- Rumusan beda potensial pada resistor, induktor dan kapasitor.
- Dampak perubahan arus pada induktor bila terjadi perubahan tegangan sumber yang dikenakan pada induktor tersebut..
- Dampak perubahan muatan atau arus pada kapasitor bila terjadi perubahan tegangan sumber yang dikenakan pada kapasitor.
- Energi yang tersimpan pada induktor maupun kapasitor sesaat setelah elemen tersebut dihubungkan suatu sumber tegangan.
- memahami hubungan antara fase tegangan sumber dengan fase arus bolak balik dalam rangkaian
- dapat melakukan perhitungan sederhana tentang impedansi, sudut fase, nilai rerata atau rms untuk tegangan maupun arus bolak balik
- memahami gejala resonansi maupun pengaruh perubahan frekuensi tegangan sumber terhadap induktor dan kapasitor.

Cek Kemampuan Anda, apakah:

Anda telah memahami:

- gejala pada rangkaian resistor, atau induktor atau kapasitor dalam keadaan murni dikenai arus listrik searah.
- pengertian gelombang sinusoida; fase, frekuensi, periode, dan amplitudo gelombang; serta penggambarannya secara grafik.
- perubahan arus pada induktor dan kapasitor bila terjadi perubahan tegangan sumber yang dikenakan pada induktor tersebut.
- gejala pada rangkaian resistor murni yang dikenai arus bolak balik, dapatkah Anda merumuskan daya pada rangkaian tersebut.

A. Gejala Peralihan

Pembahasan bab ini diawali dengan meninjau gejala transien atau biasa disebut gejala peralihan, yaitu gejala awal yang timbul dalam selang waktu pendek pada rangkaian RL -seri atau RC -seri yang dihubungkan sumber tegangan searah batere dengan gaya gerak listrik (GGL) ε , melalui sakelar agar teramati gejala peralihan dari kondisi awal. Melalui pemahaman gejala peralihan ini dapat memberikan gambaran awal bahwa elemen induktor dan kapasitor dapat menyimpan energi listrik dari batere yang terhubung padanya. Bila batere tersebut dilepas maka energi tersimpan tadi dapat dilepas kembali ke rangkaian. Hal ini tidak terjadi bila batere dikenakan pada resistor.

Setelah kita memahami gejala peralihan, maka kita telah mengenali perilaku elemen R , L , dan C apabila dihubungkan dengan sumber tegangan yang berubah terhadap waktu. Hal yang sama terjadi pada pembahasan rangkaian R , L , dan C yang dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik atau juga disebut sumber tegangan sinusoida. Kita juga akan memahami adanya makna resistansi efektif atau dikenal dengan istilah impedansi yang terkandung pada setiap bahan, beserta perilaku elemen R , L , dan C apabila sumber tegangan bolak balik mengandung frekuensi rendah atau frekuensi tinggi. Untuk memudahkan perhitungan impedansi total akibat variasi rangkaian R , L , dan C maka disisipkan materil fasor secara ringkas.

Nilai arus dan tegangan sinusoida (bolak balik) tidak dapat diukur langsung karena selalu berubah terhadap waktu, sehingga perlu dibahas nilai efektif atau nilai *root-means-square* (rms) dalam kaitanya dengan nilai maksimum. Seiring dengan itu dibahas pula tentang daya serta peran faktor daya sampai dengan munculnya gejala resonansi.

11.1. Resistor dalam Rangkaian Sumber Tegangan Searah

Tinjau suatu resistor R dihubungkan sumber tegangan searah memiliki gaya gerak listrik (GGL) ε seperti pada Gambar 11.1. Berlaku hukum Ohm, yaitu $V = IR$



Gambar 11.1 (a) Resistor R dihubungkan dengan batere ε
 (b) Sesuai hukum Ohm, arus I konstan terhadap waktu.

Perhatikan Gambar 11.1(a) Resistor R sesaat setelah disambungkan batere, maka arus mengalir langsung secara konstan seperti pada Gambar 11.1(b). Ternyata apabila resistor berada dalam rangkaian arus searah (DC), maka tidak dijumpai gejala peralihan, karena arus langsung mencapai nilai maksimum sejak waktu $t = 0$.

Kegiatan:

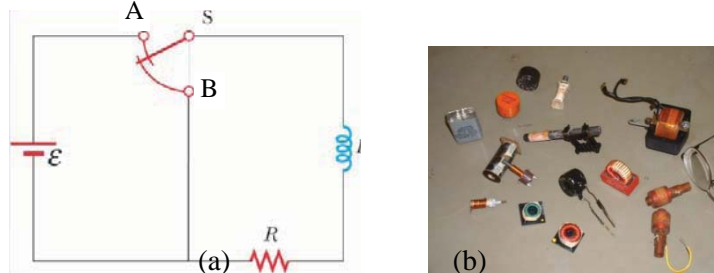
Buatlah rangkaian sederhana secara seri antara lampu kecil dihubungkan dengan batere. Amatilah nyala lampu tersebut, terutama sesaat setelah rangkaian tersambung secara tertutup. Bandingkan hal ini dengan apabila pada rangkaian diberikan sisipan berupa induktor ataupun kapasitor.

Latihan:

Suatu batere sebagai sumber arus searah yang memiliki ggl $\varepsilon = 6$ volt dengan resistansi dalam $r = 0,5 \Omega$ yang kemudian dihubungkan seri dengan bohlam lampu senter dengan resistansi $2,5 \Omega$. Tentukan arus pada rangkaian tersebut, dan hitunglah daya pada bohlam lampu. [Gunakan hukum Ohm $V = IR$ sehingga daya $P = IV = \frac{V^2}{R}$]

11.2. Gejala Peralihan pada Induktor

Tinjau rangkaian RL -seri yang dihubungkan dengan batere ε melalui sakelar S , seperti dalam Gambar 11.2 (a).



Gambar 11.2 (a) Rangkaian RL -seri dihubungkan batere ε melalui sakelar S . (b) Contoh beberapa induktor yang tersedia di pasaran

Gambar 11.2 (b) menunjukkan beberapa contoh induktor dalam berbagai bentuk dan ukuran yang tersedia di pasaran. Induktor berperilaku mirip massa yang selalu menghambat gerakan, maka induktor juga selalu melawan perubahan tegangan. Pada saat sakelar disambungkan maka dalam rangkaian terjadi perubahan tegangan, di sinilah perlawanan induktor akan teramati. Perilakunya berbeda dengan resistor.

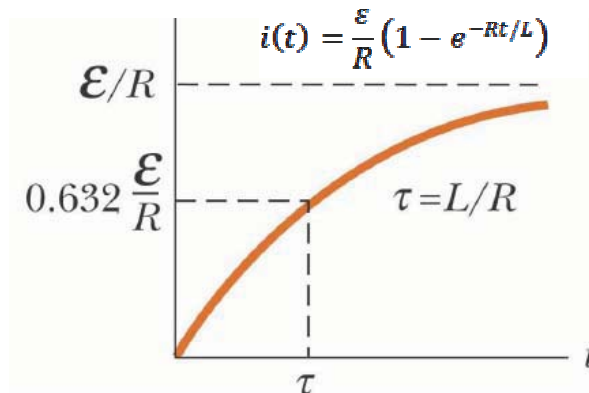
Hubungkan sakelar S ke A , berarti rangkaian RL -seri tersambung dengan batere ε , sehingga arus mengalir dalam rangkaian dan memenuhi hukum kedua Kirchhoff:

$$\varepsilon = V_L + V_R$$

dengan menyelesaikan persamaan matematis tersebut didapat arus sesaat pada rangkaian adalah

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-Rt/L}) \quad (11.1)$$

Jika persamaan di atas digambarkan dalam bentuk grafik arus terhadap waktu, diperoleh Gambar 11.3. Persamaan 11.1 menggambarkan arus pada rangkaian RL -seri sebagai fungsi waktu, yaitu merupakan proses penyimpanan energi batere ε menjadi energi magnetik dalam induktor, dari persamaan tersebut terlihat bahwa nilai maksimum arus dalam rangkaian $i(t) = \varepsilon/R$ dicapai pada $t = \infty$.



Gambar 11.3 Perubahan arus terhadap waktu saat induktor untuk rangkaian RL -seri dihubungkan dengan batere \mathcal{E} .

Nilai arus $i(t)$ memerlukan waktu $\tau = L/R$ bertepatan dengan nilai arus $[1 - (1/e)]$ dari nilai arus saat dimulainya proses ($t = 0$). Sedangkan nilai maksimum arus pada rangkaian, yaitu $I_m = \mathcal{E}/R$, dapat tercapai dalam waktu $t \gg \tau$, seperti pada Gambar 11.3.

Jika sakelar S pada gambar 11.2 dipindah ke titik b , berarti batere dilepas dari rangkaian RL -seri, persamaan hukum kedua Kirchhoff menjadi

$$V_L + V_R = 0$$

dengan menyelesaikan persamaan matematis maka arus sesaat adalah

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-Rt/L} \quad (11.2)$$

Persamaan 11.2 menunjukkan arus pada induktor berubah terhadap waktu bila batere dilepas dari rangkaian RL dari kondisi arus awal pada induktor adalah arus maksimum $i(0) = \mathcal{E}/R$. Nilai arus pada induktor akan terus menurun secara ekponensial, dari persamaan tersebut terlihat bahwa $i(t) = 0$ dicapai pada $t = \infty$. Dengan kata lain, tidak seperti resistor, pada rangkaian yang di dalamnya ada induktor, arus tidak langsung bernilai maksimum ketika saklar ditutup atau langsung bernilai nol ketika saklar dibuka.

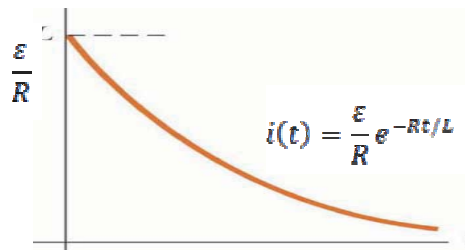
Kegiatan:

Buatlah rangkaian yang terdiri atas resistor R dan suatu gulungan kawat (induktor) L kemudian hubungkan secara seri. Gabungkan secara seri rangkaian RL -seri tersebut dengan batere, Amperemeter A dan sakelar S . Saat sakelar ditutup amatilah perubahan nilai arus pada rangkaian melalui

perubahan nilai yang ditunjukkan Amperemeter. Ubahlah nilai resistansi R atau induktansi L , lakukan pengamatan perubahan arus pada rangkaian. Amati pula setelah berapa lama arusnya menjadi konstan. Berikan penjelasan.

Latihan:

Bila dalam rangkaian RL -seri dengan nilai resistansi $R = 200 \text{ k}\Omega$ dan induktansi $L = 0,5 \text{ H}$. Hitunglah tetapan waktu τ untuk rangkaian tersebut.

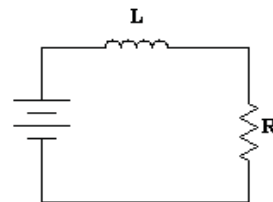


Gambar 11.4 Perubahan arus terhadap waktu, pada induktor yang telah memiliki arus awal $i(0) = \epsilon/R$ kemudian dilepas dari batere ϵ .

Contoh Soal 10.16.

Tinjau rangkaian RL seri yang terdiri atas induktor 3 henry dan resistor 6 ohm dihubungkan dengan batere 12 volt yang tahanannya diabaikan, tentukan

- Besar arus saat 0,2 detik setelah rangkaian di tutup.
- Besar arus dalam keadaan mantap (steady state).



Penyelesaian:

- Besar arus 0,2 detik setelah rangkaian di tutup

$$i(t) = \frac{\epsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = \frac{12}{6} \left(1 - e^{-\left(\frac{6}{3}\right)0,2} \right) = 2(1 - e^{-0,4}) = \boxed{0.65 \text{ A}}$$

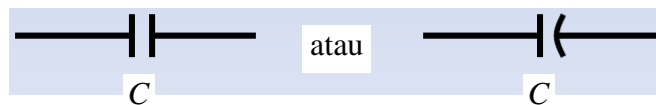
b. Arus pada keadaan mantap (steady state), yaitu saat $t = \infty$

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = \frac{12}{6} \left(1 - e^{-\left(\frac{6}{3}\right)\infty} \right) = 2(1 - e^{-\infty}) = \boxed{2 \text{ A}}$$

11.3. Gejala Transien pada Kapasitor

Biasanya pengertian kapasitor adalah dua bahan logam yang berbentuk identik yang kedua luas permukaannya ~~dua~~ berhadapan secara simetris mengikuti arah medan listrik, sehingga memiliki kemampuan untuk menyimpan muatan listrik. Namun kenyataannya konduktor tunggalpun memiliki kapasitansi yang merupakan ukuran daya tampung muatan. Artinya konduktor tunggal pun mampu menampung muatan listrik. Contoh bola (benda?) berbentuk bola dapat diberi muatan karena bentuk simetri lainnya dianggap berada di tak hingga.

