

# BAB -16

## LISTRIK

Listrik merupakan salah satu gaya pokok di alam, di analogikan dengan gaya gravitasi. Jika gaya gravitasi terbentuk antara dua objek yang bergantung pada massa objek tersebut, sedangkan gaya listrik diantara dua yang bergantung pada muatannya. Muatan adalah properti dasar dari dua partikel elementer ( electron dan proton ) yang biasanya menjadi penyusun nyaris semua bahan yang ada di alam. Pada kenyataannya, hal itu adalah gaya listrik yang dibentuk oleh protan dan elektron dalam atom.

Aplikasi dari kegunaan dari listrik adalah dibuat berdasar kemampuan untuk menghasilkan dan mengolah aliran muatan partikel. Pada bagian ini kita akan membahas prinsip-prinsip listrik untuk memahami peralatan seperti radiasi sinar-x dan sinar katoda.

### 1.1 Gaya Fundamental

Semua gaya yang telah dibahas dalam buku ini, seperti gaya gesek, daya, dan tegangan permukaan yang merupakan hasil pengamatan dari terapan gaya antara dua atom. Pengamatan terhadap gaya ini tidak berdasarkan penyebab dasarnya, pada prinsipnya mereka dapat di analisis dari gaya yang pada atom. Meskipun gaya antara atom bukan merupakan gaya fundamental, tetapi dapat dianalisis lebih lanjut dengan gaya antara partikel yang menyusun atom.

Terdapat tiga jenis partikel penyusun atom yaitu proton, neutron dan elektron. Proton dan neutron tepat berada pada pusat atom atau inti (nucleus) atom. Pada nucleus terkandung 99.95% massa atom, tetapi hanya menempati sebagian kecil volume dari atom. Elektron mengelilingi nucleus pada orbitnya, yang hanya mengandung 0.05% dari massa atom namun nyaris menempati keseluruhan volume atom.

Karena proton, neutron dan elektron tidak memiliki komposisi selagi masih berupa partikel kecil, mereka disebut partikel elementer dan dengan gaya yang terbentuk berupa gaya fundamental di alam. Seluruh bahan yang ada di alam ini biasanya tersusun dari partikel elementer, dan demikian pula dengan gayanya dapat dimengerti dengan memahami gaya elemental antar partikel-partikel tersebut. Sekarang ini terdapat 4 gaya fundamental yang kita ketahui:

1. Gaya gravitasi
2. Gaya elektromagnetik
3. Gaya nuklir
4. Gaya lemah

Gaya gravitasi adalah gaya yang paling lemah diantara empat gaya fundamental karena jangkauan dari gravitasi antara dua partikel lebih kecil daripada jangkauan gaya fundamental yang lain. Gaya gravitasi antara partikel elementer sangat lemah, buktinya tidak dapat diukur efek dari kelakuan partikel dalam atom ini. Hanya pada objek dengan ukuran astronomis dengan massa yang cukup dapat menimbulkan gaya gravitasi dalam atom. Karena gaya ini bersifat menarik, seperti partikel menarik atom pada wilayah sekitarnya. Pertumbuhan atom menimbulkan peningkatan massa partikel, maka gaya gravitasi dapat terbentuk akibat pertumbuhan. Sebagai konsekuensinya partikel akan menarik lagi atom dan mengakibatkan jumlahnya terus bertambah. Hal ini menjelaskan betapa besar sekali jumlah suatu material, seperti bintang dalam galaxinya, layaknya debu dengan atom berhamburan sekitarnya. Gaya gravitasi merupakan hal yang penting dalam bidang astronomi, sebagai gaya yang mengontrol struktur dari bentuk astronomi.

Gaya elektromagnetik adalah gaya yang mendasar untuk menggambarkan struktur atom. Elektron berada pada orbit disekeliling inti dengan gaya listrik, seperti planet berada pada orbitnya mengelilingi matahari dengan gaya gravitasi. Elektron-elektron biasanya mengalami gaya listrik satu sama lain, dan gaya yang timbul antara dua atom yang saling berdekatan merupakan gaya yang timbul antara elektronnya. Semua gaya yang dibahas lebih lanjut pada pembahasan ini, dengan mengabaikan

gaya gravitasi, adalah jumlah gaya listrik. Oleh karena itu semua gaya yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari, kecuali gravitasi, murni gaya elektromagnetik.