Simbol untuk kapasitor digambarkan sebagai berikut



Gambar 11.6 Simbol untuk kapasitor .

Kapasitor yang tersedia di pasar dapat ditunjukkan dalam berbagai jenis dan ukuran seperti Gambar 11.5.

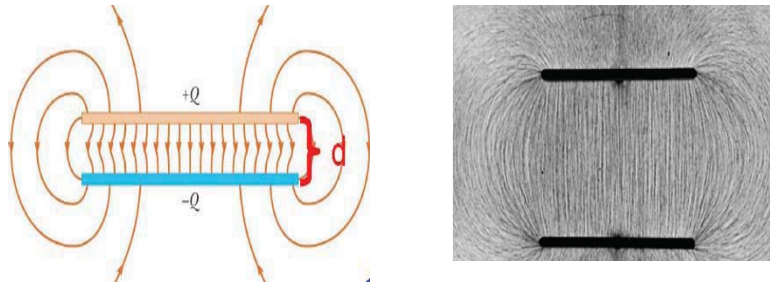


Gambar 11.5 Berbagai bentuk dan jenis kapasitor.
Kapasitansi didefinisikan sebagai

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

Artinya, daya tampung muatan pada suatu kapasitor bergantung pada beda potensial di antara kedua keping yang berhadapan secara simetris. Nilai beda potensial ini bergantung pada bentuk fisik dan ukuran serta jarak antara kedua keping. Hampir semua komponen dalam rangkaian listrik memiliki kapasitansi, misal kabel, kawat maupun resistor. Satuan SI untuk menyatakan kapasitansi adalah F (Farad), namun karena satuan ini terlalu besar untuk keperluan sehari-hari digunakan mikroFarad (ditulis $\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$), nanoFarad (ditulis $\text{nF} = 10^{-9}\text{F}$) dan pikoFarad (ditulis $\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$).

Gambar 11.7 menunjukkan hubungan antara bentuk fisik dan arah medan listrik pada kapasitor berbentuk keping.



Gambar 11.7 Arah medan listrik di tengah keping tampak lurus dan serbasama untuk kapasitor. [diambil dari PY212 Lecture 21, R. D. Averitt Spring 2007]

Kegiatan:

Gambar 11.7 menunjukkan bahwa arah medan listrik yang di tengah berbentuk lurus dibandingkan dengan arah medan dibagian tepi keping kapasitor. Cobalah diskusikan mengapa hal ini terjadi.

Tinjau rangkaian RC -seri yang dihubungkan dengan batere sebagai sumber tegangan searah dengan ggl ε , seperti pada Gambar 11.8 dari Gambar 11.8 bila S dihubungkan dengan titik a, berarti rangkaian RC -seri terhubung batere ε sehingga diperoleh persamaan hukum kedua Kirchhoff berikut

$$V_C + V_R = \varepsilon$$

$$\frac{q}{C} + iR = \varepsilon$$

dengan menyelesaikan persamaan matematis tersebut didapat muatan yang tersimpan dalam kapasitor sebagai fungsi waktu adalah

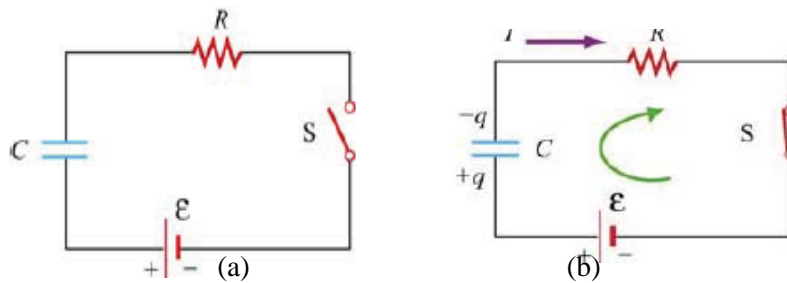
$$Q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (11.3)$$

Cobakan untuk $t = 0$ maka didapat

$$Q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = C\varepsilon(1 - e^0) = C\varepsilon(1 - 1) = 0$$

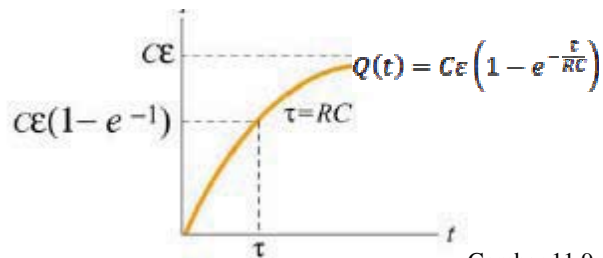
bila digunakan nilai $t = \infty$ merupakan waktu yang bersesuaian dengan $t \gg RC$ dilakukan pengisian muatan oleh batere didapat

$$Q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = C\varepsilon(1 - e^{-\infty}) = C\varepsilon(1 - 0) = C\varepsilon$$



Gambar 11.8 (a) Rangkaian RC–seri dihubungkan dengan batere ε elalui sakelar S. (b) Rangkaian keadaan tersambung, batere memberikan muatan pada kapasitor

Muatan yang tersimpan dalam kapasitor saat keadaan mantap $Q(t = \infty) = C\varepsilon$ yang nilainya konstant. Perubahan jumlah muatan yang disimpan dalam kapasitor ini digambarkan dalam grafik seperti gambar 11.9.



Gambar 11.9 Perubahan jumlah muatan pada kapasitor terhadap waktu sesaat setelah kapasitor dihubungkan dengan batere ε .

Amatilah keadaan muatan dalam kapasitor sesaat setelah batere dilepas dari kondisi kapasitor dimuati secara penuh, yaitu dengan memindahkan sakelar S pada gambar 11.8 ke b. Sehingga hukum kedua Kirchhoff menjadi

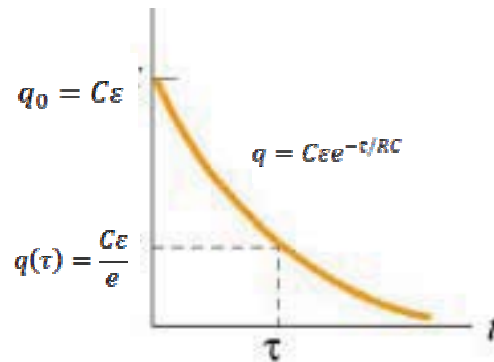
$$V_C + V_R = 0$$

$$\frac{q}{C} + iR = 0$$

Dengan menyelesaikan persamaan di atas diperoleh hasil:

$$q = CVe^{-t/RC} = Q_0 e^{-t/RC} \quad (11.4)$$

Persamaan (11.8) merupakan persamaan pelucutan muatan, dari persamaan tersebut terlihat bahwa $q = 0$ dicapai pada saat $t = \infty$. Habisnya muatan dalam kapasitor, lamanya bergantung pada nilai RC yang diberikan.



Gambar 11.10 Perubahan jumlah muatan terhadap waktu saat kapasitor dalam keadaan muatan penuh kemudian dilepas dari batere ε .

Kegiatan:

Rangkailah resistor R dan kapasitor C secara seri. Sambungkan rangkaian RC -seri tersebut dengan batere, amperemeter A dan sakelar S . Saat sakelar ditutup amatilah perubahan nilai arus pada rangkaian melalui Amperemeter. Ubahlah nilai resistansi R atau kapasitansi C , lakukan pengamatan perubahan arus pada rangkaian. Amati pula perubahan nilai arus bila salah S dibuka, setelah arusnya mencapai nilai konstan. Berikan penjelasan.

Contoh Soal 10.17.

Suatu rangkaian RC -seri dengan resistansi $R = 1 \text{ M}\Omega$; kapasitansi $C = 5 \text{ }\mu\text{F}$, sedangkan batere memiliki gaya gerak listrik (GGL) $\varepsilon = 30 \text{ V}$. Pada awalnya sakelar S terbuka, dan kapasitor dalam keadaan tidak bermuatan. Tentukan muatan pada kapasitor setelah 10 sakelar ditutup.

Penyelesaian:

Saat $t = 0$, sakelar mulai ditutup, maka batere memberikan muatan-nya ke kapasitor sesuai dengan

$$Q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

untuk

$$\tau = RC = (10^6 \Omega)(5 \times 10^{-6} \text{ F}) = 5 \text{ s}$$

Saat pengisian muatan ke dalam kapasitor oleh batere, arus terus berkurang sampai menjadi nol, dan saat itulah muatan kapasitor mencapai maksimum, dengan hukum kedua Kirchhoff, yaitu

$$\varepsilon - \Delta V_C - Ri(t) = 0$$

Saat muatan kapasitor penuh, berlaku

hubungan $\Delta V_C = \frac{Q_{\max}}{C} = \varepsilon$

Sehingga muatan maksimum pada kapasitor adalah

$$Q_{\max} = C\varepsilon = (5 \times 10^{-6} \text{ F})(30 \text{ V}) = 1,5 \times 10^{-4} \text{ C} = 150 \text{ }\mu\text{C}$$

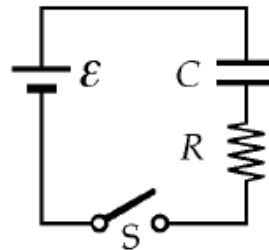
Sehingga pada saat $t = 10 \text{ s}$, dari sakelar ditutup, muatan pada kapasitor adalah

$$Q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$$Q(t) = (1,5 \times 10^{-4} \text{ C}) \left(1 - e^{-10/5}\right) = \boxed{130 \text{ }\mu\text{C}}$$

Kegiatan:

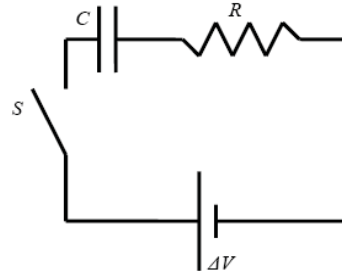
Buatlah rangkaian yang terdiri atas resistor R dan kapasitor C kemudian hubungkan secara seri. Gabungkan secara seri rangkaian RC -seri tersebut dengan batere, Amperemeter A dan sakelar S . Saat sakelar ditutup amatilah perubahan nilai arus pada rangkaian melalui perubahan nilai yang



ditunjukkan Amperemeter. Ubahlah nilai resistansi R atau kapasitansi C , lakukan pengamatan perubahan arus pada rangkaian. Amati pula setelah berapa lama arusnya menjadi konstan. Berikan penjelasan.

Latihan:

Suatu rangkaian RC -seri dihubungkan dengan batere $\Delta V = 30$ volt, $R = 15$ k Ω dan $C = 6$ μ F. Pada keadaan awal kapasitor tidak bermuatan. Saat sakelar ditutup, kapasitor mulai menampung muatan.



- Berapakah lama waktu yang diperlukan agar kapasitor telah menampung sepertiga dari muatan maksimumnya.
- Tentukan pula besar muatan saat itu.

B. Rangkaian Arus Bolak Balik

11.4. Sumber Tegangan Bolak Balik

Hukum Faraday menyatakan apabila fluks magnetik berubah maka dapat dihasilkan suatu gaya gerak listrik (GGL) induksi. Jika suatu koil diputar pada ruang yang terdapat medan magnet, maka dihasilkan gaya gerak listrik induksi yang berubah dengan waktu secara sinusoida, yang dikenal sebagai arus bolak balik (ac). Prinsip kerja putaran koil inilah yang digunakan dalam sumber tegangan arus bolak balik (ac) atau dikenal dengan istilah generator arus bolak balik (ac).

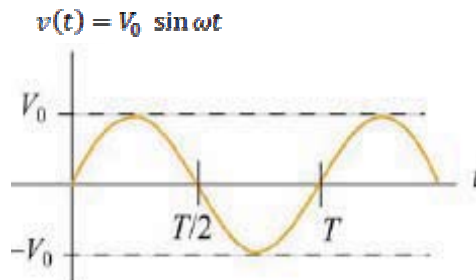


Gambar 11.11. Simbol untuk sumber tegangan bolak balik adalah menyatakan bahwa tegangan berubah sinusoida terhadap waktu.

Simbol untuk sumber tegangan bolak balik dinyatakan dalam Gambar 11.11, yang secara matematis dinyatakan dalam

$$v(t) = V_m \sin \omega t \quad (11.9)$$

nilai maksimum V_m disebut amplitudo sumber tegangan bolak balik. Fungsi sinusoida, yaitu $\sin(\omega t)$ menyatakan fase tegangan sumber dengan sudut fase sebesar ωt . Tegangan berubah dari V_m sampai dengan $-V_m$ karena fungsi sinus berubah dari 1 ke -1 . Grafik tegangan sebagai fungsi waktu ditunjukkan dalam Gambar 11.12.



Gambar 11.12 Grafik sumber tegangan sinusoida dengan amplitudo V_0 .

Karena tegangan tersebut memenuhi fungsi sinus maka nilai tegangan pada saat t dan saat $t + T$ adalah tepat sama, sehingga T disebut periode. Frekuensi f didefinisikan sebagai $f = 1/T$ dengan satuan s^{-1} atau hertz (Hz). Sedangkan frekuensi sudut adalah $\omega = 2\pi f$. Untuk memudahkan pembacaan maka huruf kecil digunakan menyatakan besaran yang berubah terhadap waktu, sebaliknya huruf kapital untuk besaran yang konstan.

Apabila sumber tegangan dihubungkan dengan rangkaian RLC maka energi yang diberikan akan habis dalam resistor. Setelah bekerja selama rentang waktu peralihan, arus AC akan mengalir dalam rangkaian dan memberikan tanggapan kepada sumber tegangan. Arus dalam rangkaian inilah yang dirumuskan sebagai

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \phi) \quad (11.10)$$

yang juga beresilasi dengan frekuensi yang sama dengan sumber tegangan, namun dengan amplitudo arus I_m serta memiliki beda fase ϕ yang bergantung frekuensi sumber.

Kegiatan:

Untuk lebih memahami secara simulasi sederhana proses pembangkitan tenaga listrik yang berasal dari tenaga Air (PLTA), tenaga Gas (PLTG), tenaga Uap (PLTU), tenaga Gas dan Uap (PLTGU), tenaga Panas Bumi (PLTP), dan tenaga Diesel (PLTD), cobalah gunakan internet dan kunjungi situs berikut.

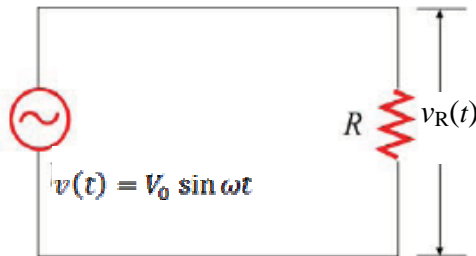
<http://www.pln.co.id/InfoUmum/PembangkitanListrik/tabid/77/Default.aspx>

Carilah informasi tentang enam jenis proses pembangkitan tenaga listrik tersebut secara detail, di mana lokasi pembangkit tenaga listrik itu berada, berapa kapasitas produksi dayanya dan untuk wilayah mana saja hasil tenaga listrik tersebut digunakan. Diskusikan di kelas.

11.5. Resistor dalam Rangkaian Sumber Tegangan Bolak Balik

Sebelum meninjau rangkaian R , L , dan C dalam berbagai variasi sambungan rumit berikut akan ditinjau lebih dahulu rangkaian tunggal yang hanya ada satu elemen, yaitu salah satu di antara resistor, induktor atau kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan sinusoida.

Tinjau resistor R yang dihubungkan dengan generator arus bolak balik (ac) seperti dalam Gambar 11.15



Gambar 11.13 Resistor dalam rangkaian sumber tegangan bolak balik.

Hukum kedua Kirchhoff untuk rangkaian resistor dalam sumber tegangan bolak balik seperti Gambar 11.15 adalah sebagai berikut

$$v(t) - v_R(t) = 0$$

bila $v(t)$ adalah tegangan pada sumber tegangan bolak balik dan $v_R(t)$ adalah tegangan sesaat pada kedua ujung resistor sehingga

$$v_R(t) = v(t)$$

$$Ri_R(t) = V_m \sin \omega t$$

arus sesaat pada resistor adalah

$$i_R(t) = \frac{V_m}{R} \sin \omega t$$

$$i_R(t) = I_{Rm} \sin \omega t$$

sedangkan arus maksimum pada resistor adalah

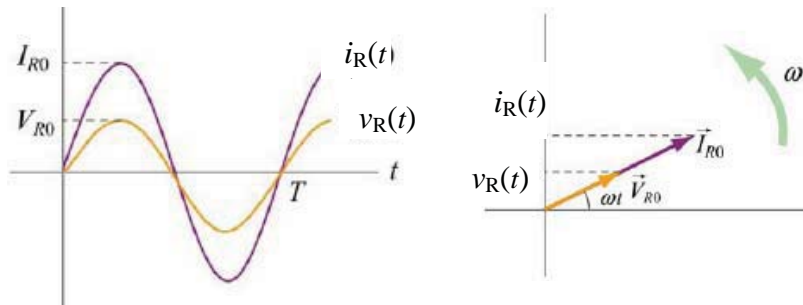
$$I_{Rm} = \frac{V_m}{R} = \frac{V_{Rm}}{R}$$

Tampak bahwa arus sesaat pada resistor $i_R(t)$, sumber tegangan bolak balik $v(t)$ dan tegangan sesaat pada resistor $v_R(t)$ adalah sefase satu sama lain, artinya ketiganya mencapai maksimum dan minimum dalam waktu yang sama. Fase arus pada resistor sama dengan fase sumber tegangan bolak balik, yaitu sesuai dengan fungsi $\sin(\omega t)$.

Hubungan antara $i_R(t)$ dengan $v_R(t)$ dapat juga dinyatakan dengan **diagram fasor** seperti pada Gambar 11.15. Suatu fasor adalah vektor yang berputar dengan arah kebalikan arah jarum jam dengan kecepatan sudut ω . Panjang vektor merupakan amplitudo, sedangkan proyeksi vektor pada sumbu vertikalnya merupakan nilai sesaat dari besaran yang berubah terhadap waktu tersebut.

$$v_R(t) = V_{Rm} \sin \omega t$$

fasor tegangan sesaat pada resistor $v_R(t)$ memiliki amplitudo V_{Rm} dan proyeksinya ke arah vertikal adalah $V_{Rm} \sin(\omega t)$ yang nilainya sama dengan tegangan sesaat $v_R(t)$.



Gambar 11.15 (a) Arus dan tegangan pada resistor bergantung waktu secara sinusoida (b) Diagram fasor untuk resistor dalam rangkaian arus bolak balik (ac)

11.6. Nilai *Root-Means-Squared* (rms) untuk Tegangan dan Arus Bolak Balik

Nilai arus bolak balik tidak dapat diukur langsung dengan alat ukur arus seperti ampermeter ataupun galvanometer. Karena alat ukur biasanya hanya dapat membaca nilai rerata dari arus bolak balik, sehingga tidak mampu membaca nilai sesaat ataupun nilai maksimum arus bolak balik.

Nilai rms untuk arus bolak balik adalah nilai arus searah yang menghasilkan energi (berupa panas) yang sama bila arus bolak balik tersebut melalui suatu resistor yang sama dan dalam rentang waktu yang sama. Karena nilai tegangan sesaat dari sumber tegangan bolak balik tidak dapat diukur maka digunakan nilai rerata dari nilai sesaat yang dihitung selama satu periode. Nilai rerata arus bolak balik adalah

$$\langle I_R(t) \rangle = 0$$

Nilai rerata langsung untuk nilai arus adalah nol, hal ini mudah dimengerti karena arus bolak balik merupakan fungsi sinusoida dan dijumlahkan dalam batas satu periode. Agar hasil pererataan tidak nol, maka yang direratakan adalah kuadratnya, selanjutnya diambil akar terhadap nilai rerata tersebut

$$\langle I_R^2(t) \rangle = \frac{1}{2} I_{Rm}^2$$

Untuk selanjutnya, nilai arus atau tegangan yang berubah terhadap waktu secara sinusoida, lebih mudah dikaitkan dengan nilai akar dari hasil perataan terhadap nilai kuadrat besaran tersebut yang dikenal sebagai nilai rms. Jadi, nilai rms arus adalah nilai arus maksimum pada resistor dibagi dengan akar dua:

$$I_{rms} = \sqrt{\langle I_R^2(t) \rangle} = \frac{I_{R,max}}{\sqrt{2}}$$

Sesuai dengan hukum Ohm, dengan cara yang sama, nilai rms tegangan pada resistor:

$$V_{rms} = \sqrt{\langle V_R^2(t) \rangle} = \frac{V_{R,max}}{\sqrt{2}}$$

Penting untuk ditekankan adalah nilai rms terdefinisi dari perhitungan jumlah panas apabila arus bolak balik dilewatkan resistor, sehingga nilai arus atau tegangan rms selalu terhadap nilai maksimum arus atau tegangan pada resistor. Perhitungan daya terpakai pada resistor dalam rangkaian arus bolak balik, dengan menggunakan konsep arus DC adalah

$$P_R(t) = I_R(t)V_R(t) = I_R^2(t)R$$

Sedangkan perhitungan daya pada resistor R dalam rangkaian arus bolak balik, dengan nilai root-means-square (rms) didapat

$$P_R\langle(t)\rangle = \langle I_R^2(t)R \rangle = \frac{1}{2} I_R^2 R = I_{rms}^2 R = I_{rms} V_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

Dari perhitungan daya tersebut dapat dipahami bahwa nilai rms suatu arus bolak balik adalah apabila nilai arus tersebut dapat memberikan daya listrik yang sama dengan nilai daya apabila arus bolak balik dianggap sebagai arus searah (DC).

Kegiatan:

Carilah penjelasan di buku atau internet mengenai:

- Apakah yang dimaksud dengan rangkaian memiliki kapasitor murni.
 - Apakah yang dimaksud dengan rangkaian memiliki induktor murni.
 - Apakah arti kata murni dikaitkan dengan resistansi
 - Apakah kaitannya dengan perhitungan daya dalam suatu rangkaian.
- dan diskusikanlah dengan temanmu.

Latihan:

Berikan penjelasan mengapa alat ukur arus yaitu Amperemeter tidak dapat menyatakan nilai sesaat untuk besar baik tegangan atau arus bolak balik.

11.7. Daya dalam Rangkaian Arus Bolak Balik

Pada rangkaian arus bolak balik biasanya terdiri atas sumber tegangan atau generator arus bolak balik dan rangkaian kombinasi elemen R , L , dan C . Salah satu sifat penting dari sifat elemen R , L , dan C terhadap sumber tegangan bolak balik adalah bahwa tidak ada kehilangan daya dalam rangkaian kapasitif murni maupun induktif murni, karena energi listrik dari generator atau sumber tegangan akan tersimpan di dalam

induktor maupun kapasitor. Namun bila resistor dihubungkan sumber tegangan bolak balik, maka energi generator listrik akan habis sebagai energi panas pada resistor. Artinya, energi yang melewati resistor akan berubah menjadi energi panas, dan tidak dapat diambil kembali oleh rangkaian listrik. Tetapi kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik maka, setengah energi sumber tegangan bolak balik disimpan di dalam kapasitor, setengah lagi di kembalikan ke rangkaian arus bolak balik. Bila induktor dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik, energi sumber tegangan bolak balik digunakan untuk melawan GGL induksi dari induktor dan energi disimpan dalam induktor. Namun apabila arus dalam rangkaian mulai berkurang, energi dikembalikan ke rangkaian lagi.

Daya rerata dari generator arus bolak balik diubah menjadi energi dalam pada resistor sesuai dengan

$$P_{\text{rerata}} = I_{\text{rms}} \Delta V_R = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi$$

untuk $\cos \phi$ disebut faktor daya.

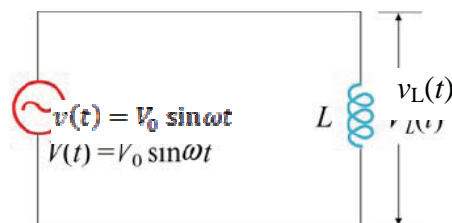
11.8. Induktor dalam rangkaian arus bolak balik

Tinjau suatu rangkaian listrik memiliki kapasitansi tak berhingga dan resistansinya adalah nol, rangkaian yang memenuhi kondisi demikian disebut rangkaian induktif murni. Suatu rangkaian induktor murni dengan induktansi L dihubungkan seri dengan sumber tegangan bolak balik, yaitu

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

sedangkan tegangan pada induktor adalah v_L

$$v_L(t) = L \frac{di}{dt}$$



Gambar dalam bolak balik.

11.15 Induktor rangkaian arus

Dari hukum kedua Kirchhoff, didapat

$$v(t) - v_L(t) = 0$$

dengan menyelesaikan persamaan tersebut maka didapat

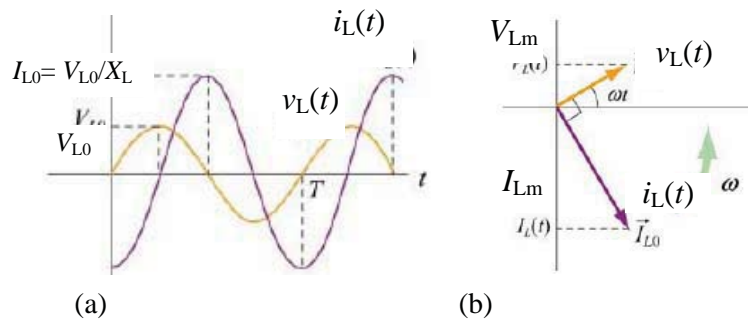
$$i_L(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos \omega t$$

$$i_L(t) = -\frac{V_m}{X_L} \cos \omega t = -I_{Lm} \cos \omega t$$

untuk $X_L = \omega L$ adalah reaktansi induktif, dengan satuan SI adalah ohm (Ω), seperti resistansi. Bedanya dengan resistansi pada resistor, reaktansi induktif bergantung secara linear pada frekuensi, semakin besar frekuensi semakin besar pula nilai ohm reaktansi induktif. Sedangkan pada frekuensi rendah, nilai X_L mendekati nol pula. Arus sesaat pada induktor adalah

$$i_L(t) = I_{Lm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

untuk $I_{Lm} = V_{Lm}/X_L$ adalah arus maksimum pada induktor. Bandingkan sudut fase arus pada induktor tersebut terhadap sudut fase tegangan sumber tegangan bolak balik $v(t)$ dan terhadap tegangan sesaat pada induktor $v_L(t)$. Ternyata fase arus pada induktor $i_L(t)$ tertinggal $\pi/2$ terhadap fase sumber tegangan bolak balik $v(t)$ maupun terhadap tegangan sesaat pada induktor $v_L(t)$. Grafik arus pada induktor dan tegangan sumber bolak balik beserta diagram fasornya ditunjukkan pada Gambar 11.16.



Gambar 11.16 (a) Grafik arus dan tegangan sesaat pada induktor dalam tegangan sumber bolak balik terhadap waktu. (b) Diagram fasor untuk induktor dan tegangan sumber bolak balik.

11.9. Kapasitor dalam rangkaian arus bolak balik

Tinjau suatu rangkaian listrik memiliki kapasitansi tak berhingga dan resistansinya adalah nol, rangkaian yang memenuhi kondisi demikian disebut rangkaian induktif murni. Tinjau Gambar 11.17 yaitu suatu rangkaian induktor murni dengan induktansi L dihubungkan seri dengan sumber tegangan bolak balik, yaitu

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

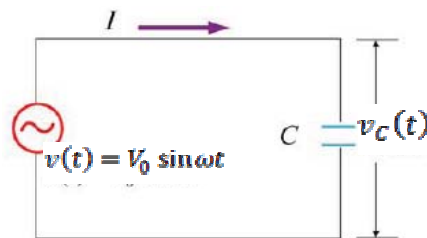
sedangkan tegangan sesaat pada kapasitor adalah

$$v_C(t) = \frac{Q(t)}{C}$$

Dari hukum kedua Kirchhoff, didapat

$$v(t) - v_C(t) = 0$$

$$v_C(t) = v(t)$$



Gambar 11.17 Kapasitor dalam rangkaian arus bolak balik.

artinya, tegangan sesaat pada kapasitor sama besar dan sefase dengan tegangan sumber. Muatan pada kapasitor adalah

$$Q(t) = C v_C(t) = C v(t)$$

$$Q(t) = C V_m \sin \omega t$$

sehingga arus sesaat pada kapasitor

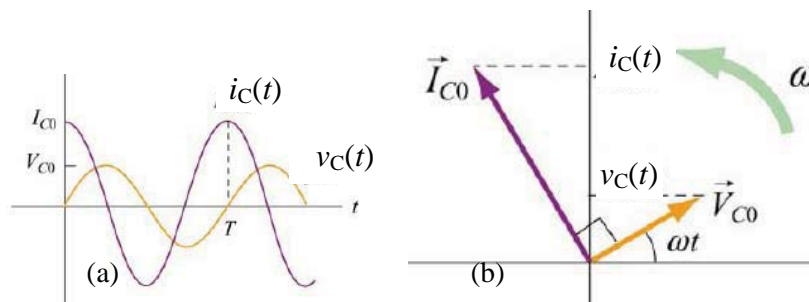
$$i_C(t) = V_m \omega C \cos \omega t$$

untuk $X_C = \frac{1}{\omega C}$ adalah reaktansi kapasitif dengan satuan SI adalah ohm (Ω) dan menyatakan resistansi efektif untuk rangkaian kapasitif murni. Nilai X_C berbanding terbalik dengan C dan ω , artinya X_C menjadi sangat besar bila ω sangat kecil.

$$i_C(t) = \frac{V_m}{X_C} \cos \omega t = I_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

untuk $I_{Cm} = \frac{V_m}{X_C}$ adalah arus maksimum pada kapasitor. Ternyata, fase arus pada kapasitor mendahului sebesar $\pi/2$ terhadap fase tegangan sumber bolak balik.

Grafik arus pada induktor dan tegangan sumber bolak balik beserta diagram fasornya ditunjukkan pada Gambar 11.18



Gambar 11.18 (a) Arus dan tegangan pada kapasitor dalam rangkaian arus bolak balik (b) Diagram fasor untuk kapasitor dalam rangkaian arus bolak balik

Kegiatan:

Untuk lebih memahami proses perubahan fase dari arus bolak balik yang melalui kapasitor atau induktor murni terhadap fase tegangan generator Arus Bolak Balik yang dikenakan pada kapasitor murni atau induktor murni tersebut, cobalah gunakan internet dan kunjungi situs berikut.

<http://www.sciencejoywagon.com/physicszone/otherpub/wfendt/accircuit.htm>

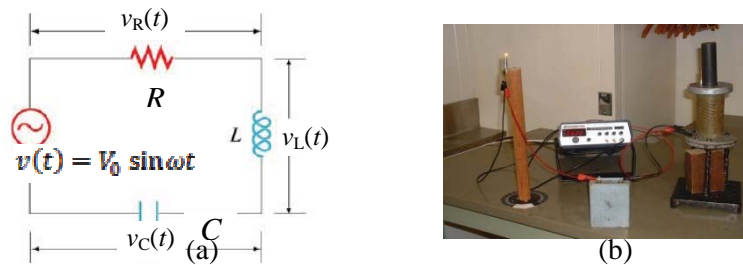
Namun untuk dapat memainkan program tersebut hendaknya komputer yang digunakan berinternet sudah diinstal program Java terlebih dahulu.

11.10. Rangkaian RLC -seri

Tinjau rangkaian RLC -seri dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik seperti pada Gambar 11.19 (a)

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

Sebagai contoh ditunjukkan dalam Gambar 11.19(b) suatu pembangkit pulsa (function generator) dihubungkan dengan resistor yang berupa lampu, induktor dan kapasitor.



Gambar 11.19 (a) Rangkaian RLC -seri dalam sumber tegangan bolak balik (b) Contoh rangkaian RLC -seri, Lampu sebagai resistor R .

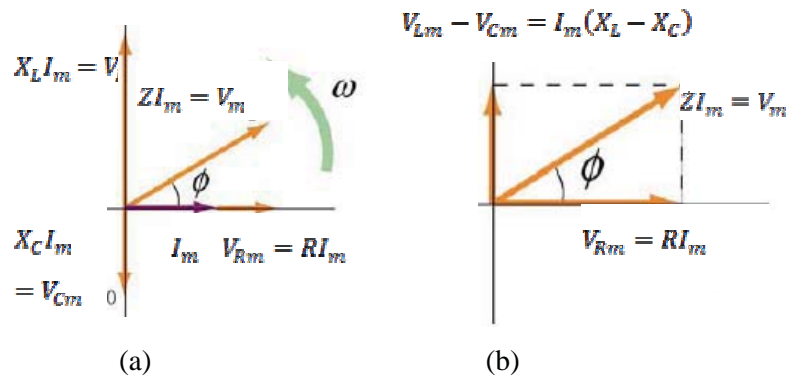
Sesuai dengan hukum kedua Kirchhoff untuk rangkaian seri

$$\begin{aligned} v(t) &= v_R(t) + v_L(t) + v_C(t) \\ v(t) &= R i_R(t) + X_L i_L(t) + X_C i_C(t) \\ v(t) &= R I_{Rm} \sin \omega t + X_L I_{Lm} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + X_C I_{Cm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

yang dapat ditulis sebagai berikut

$$v(t) = V_{Rm} \sin \omega t + V_{Lm} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + V_{Cm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Kemudian dilakukan penggambaran diagram fasor sesuai dengan sudut fasenya masing masing. Dari rumusan tegangan untuk sumber tegangan bolak balik $v(t)$, menyatakan bahwa tegangan pada masing masing elemen R , L , dan C memiliki beda fase secara berturut-turut adalah nol, $-\pi/2$ dan $\pi/2$ terhadap tegangan sumber.



Gambar 11.20 (a) Diagram fasor untuk rangkaian RLC -seri, bila $X_L > X_C$ (b) Hubungan antar tegangan dalam rangkaian RLC -seri

Kegiatan:

Susunlah rangkaian RLC -seri dengan nilai $R = 200 \text{ K}\Omega$, $L = 0,5 \text{ H}$, dan $C = 50 \text{ }\mu\text{F}$ tertentu dan hubungkan dengan generator sinyal gunakan tegangan maksimum 20 volt dalam frekuensi 50 Hz. Hubungkan rangkaian tersebut secara seri dengan Amperemeter Amatilah perubahan nilai arus bila frekuensi diubah menjadi 25 Hz dan 100 Hz. Diskusikan hasilnya dengan temanmu.

Latihan:

- Cobalah lakukan perumusan sendiri dengan menggunakan cara yang sama untuk kasus $X_L < X_C$.
- Tentukan pula nilai sudut fase ϕ . Jelaskan arti tanda $(-)$ dalam kaitannya dengan hubungan fase antara arus sesaat dalam rangkaian terhadap tegangan sumber.
- Gambarkan diagram fasor untuk hubungan arus dan tegangan pada masing masing elemen R , L , dan C seperti pada Gambar 11.20.

11.11. Impedansi

Impedansi merupakan nilai efektif terhadap total nilai resistansi yang berasal dari seluruh elemen RLC suatu rangkaian, sehingga hukum Ohm untuk arus bolak balik

$$V = I Z$$

untuk Z adalah impedansi total rangkaian, dengan satuan SI ohm (Ω). Di sini karena pembahasan fasor tidak mendalam, maka penulisan fasor tidak menggunakan tanda khusus, karena akan mengurangi kemudahan amteri. Hukum Ohm menjadi hubungan fasor, tidak sekedar hubungan antar besaran, artinya mencakup hubungan sudut fase dari arus, tegangan dan impedansi.

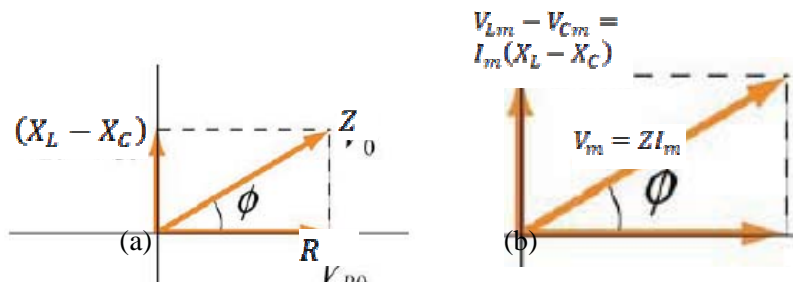
Diagram fasor dan hubungan antara tegangan sesaat pada rangkaian seri R , L , dan C ditunjukkan pada Gambar 11.20. Dengan menggunakan kaidah dalam bilangan kompleks, maka dapat dipadankan sebagai berikut bahwa resistor merupakan bagian real karena arus pada resistor tidak memiliki beda fase dengan tegangan sumber. Tetapi impedansi induktor Z_L merupakan bagian imajiner positif karena tegangan pada induktor memiliki beda fase $\pi/2$ mendahului fase tegangan sumber. Sedangkan impedansi kapasitor Z_C merupakan bagian imajiner negatif, karena tegangan pada kapasitor memiliki beda fase $\pi/2$ tertinggal terhadap fase tegangan sumber. Besar tegangan maksimum pada elemen R , L , dan C secara berturut-turut dapat ditulis sebagai berikut

$$V_{Rm} = RI_m$$

$$V_{Lm} = Z_L I_m$$

$$V_{Cm} = Z_C I_m$$

Dalam tinjau RLC -seri tentu saja semua elemen R , L , dan C memiliki besar arus yang sama, tetapi tidak berlaku bahwa V_m merupakan jumlahan langsung terhadap V_{Rm} , V_{Lm} dan V_{Cm} , karena masing masing merupakan fasor, ada faktor arah sehingga penjumlahannya mengikuti kaidah vektor.



Gambar 11.21 (a) Diagram fasor untuk impedansi $V_{Rm} = RI_m$ dan RLC -seri, bila $X_L > X_C$ (b) Hubungan antar tegangan dalam rangkaian RLC -seri, bila $X_L > X_C$

Dari Gambar 11.21 (a) dengan menggunakan sifat vektor dari fasor impedansi Z maka adalah merupakan resultan antara R dan selisih antara X_L dan X_C atau gunakan kaidah sisi miring segitiga siku pitagoras, sehingga impedansi untuk RLC -seri dapat dinyatakan sebagai berikut

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Berangkat dari kenyataan bahwa dalam sambungan seri semua elemen memiliki arus yang sama. maka bila semua suku pada ruas kiri maupun kanan dikalikan dengan I_m didapat persamaan yang mirip, namun sangat membantu pemahaman, yaitu

$$V_m = I_m Z = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2}$$

$$V_m = \sqrt{V_{Rm}^2 + (V_{Lm} - V_{Cm})^2}$$

sesuai dengan Gambar 11.21 (b).

Dari diagram fasor impedansi masing masing elemen R , L , dan C didapat hubungan sebagai berikut

$$\cos \phi = \frac{R}{Z}$$

Sedangkan dari diagram fasor tegangan pada masing masing R , L , dan C didapat hubungan sebagai berikut

$$\cos \phi = \frac{V_{Rm}}{V_m}$$

nilai $\cos \phi$ banyak digunakan dalam pembahasan daya dalam arus bolak balik.

Secara grafis, terdapat berbagai cara untuk menyatakan tegangan sinusoida (salah satu bentuk sumber tegangan bolak-balik) yang berubah terhadap waktu. Salah satunya adalah dengan membuat grafik antara tegangan terhadap waktu. Cara kedua adalah menyatakan osilasi tersebut dengan fasor yang berputar. Fasor tegangan adalah anak panah yang panjangnya sama dengan amplitudo tegangan (tegangan maksimum) yang berputar mengelilingi titik $0(0,0)$ dengan kecepatan sudut ω dalam arah kebalikan arah jarum jam dan dimulai dari sumbu x positif (sebagai acuan sudut fase nol).

Apabila resistor yang dihubungkan dengan arus bolak-balik, maka arus dan tegangan mencapai nilai maksimum dalam waktu yang sama. Namun, bila kapasitor atau induktor dihubungkan pada rangkaian arus bolak-balik, maka arus dan tegangan mencapai nilai maksimum tidak dalam waktu yang sama. Beda sudut fase antara kedua puncak berdekatan tersebut disebut beda fase ϕ dan dinyatakan dalam derajat atau radian. Contoh, pada rangkaian induktif arus terlambat terhadap tegangan sebesar $+90^\circ$ atau $\pi/2$ radian. Pengertian beda fase 90° menyatakan beda sudut pada saat tegangan mendahului arus. Sedangkan pada rangkaian kapasitif nilai beda fase ϕ adalah -90° karena arus mendahului 90° terhadap tegangan. Hubungan fase sering kali dinyatakan secara grafis dalam diagram fasor.

Tegangan pada rangkaian induktif mendahului arus sesuai dengan yang telah dibahas dalam gejala transien bahwa untuk mencapai tegangan maksimum diperlukan waktu tertentu.

Catatan, apabila dalam rangkaian arus bolak-balik terdapat induktansi murni, tegangan dan arus mengalami perbedaan fase. Tegangan pada induktor mencapai maksimum apabila laju perubahan arus terhadap waktu maksimum pula. Untuk bentuk gelombang sinusoida seperti pada arus bolak-balik, pada saat tegangan pada induktor maksimum nilai arus pada induktor adalah nol, sehingga bertepatan dengan tegangan mendahului arus sebesar 90° . Hal sebaliknya yang terjadi pada rangkaian arus bolak-balik yang terdapat kapasitansi murni.

Sering kali fase didefinisikan sebagai suatu vektor dalam suatu bidang. Sebagai acuan untuk fase nol adalah sumbu- x positif yang dikaitkan dengan fase untuk resistor karena tegangan dan arus pada resistor adalah sefase. Panjang fasor adalah sebanding dengan besaran

yang diwakilinya, dan sudut fase menyatakan fase relatif terhadap arus yang melalui resistor.

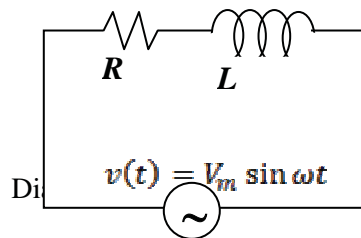
Hukum Ohm biasa digunakan untuk rangkaian yang bersifat resistif murni. Apabila pada rangkaian terdapat reaktansi induktif atau reaktansi kapasitif, maka hukum Ohm harus dituliskan mencakup Impedansi total rangkaian. Sehingga, hukum Ohm menjadi

$$I = \frac{V}{Z}$$

Hukum Ohm menyatakan hubungan bahwa arus (I), dalam ampere, adalah sebanding dengan tegangan (V), dalam volt, dibagi Impedansi (Z), dalam ohm.

Impedansi Elektris (Z), adalah “hambatan” total rangkaian pada arus bolak balik. Impedansi merupakan ukuran dalam ohm yang meliputi resistansi (R), reaktansi induktif (X_L), dan reaktansi kapasitif (X_C). Namun demikian, Impedansi total bukan merupakan penjumlahan aljabar sederhana dari resistansi, reaktansi induktif, dan reaktansi kapasitif. Karena reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif berberda fase 90 derajat terhadap fase resistansi sehingga nilai maximum terjadi pada waktu yang berberda, dan untuk penjumlahan impedansi dilakukan secara vektor.

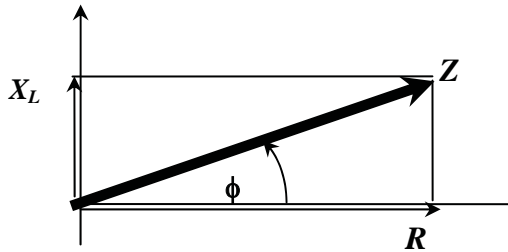
11.12. Perumusan i mpedansi rangkaian RL -seri



Impedansi untuk RL -seri adalah

$$Z = \sqrt{(R^2 + X_L^2)}$$

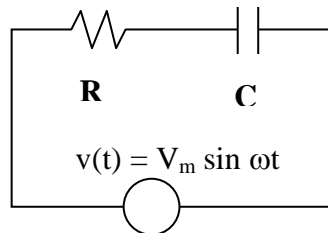
untuk $X_L = \omega L =$ reaktansi induktif [ohm].



Sudut fase impedansi terhadap arus pada rangkaian RL -seri adalah

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R} \right)$$

11.13. Perumusan Impedansi Rangkaian RC -seri



Impedansi untuk RC -seri adalah

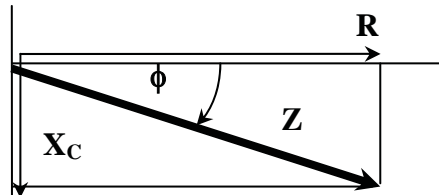
$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

untuk $X_C = \frac{1}{\omega C}$ = reaktansi kapasitif [ohm].

Sudut fase rangkaian RC -seri adalah ϕ didapat melalui

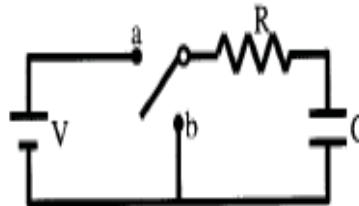
$$\tan \phi = \tan \left(\frac{-X_C}{R} \right) = \tan \left(\frac{-1}{R\omega C} \right)$$

Diagram fasor untuk rangkaian RC -seri adalah



Contoh Soal 10.18.

Suatu rangkaian RC -seri dengan $R = 100 \text{ k}\Omega$, batere dengan ggl $\varepsilon = 50 \text{ volt}$, dan kapasitor dengan $C =$



4,7 μF . Saat awal kapasitor belum bermuatan. Tentukanlah:

- Arus awal yang melalui resistor saat sakelar ditutup (posisi sakelar di a)
- Tegangan pada kapasitor 0,09 s dari sakelar ditutup.
- Setelah kapasitor termuati secara penuh, sakelar dilepas, baterai tersambung, tentukan muatan pada kapasitor setelah 0,47 s dari dilepasnya baterai tersebut.

Penyelesaian

- Arus awal yang melalui resistor saat sakelar ditutup

$$V = RI_0$$

$$I_0 = \frac{V}{R} = \frac{50 \text{ volt}}{100 \Omega} = \boxed{5 \times 10^{-4} \text{ A}}$$

- Tegangan pada kapasitor 0,09 s dari sakelar ditutup

$$Q(t) = Q_{\max}(1 - e^{-t/RC}) = CV(1 - e^{-t/RC})$$

$$Q(t) = CV(t)$$

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C} = V(1 - e^{-t/RC})$$

$$V(t) = (50 \text{ volt})(1 - e^{-(0,09\text{s})/(100 \times 10^3 \Omega)(4,7 \times 10^{-6} \text{ F})})$$

$$V(t = 0,09\text{s}) = \boxed{8,71 \text{ volt}}$$

- Persamaan untuk saat pelepasan muatan pada kapasitor adalah

$$Q(t) = Q_{\max} e^{-t/RC} = CV e^{-t/RC}$$

$$Q(0,47\text{s}) = (4,7 \times 10^{-6} \text{ F})(50 \text{ volt}) \times e^{-(0,47\text{s})/(100 \times 10^3 \Omega)(4,7 \times 10^{-6} \text{ F})}$$

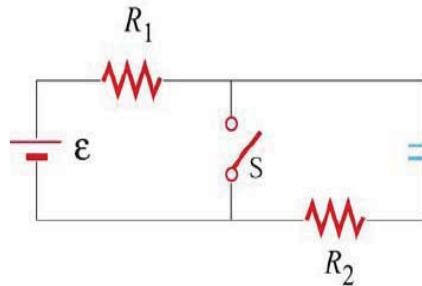
$$Q(0,47\text{s}) = \boxed{8,65 \times 10^{-5} \text{ C}}$$

Contoh Soal 10.19.

Tinjau rangkaian RC-seri dengan dua resistor R_1 dan R_2 dan satu kapasitor C disambungkan dengan baterai ε oleh sakelar S . Keadaan awal sakelar S terbuka, saat $t = 0$, sakelar ditutup

- tetapan waktu saat sakelar belum ditutup
- tetapan waktu saat sakelar sudah ditutup
- arus yang melewati sakelar S sebagai fungsi waktu setelah sakelar ditutup.

Penyelesaian:



Sebelum sakelar ditutup, terlihat dua resistor dan satu kapasitor tersambung seri, sehingga tetapan waktu adalah

$$\tau_{\text{sebelum}} = R_{12}C = (R_1 + R_2)C$$

Jumlah muatan yang disimpan dalam kapasitor sesuai dengan

$$Q(t) = C\varepsilon(1 - e^{-t/R_{12}C})$$

Setelah sakelar ditutup maka terjadi pelepasan muatan kapasitor oleh resistor R_2 sehingga tetapan waktu menjadi $\tau' = R_2C$. Muatan mulai meluruh sesuai dengan

$$Q(t) = C\varepsilon e^{-t/R_2C}$$

sehingga arus yang mengalir pada sakelar adalah

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{-C\varepsilon}{R_2C} e^{-t/R_2C}$$

11.14. Perumusan Impedansi Rangkaian RLC -seri

Besar impedansi RLC -seri adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Bila diasumsikan $X_L > X_C$ sehingga $X_L - X_C > 0$ (positif, seperti pada diagram fasor)

Sudut fase rangkaian RLC -seri adalah

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right)$$

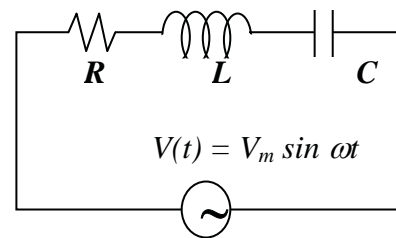
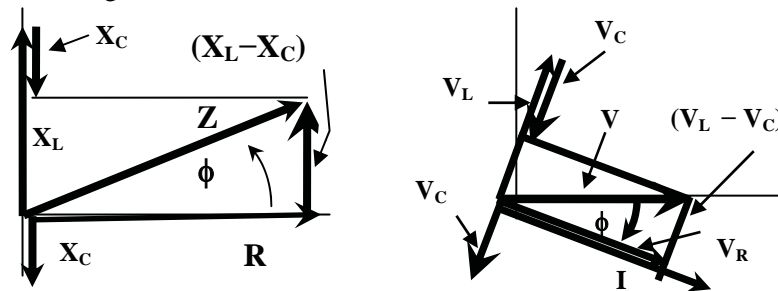


Diagram fasor untuk impedansi maupun tegangan (dalam skala berberda) untuk rangkaian RLC seri adalah



11.15. Resonansi pada Rangkaian RLC–seri

Kondisi resonansi dapat terjadi dalam rangkaian RLC–seri apabila saat itu nilai arus pada rangkaian mencapai nilai maksimum. Padahal nilai arus bergantung pada impedansi rangkaian. Jadi, apa makna resonansi dalam kaitannya dengan kondisi rangkaian RLC–seri beserta tegangan sumbernya?

Tinjau rumusan untuk impedansi pada rangkaian RLC–seri, yaitu

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

sedangkan arus maksimum dalam rangkaian sesuai hukum Ohm adalah

$$I_m = \frac{V_m}{Z}$$

artinya, karena impedansi rangkaian RLC–seri bergantung pada frekuensi sudut sumber tegangan, yaitu ω , maka nilai arus maksimum dalam rangkaian, yaitu I_m juga bergantung pada ω . Sehingga arus maksimum I_m hanya dapat mencapai nilai maksimum bila impedansi rangkaian Z memiliki nilai minimum.

Dari rumusan impedansi rangkaian RLC–seri, tampaklah bahwa kondisi resonansi pada rangkaian terjadi apabila:

- Impedansi mencapai nilai minimum:
- $Z = R$ yang berarti impedansi rangkaian RLC–seri sama dengan resistansi total rangkaian.
- $X_L = X_C$ yang berarti besarnya reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif rangkaian, sehingga frekuensi sudut kondisi resonansi adalah

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{atau} \quad \omega_{\text{resonansi}} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

- (d) Sudut fase rangkaian RLC -seri adalah $\phi = 0$, karena $\tan \phi = 0$, sesuai dengan

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) = \tan^{-1} 0 = 0$$

- (e) Faktor Daya mencapai nilai maksimum, yaitu $\cos \phi = \cos 0 = 1$

- (f) Daya rerata dalam rangkaian juga mencapai nilai maksimum sesuai dengan rumusan bahwa besar sudut fase ϕ terkait dengan besaran daya rerata melalui

$$P_{\text{rerata}} = \frac{1}{2} I_m V_m \cos \phi = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos \phi = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos \phi$$

sedangkan nilai maksimum tegangan rms atau biasa disebut tegangan efektif pada resistor adalah

$$V_{R.\text{maks}} = V_{Rm} = V_m \cos \phi$$

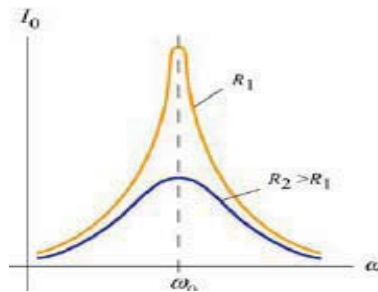
atau

$$V_{R.\text{ef}} = V_{\text{ef}} \cos \phi$$

$$P_{\text{rerata}} = \frac{1}{2} I_m V_{Rm} = I_{\text{rms}} V_{R.\text{rms}} = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}}$$

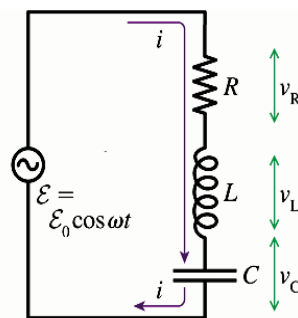
artinya, daya rerata pada resistor atau pada rangkaian mencapai nilai maksimum pula.

Hubungan antara arus maksimum terhadap frekuensi menunjukkan bahwa adanya kapasitor akan memotong frekuensi rendah dan sedangkan adanya induktor memotong frekuensi tinggi. Frekuensi pada saat terjadinya arus maksimum disebut “frekuensi resonansi”.



11.16. Ringkasan Rangkaian RLC -seri dalam Arus Bolak Balik

Tinjau suatu rangkaian seri terdiri atas resistor, induktor dan kapasitor yang biasa disebut rangkaian RLC -seri seperti pada gambar. Sesuai dengan hukum kedua Kirchhoff untuk lop tertutup maka



$$\varepsilon = v_R + v_L + v_C$$

Karena adanya elemen induktif dan kapasitif dalam rangkaian sehingga pada umumnya antara arus dengan tegangan tidak sefase. Bila tegangan sumber adalah

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t$$

Maka arus sesaat (yang berubah terhadap waktu) dapat ditulis

$$i = \varepsilon_m \cos(\omega t - \phi)$$

yang berarti bahwa ϕ adalah sudut fase antara arus i terhadap tegangan sumber ε . Artinya, bila $v_L > v_C$ maka arus i terlambat terhadap ε dan diperoleh nilai $\phi > 0$.

Sebaliknya, apabila $v_L < v_C$ maka arus i mendahului tegangan sumber ε , dan menghasilkan nilai sudut fase $\phi < 0$.

Sesuai dengan diagram fase terhadap fasor rangkaian RLC-seri, maka

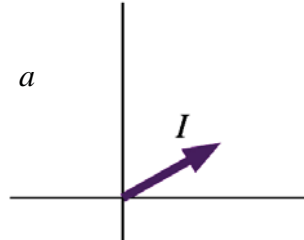
$$\varepsilon_m^2 = v_R^2 + (v_L - v_C)^2$$

$$\varepsilon_m^2 = [R^2 + (X_L - X_C)^2] I^2$$

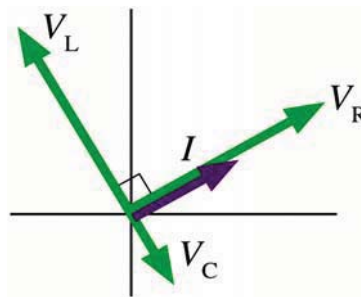
$$I = \frac{\varepsilon}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Berikut adalah telaah Diagram pada Rangkaian RLC-seri dalam Arus Bolak Balik (ac)

Gambar (a) di samping adalah menggambarkan vektor arus I pada sembarang sudut atau sembarang waktu. Semua elemen R , L dan C memiliki arus yang sama, sesuai dengan kaidah rangkaian seri.



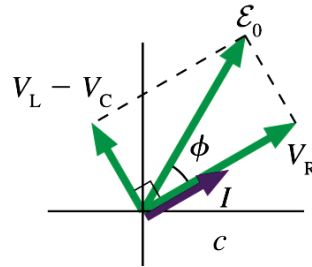
Gambar (b) di samping adalah menggambarkan tegangan pada resistor V_C sefase dengan arus I pada rangkaian. Juga ditunjukkan tegangan pada induktor V_L yang 90° mendahului fase arus I . Sedangkan tegangan pada kapasitor V_C memiliki fase yang 90° tertinggal terhadap fase arus I . sembarang



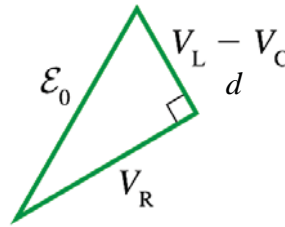
b

sudut atau sembarang waktu. Semua elemen R , L dan C memiliki arus yang sama, sesuai dengan kaidah rangkaian seri.

Gambar (c) di samping adalah menggambarkan tegangan sumber ϵ_0 merupakan resultan dari tegangan pada resistor V_R dengan $V_L - V_C$. Sudut fasor ωt menyatakan perubahan gaya gerak listrik (GGL) bergantung terhadap waktu melalui $\epsilon_m \cos \omega t$.



Gambar (d) di samping adalah menggambarkan fasor V_R dan $V_L - V_C$ membentuk segitiga siku siku dengan ϵ_m sebagai sisi miring. Sehingga berlaku $\epsilon_m^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$.



Contoh Soal 10.20.

Suatu rangkaian RLC -seri dihubungkan dengan generator arus bolak balik yang memiliki tegangan maksimum 125 volt dan arus maksimum 3,20 A. Ternyata fase arus mendahului 60° terhadap fase tegangan sumber.

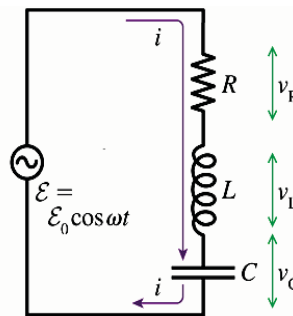
Tentukan

- Impedansi rangkaian RLC -seri tersebut.
- Resistansi dalam rangkaian.
- Apakah rangkaian lebih bersifat induktif atau kapasitif

Penyelesaian:

- Gunakan hukum Ohm untuk Arus Bolak Balik, yaitu

$$Z = \frac{\epsilon_m}{I_m} = \frac{125 \text{ volt}}{3,20 \text{ A}} = 39,1 \Omega$$



- b. Karena diketahui bahwa fase arus mendahului 60° artinya bila tegangan sesaat pada sumber adalah

$$v(t) = V_m \sin(\omega t)$$

maka arus sesaat pada rangkaian

RLC -seri adalah

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \phi) = I_m \sin(\omega t - 60^\circ)$$

sehingga nilai sudut fase memenuhi hubungan

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

$$R \tan \phi = R \tan 60^\circ = R (1,73) = X_L - X_C$$

Impedansi pada rangkaian RLC -seri adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2 = R^2 + (R \tan \phi)^2 = R^2(1 + \tan^2 \phi)$$

$$Z^2 = R^2 (1 + 1,73^2)$$

$$R = \frac{Z}{\sqrt{(1 + 1,73^2)}} = \frac{39,1}{\sqrt{1 + 3}} = 19,55 \Omega$$

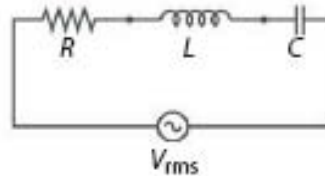
- c. Karena nilai X_L lebih kecil dibandingkan dengan X_C maka dikatakan bahwa rangkaian bersifat kapasitif.

Contoh Soal 10.21.

Tinjau rangkaian RLC -seri yang terdiri atas resistor $R = 8 \Omega$; $L = 2$ mH dan $C = 500 \mu\text{F}$ dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik yang memiliki tegangan rms 6 volt dan frekuensi 700 Hz.

Tentukan:

- Tuliskan persamaan *loop* untuk rangkaian.
- Gambarkan diagram fasor untuk tegangan dalam rangkaian tersebut.
- Nilai rms untuk arus pada rangkaian.
- Jelaskan hubungan antara fase arus sesaat terhadap tegangan yang dikenakan pada rangkaian.

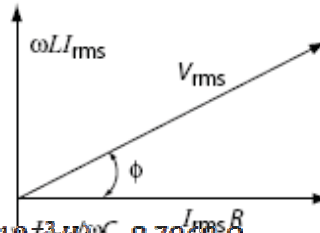


Penyelesaian:

- a. Persamaan hukum kedua Kirchhoff untuk *loop* dalam rangkaian adalah

$$V - IR - L \frac{di}{dt} - \frac{Q}{C} = 0$$

- b. Untuk menggambarkan diagram fasor rangkaian tersebut adalah



$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2\pi(700 \text{ Hz})(2 \times 10^{-2} \text{ H}) = 8,7968 \Omega$$

Reaktansi kapasitif adalah

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(700 \text{ Hz})(5 \times 10^{-4} \text{ H})} = 0,4547 \Omega$$

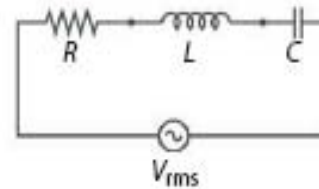
Impedansi total pada rangkaian adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{8^2 + (8,7968 \Omega - 0,4547 \Omega)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{64 + (8,7968 \Omega - 0,4547 \Omega)^2}$$

Contoh Soal 10.22.

Suatu rangkaian *RLC*-seri dengan resistor $R = 5 \Omega$; induktor $L = 40 \text{ mH}$ dan kapasitor $C = 300 \text{ nF}$, dihubungkan dengan sumber tegangan yang memiliki frekuensi 1000 Hz .



Tentukan

- Reaktansi induktif, reaktansi kapasitif dan reaktansi total rangkaian.
- Gambarkan diagram impedansi

Penyelesaian:

- a. Reaktansi induktif adalah

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2\pi(1000 \text{ Hz})(40 \times 10^{-3} \text{ H}) = 251,3 \Omega$$

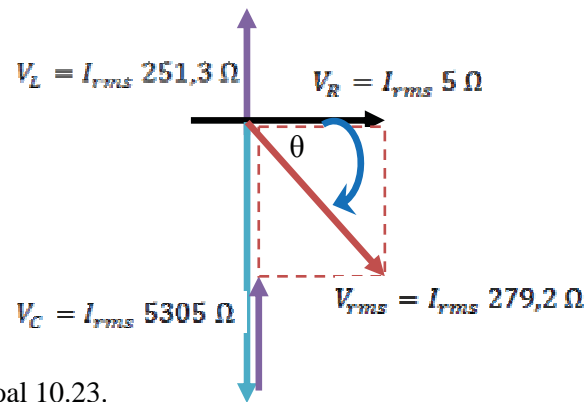
Reaktansi kapasitif adalah

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1000 \text{ Hz})(300 \times 10^{-9} \text{ H})} = 530,5 \Omega$$

Impedansi total pada rangkaian adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{5^2 + (251,3 \Omega - 530,5 \Omega)^2}$$

$$Z = 67,17 \Omega$$



Contoh Soal 10.23.

Pada rangkaian arus bolak balik bila frekuensi bertambah besar sedangkan nilai maksimum gaya gerak listrik (GGL) ε konstan, maka kecerahan lampu dengan resistansi R menjadi

- Berkurang
- Bertambah**
- Tidak berubah
- Perubahan hanya bergantung pada induktor L .

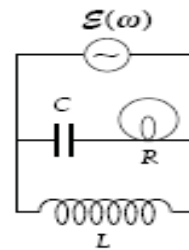
Penjelasan: Reaktansi kapasitif $X_C = 1/\omega C$ bila frekuensi bertambah besar X_C berku-rangkaian.

Dalam hubungan paralel maka beda potensial seri dan L sama besar, sehingga arus pada RC -seri lebih besar.

Contoh Soal 10.24.

Suatu rangkaian RLC -seri dengan nilai kapasitansi 1 pF , dihubungkan dengan generator yang memiliki nilai tegangan rms 10 volt . Bila rangkaian mengalami resonansi pada frekuensi sudut $\omega_0 = 10^7 \text{ 1/s}$.

- Tentukan induktansi
- Jika tegangan pada kapasitor adalah 100 volt , tentukan nilai arus rms.
- tentukan resistansi.



RC -

Penyelesaian:

Keadaan resonansi dengan frekuensi sudut

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Induktansi L

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{\left(10^7 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 (10^{-12} \text{ F})} = 0,01 \text{ H}$$

Tegangan rms pada kapasitor

$$V_{C,rms} = I_{C,rms} X_C = I_{C,rms} \left(\frac{1}{\omega C}\right)$$

Arus rms pada kapasitor

$$I_{C,rms} = V_{C,rms} (\omega C) = (100 \text{ volt}) \left(10^7 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) (10^{-12} \text{ F}) = 0,001 \text{ A}$$

pada keadaan resonansi $Z = R$ Tegangan rms $\varepsilon = IZ = IR$

$$R = \frac{\varepsilon}{I} = \frac{10 \text{ volt}}{0,001 \text{ A}} = 10.000 \Omega = 10 \text{ k}\Omega$$

Contoh Soal 10.25.

Dalam rangkaian RLC -seri nilai tegangan pada induktor lebih besar daripada tegangan pada kapasitor. Untuk meningkatkan arus dapat dilakukan untuk

- Memperbesar frekuensi generator
- Memperbesar kapasitansi
- Memperbesar induktansi
- d. Memperkecil induktansi dan kapasitansi**

Penjelasan:

- Memperbesar frekuensi generator

Memperbesar frekuensi, berarti reaktansi induktif $X_L = \omega L = 2\pi fL$

akan makin besar sedangkan reaktansi kapasitif $X_C = \frac{1}{\omega L} = \frac{1}{2\pi fC}$

semakin kecil. Artinya, $X_L - X_C$ semakin besar. Karena impedansi total

$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ juga makin besar, maka arus $I =$

- Memperbesar kapasitansi
- Memperbesar induktansi
- d. Memperkecil induktansi dan kapasitansi**

RANGKUMAN

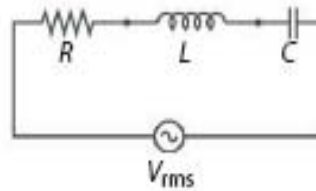
- a. Resistor merupakan elemen listrik yang memakai energi listrik yang diterimanya menjadi energi panas. Artinya energi yang dilewatkan pada resistor akan hilang, tidak dapat kembali pada rangkaian listrik tersebut.
- b. Induktor merupakan elemen listrik yang memiliki kemampuan menyimpan energi listrik yang melewatinya. Artinya bila suatu induktor telah dilewati arus listrik, maka induktor akan menyimpan sebagian energi listrik yang diterimanya tersebut. Nanti sebagian energi tersebut dapat dipulihkan kembali kepada rangkaian listrik tersebut apabila arus sudah tidak mengalir. Induktor juga dapat sebagai filter karena memiliki impedansi yang bergantung frekuensi. Bila frekuensi arus atau tegangan yang lewat besar maka impedansi induktor besar pula. Artinya induktor akan menghalanginya. Sebaliknya bila frekuensi arus atau tegangan yang lewat rendah, maka impedansi induktor juga rendah dan induktor meloloskan arus tersebut.
- c. Kapasitor memiliki sifat yang serupa dengan induktor, yaitu mampu menyimpan energi listrik yang mengenainya. Namun impedansi untuk kapasitor adalah kebalikan dari impedansi induktor. Sehingga prinsip kerjanya juga berkebalikan. Cobalah berikan uraiannya.
- d. Resonansi merupakan gejala pencapaian nilai arus maksimum dalam suatu rangkaian yang dikenai arus bolak balik. Prinsip kerja radio adalah merupakan penerapan gejala resonansi tersebut. Berbagai kondisi yang terkait dengan gejala resonansi misal adalah rangkaian memiliki daya maksimum, rangkaian memiliki faktor daya maksimum atau satu, atau Impedansi kapasitif sama dengan impedansi induktif atau impedansi total sama dengan resistansi rangkaian atau juga impedansi rangkaian adalah minimum.

Soal-soal:

1. Suatu rangkaian RLC -seri dihubungkan dengan generator arus bolak-balik yang memiliki tegangan maksimum 250 volt dan arus maksimum 3,20 A. Ternyata fase arus mendahului 60° terhadap fase tegangan sumber. Tentukan
 - a. Impedansi rangkaian RLC -seri tersebut.
 - b. Resistansi dalam rangkaian.
 - c. Apakah rangkaian lebih bersifat induktif atau kapasitif
[Jawab: a. 78.2Ω ; b. 39.1Ω ; c. bersifat kapasitif]

2. Suatu rangkaian RLC -seri dengan nilai kapasitansi 1 pF, dihubungkan dengan generator yang memiliki nilai tegangan rms 20 volt. Bila rangkaian mengalami resonansi pada frekuensi sudut $\omega_0 = 10^7$ 1/s.
 - a. Tentukan induktansi
 - b. Jika tegangan pada kapasitor adalah 100 volt, tentukan nilai arus rms.
 - c. Tentukan resistansi.
[Jawab: a. $0,01 H$; b. $0,001 A$; c. $20 K\Omega$]

3. Suatu rangkaian RLC -seri dengan resistor $R = 5 \Omega$; induktor $L = 40$ mH dan kapasitor $C = 300$ nF, dihubungkan dengan sumber tegangan yang memiliki frekuensi 1000 Hz. Tentukan
 - a. Reaktansi induktif, reaktansi kapasitif dan reaktansi total rangkaian.
 - b. Gambarkan diagram impedansi



[Jawab: a. $251,3 \Omega$; $530,5 \Omega$; $63,17 \Omega$]

11.15. SOAL UJI KOMPETENSI

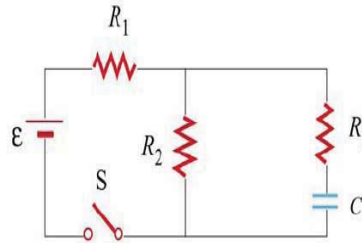
Soal 11.1

Diketahui $\varepsilon = 40 \text{ V}$; $R_1 = 8 \Omega$; $R_2 =$

6Ω $R_3 = 4 \Omega$ dan $C = 4 \mu\text{F}$

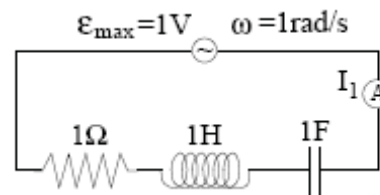
Saat awal kapasitor tidak bermuatan.

- Bila saat $t = 0$, tentukan arus pada setiap cabang sesaat setelah sakelar ditutup.
- Tentukan muatan akhir pada kapasitor



Soal 11.2

Tentukan amplitudo arus dalam rangkaian berikut



Soal 11.3

Tinjau rangkaian RLC -seri dengan Induktansi $L = 88 \text{ mH}$; kapasitansi $C = 0,94 \mu\text{F}$ dan resistor R yang belum diketahui nilai resistansinya. Rangkaian RLC -seri tersebut dihubungkan dengan generator arus bolak balik (ac)

dengan $\varepsilon = \varepsilon_{\text{max}} \cos(\omega t)$ dan amplitudo tegangan $\varepsilon_{\text{max}} = 24 \text{ V}$; frekuensi $f = 930 \text{ Hz}$ dan sudut fase $\delta = 75^\circ$. Tentukan

- resistansi R
- amplitudo arus I_{max}
- energi maksimum yang tersimpan dalam induktor
- energi maksimum yang tersimpan dalam kapasitor
- waktu t_1 yang diperlukan untuk mencapai arus maksimum I_{max}
- waktu t_2 yang diperlukan untuk mencapai muatan maksimum pada kapasitor Q_{max}

DAFTAR PUSTAKA

Tippler, Paul A, 1998, **Fisika Untuk Sains dan Teknik**, Alih Bahasa Lea Prasetio, Rahmat W Adi, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Douglas C Giancoli, **FISIKA**, Jilid 1 Edisi 5, Alih Bahasa Yulhiza Hanum, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Marthen Kanginan, 2006, **Fisika Untuk SMA Kelas IX,X, dan XI-**, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Raymond Serway, et. al, **Physics for Scientists and Engineers**, Saunders College Publishing, New york.

Dosen-Dosen Fisika FMIPA ITS, 1998, **Diktat Fisika Dasar I**, Yanasika ITS.

Lawrence H Van Vlack, **“Elements of Materials Science and Engineering”** Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1985

William D Callister Jr, **“Materials Science and Engineering” An Introduction**, John Willey and Sons, Singapore, 1986

O’Dwyer, John J, 1984, **College Physics**, Wadsworth, Inc, USA

Lawrence H Van Vlack, **“Elements of Materials Science and Engineering”** Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1985

William D Callister Jr, **“Materials Science and Engineering” An Introduction**, John Willey and Sons, Singapore, 1986

Dikmenjur, *Bahan Ajar Modul Manual Untuk SMK Bidang Adaptif Mata Pelajaran Fisika*, 2004

Glosarium

Akurasi: Berkaitan dengan ketepatan, hasil pengukuran yang mendekati nilai sebenarnya.

Angka penting: Angka-angka hasil pengukuran yang terdiri dari angka pasti dan angka taksiran.

Besaran: Sesuatu yang memiliki kuantitas/nilai dan satuan.

Besaran pokok: Besaran yang satuannya didefinisikan sendiri melalui konferensi internasional.

Besaran turunan: Besaran-besaran yang satuannya diturunkan dari besaran pokok.

Dimensi: Salah satu bentuk deskripsi suatu besaran.

Jangka sorong: Alat ukur panjang dengan nonius geser, umumnya memiliki ketelitian hingga 0,1 mm atau 0,05 mm.

Kilogram (kg) Satuan SI untuk massa.

Massa benda: Jumlah materi yang terkandung dalam suatu benda.

Meter (m): Satuan SI untuk panjang.

Mikrometer sekrup: Alat ukur panjang dengan nonius putar, umumnya memiliki ketelitian hingga 0,01 mm.

Neraca lengan: Alat ukur massa.

Neraca pegas: Alat ukur gaya, termasuk gaya berat.

Newton (N): Satuan SI untuk gaya.

Nonius: Skala tambahan yang membagi skala utama menjadi nilai/kuantitas lebih kecil.

Panjang: Jarak antara dua titik.

Paralaks: Kesalahan yang terjadi karena pemilihan posisi atau sudut pandang yang tidak tegak lurus.

Pengukuran: Kegiatan membandingkan suatu besaran dengan besaran lain sejenis yang digunakan sebagai satuan.

Presisi: Berkaitan dengan ketelitian, pengukuran yang mengandung ketidakpastian kecil.

Sekon: Satuan SI untuk waktu.

Skala terkecil: Skala pada alat ukur yang nilainya paling kecil, dibatasi oleh dua garis skala yang paling dekat.

SI Sistem Internasional: sistem satuan yang berbasis sistem metrik.

Stopwatch: Alat pengukur waktu.

Termometer: Alat pengukur temperatur.

Waktu: Selang antara dua kejadian atau peristiwa.

Besaran: Sesuatu yang dapat diukur dan dinyatakan dengan angka.

Besaran scalar:

- Besaran yang cukup dinyatakan dengan suatu angka.
- Besaran yang hanya memiliki besar (nilai) saja.

Besaran vector:

- Besaran yang harus dinyatakan dengan suatu angka dan arah
- Besaran yang memiliki arah dan besar (nilai)

Gerak jatuh bebas: Gerak suatu benda yang dijatuhkan dari suatu ketinggian tanpa kecepatan awal

Gerak lurus beraturan: Gerak benda pada garis lurus yang pada selang waktu sama akan menempuh jarak yang sama.

Gerak lurus berubah beraturan: Gerak benda yang lintasannya pada garis lurus dengan perubahan kecepatan tiap selang waktu adalah tetap.

Gerak vertical: Gerak suatu benda pada arah vertikal terhadap tanah, yang selama geraknya benda itu dipengaruhi oleh gaya gravitasi bumi.

Gerak vertikal ke atas: Gerak benda yang dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal tertentu. Pada kasus gerak vertical ke atas terdapat dua kejadian yaitu gerak vertical naik dan gerak vertical turun.

Gerak vertikal ke bawah: Gerak benda yang dilempar vertikal ke bawah dengan kecepatan awal tertentu

Gradien: Kemiringan suatu garis/kurva

Jarak: Panjang lintasan sesungguhnya yang ditempuh oleh suatu benda dalam waktu tertentu, dan tidak bergantung pada arah sehingga jarak selalu memiliki tanda positif (+).

Kedudukan: Letak suatu materi yang dinyatakan terhadap suatu titik sembarang (titik acuan).

Kuadran: Daerah pada sumbu koordinat yaitu di atas sumbu x positif dan di sebelah kanan sumbu y positif.

Lintasan:

- Jalan yang dilalui suatu materi/benda yang bergerak.
- Titik berurutan yang dilalui suatu benda yang bergerak.

Percepatan: Penambahan kecepatan per satuan waktu.

Perpindahan: Perubahan kedudukan awal dan akhir suatu benda karena adanya perubahan waktu dan tidak bergantung pada jalan mana yang ditempuh oleh benda.

Pewaktu ketik (ticker timer): Alat yang dapat digunakan untuk menentukan kelajuan sesaat dan percepatan suatu benda yang bergerak.

Titik acuan: Titik pangkal pengukuran.

Perlambatan: Pengurangan kecepatan per satuan waktu.

Gerak melingkar beraturan Gerak yang lintasannya melingkar dengan kelajuan konstan.

Kecepatan linier: Kecepatan gerak melingkar yang arahnya selalu tegak lurus jari-jari lingkaran.

Kecepatan sudut: Perpindahan sudut persatuan waktu

Percepatan sentripetal: Perubahan kecepatan persatuan waktu pada gerak melingkar yang arahnya selalu ke pusat lingkaran.

Gaya sentripetal: Gaya yang mengakibatkan percepatan sentripetal.

Percepatan sentrifugal: Percepatan yang dihasilkan adanya gaya sentrifugal.

Gaya sentrifugal: Gaya inersial yang besarnya sama dan arahnya berlawanan dengan gaya sentripetal. Berdasarkan hukum III Newton gaya sentrifugal dan gaya sentripetal merupakan pasangan gaya aksi dan reaksi.

Kelembaman: Mempertahankan dalam keadaan semula baik dalam keadaan bergerak maupun diam.

Gaya Merupakan besaran vektor yang mempunyai nilai besar dan arah, misalnya berat mempunyai nilai 10 m/s^2 arahnya menuju ke pusat bumi.

Gaya aksi: Gaya yang diberikan oleh benda pertama kepada benda kedua.

Gaya reaksi: Gaya yang diberikan benda kedua sebagai akibat adanya gaya oleh benda pertama, yang mempunyai besar sama dengan gaya aksi tetapi arahnya berlawanan.

Percepatan: Merupakan vektor yang dapat menyebabkan kecepatan berubah seiring perubahan waktu.

Gaya Normal: Gaya yang ditimbulkan oleh suatu benda pada suatu bidang dan bidang memberikan gaya reaksi yang besarnya sama dengan berat benda yang arahnya tegak lurus bidang.

Gaya Gesek: Merupakan gaya akibat dari gesekan dua buah benda atau lebih yang arah berlawanan dengan arah gerak benda.

Koefisien gesek: Perbandingan antara gaya gesek dengan gaya normal.

Massa: Jumlah materi yang dikandung suatu benda.

Berat: Merupakan gaya yang disebabkan adanya tarikan bumi, sehingga arahnya menuju ke pusat dan besarnya merupakan perkalian antara massa dan percepatan gravitasi.

Usaha: Hasil kali besar perpindahan dengan komponen gaya yang sejajar dengan perpindahan benda.

Gaya: Suatu tarikan atau dorongan yang dapat mengakibatkan perubahan bentuk dan arah gerak pada suatu benda.

Perpindahan: Perubahan kedudukan suatu benda karena mendapat pengaruh gaya.

Joule: Satuan energi dalam MKS atau SI.

Erg: Satuan energi dalam CGS.

Daya: Usaha persatuan waktu.

Watt: Salah satu satuan daya.

Pk: Satuan daya kuda.

Energi Potensial: Energi yang dimiliki oleh suatu benda karena kedudukannya.

Energi Kinetik: Energi yang dimiliki oleh suatu benda karena kecepatannya.

Energi Mekanik: Penjumlahan antara energi potensial dengan energi kinetik pada sistem tertentu.

Gaya Konservatif: Gaya yang tidak bergantung pada lintasannya namun hanya pada posisi awal dan akhir.

Gaya non Konservatif: Gaya yang bergantung pada lintasannya.

Momentum: Ukuran kesukaran untuk memberhentikan suatu benda yang sedang bergerak.

Impuls: Perubahan momentum yang dialami benda.

Koefisien Restitusi: Ukuran Kelentingan atau elastisitas suatu

Arus Listrik Searah : Jumlah muatan positif yang mengalir dalam suatu bahan atau media per satuan waktu dari suatu titik yang memiliki potensial listrik tinggi ke titik yang berpotensi listrik rendah.

Medan Listrik: Besar Medan Listrik disuatu titik P didefinisikan sebagai besar gaya listrik per satuan muatan di titik P tersebut.

Resistor merupakan salah satu elemen listrik yang memiliki sifat mengubah energi listrik menjadi energi panas. Sehingga energi listrik tersebut tidak dapat dipulihkan menjadi energi listrik kembali secara langsung.

Resistansi merupakan sifat intrinsik suatu bahan yang memberikan hambatan terhadap aliran muatan listrik di dalam suatu bahan atau materi.

Resistivitas merupakan sifat suatu bahan untuk memberikan hambatan terhadap laju aliran muatan listrik di dalam suatu bahan. Resistivitas merupakan sifat intrinsik yang tidak bergantung pada ukuran dan berat benda.

Beda Potensial Listrik: dapat dimengerti secara lebih mudah dengan cara sebagai berikut Bila diantara dua titik memiliki Beda Potensial sebesar satu volt, berarti bahwa untuk memindahkan muatan satu Coulomb diantara kedua titik tersebut diperlukan energi sebesar satu joule.

Kecepatan derip merupakan nilai laju total perjalanan muatan di dalam suatu bahan atau materi.

Dielektrik: zat yang dapat digunakan untuk memperbesar kapasitas kapasitor

Kapasitor: piranti elektronik yang terbuat dari dua buah bahan konduktor dan berfungsi untuk menyimpan energi.

Permitivitas: kemampuan suatu bahan untuk menerima fluks listrik

Generator Listrik pada arus bolak balik merupakan sumber tegangan yang digunakan memberikan aliran arus listrik bolak balik. Pengertian bolak balik terkait dengan nilai arus atau tegangan yang dihasilkan selalu berubah terhadap waktu secara sinusoida. Tegangan yang dihasilkan bernilai $+V_{\text{maks}}$ sampai dengan $-V_{\text{maks}}$. Atau kalau yang dihasilkan generator adalah arus listrik maka akan bernilai antara $+I_{\text{maks}}$ sampai dengan $-I_{\text{maks}}$.

Arus listrik bolak balik dapat dihasilkan oleh adanya jumlah fluks magnet yang dilingkupi oleh suatu kumparan. Agar proses perubahan fluks magnet tersebut dapat dilakukan secara berulang maka digunakan sistem pemutaran terhadap kumparan tersebut. Hal ini pulalah yang mengakibatkan arus atau tegangan yang dihasilkan adalah sinusoida.

Hukum Kirchhoff dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu Hukum Kesatu Kirchhoff yang menyatakan bahwa muatan yang masuk suatu titik cabang adalah kekal. Artinya jumlah muatan yang masuk sama dengan jumlah muatan yang keluar. Rumusan ini banyak digunakan menyelesaikan soal dengan tipe rangkaian sederhana. Tetapi bila terkait dengan rangkaian yang rumit, dapat digunakan hukum kedua Kirchhoff. Hukum kedua Kirchhoff pada prinsipnya merupakan penerapan hukum kekekalan energi listrik dalam suatu rangkaian. Artinya energi yang diberikan oleh baterai atau suatu sumber energi listrik maka seluruhnya akan digunakan oleh rangkaian tersebut.

Gaya gerak listrik (GGL) merupakan kemampuan suatu bahan untuk memberikan beda potensial contohnya adalah baterai. Artinya bila kedua ujung baterai dihubungkan dengan suatu resistor maka akan terdapat beda potensial pada kedua ujung resistor tersebut. Hal ini berarti baterai memberikan energi pada resistor yaitu untuk menggerakkan muatan listrik di dalam resistor.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ISBN 978-602-8320-23-8
ISBN 978-602-8320-25-2

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk digunakan dalam Proses Pembelajaran.

HET (Harga Eceran Tertinggi) Rp.14,762,00