Proton dan neutron dalam inti akibat adanya gaya nuklir. Gaya ini sangat kuat ketika dua partikel sangat dekat, tapi akan menurun drastis jika ada jarak. Contohnya, gaya nuklir antara dua buah neutron akan nol jika lebih dari  $10^{-14}$  m. Artinya gaya nuklir tidak dapat diperpanjang sampai ke elektron dalam atom, yang berjarak  $10^{-10}$  m dari inti. Oleh karena itu meskipun gaya nuklir sangat penting mengikat inti, gaya ini tidak berperan dalam interaksi antar atom.

Gaya lemah adalah gaya yang bekerja pada wilayah yang sangat kecil. Sangat terbatas ke inti. Gaya ini dapat merespon untuk beberapa bentuk radioaktivitas, yang secara langsung mengubah inti atom suatu atom menjadi inti atom seperti atom lain.

Gaya elektromagnetik adalah gaya yang penting dalam penyusunan bahan atau material fisika dan kimia. Gaya ini merupakan hal yang penting pada prakteknya, seperti seluruh peradaban industri tergantung pada generator tenaga listrik dan peralatan pada motor, penyinaran dan pemanasan.

## **1.2 Hukum Coulomb**

Meskipun gaya gravitasi dan gaya listrik merupakan gaya fundamental yang berbeda, keduanya memiliki beberapa kesamaan. Dengan tujuan memahami gaya listrik, sebelumnya akan sangat membantu jika kita membahas sekilas mengenai gaya gravitasi.

Gravitasi adalah gaya yang muncul antara dua partikel dengan massa  $m_1$  dan  $m_2$ . Artinya bahwa gaya  $F_1$  gaya yang muncul pada  $m_2$  akibat  $m_1$ . Menurut hukum III Newton, reaksi  $F_1$  adalah  $F_2$  pada  $m_1$  akibat  $m_2$ . Gaya  $F_1$  dan  $F_2$  memiliki nilai yang sama namun arahnya berlawanan.

Gravitasi adalah gaya yang bekerja pada suatu jarak, misalnya dua partikel saling berinteraksi pada ruangan kosong, tanpa ada interaksi

mekanik. Nilai  $F_g$  pada gaya gravitasi pada dua objek yang bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  terpisah dengan jarak  $r$ , menurut hukum Newton ,

$$F_g = G (m_1.m_2/r^2)$$

dimana  $G$  adalah konstanta universal gravitasi (  $G= 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{Kg}^2$ ).

Nilai inilah yang membedakan gaya tarik dan gaya tolak yang ditandai oleh nilai yang didapat. Gaya tarik memiliki tanda negatif dan gaya tolak memiliki tanda positif. Berdasarkan kesepakatan tersebut maka persamaan gaya gravitasi menjadi:

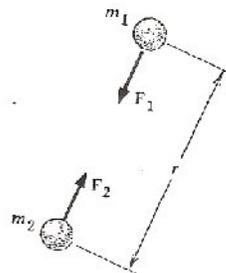


FIGURE 16.2  
Gravitational attraction of two masses.

$$F_g = - G (m_1.m_2/r^2) \quad 16.1$$

untuk menandakan gaya tarik menarik.

Gaya listrik adalah gaya yang bekerja pada dua buah partikel yang terpisah yang bermuatan  $q_1$  dan  $q_2$ . Muatan, seperti massa yang merupakan dasar dari sebuah materi. Dimensi dari muatan sangat fundamental, seperti massa, panjang, waktu dan derajat ( pada temperature). Dimensi dari beberapa satuan fisika dapat di nyatakan dalam 5 dimensi. Satuan dari muatan adalah coloumb (C).

Gaya listrik antara dua partikel yang bermuatan  $q_1$  dan  $q_2$  yang terpisah sejauh  $r$  menurut hukum coloumb dapat ditulis :

$$F = + K ( q_1 \cdot q_2 /r^2 ) \quad 16.2$$

dimana  $K$  merupakan konstanta listrik universal (  $K = 9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$  ).

Tersirat adanya kesamaan antara persamaan gaya gravitasi dengan gaya listrik. Gaya listrik tergantung pada hasil perkalian dari muatan dari kedua partikel, seperti pada gaya gravitasi tergantung pada massanya.

Begitupun dengan keterbalikan dengan nilai kuadrat dari jarak antara kedua partikel.

Hal penting yang membedakan gaya gravitasi dengan gaya listrik adalah bahwa gaya gravitasi selalu tarik menarik, gaya listrik dapat tarik menarik dan tolak menolak karena terdapat dua jenis muatan yaitu positif dan negatif. Partikel yang memiliki muatan yang sama akan tolak menolak, dan partikel yang berbeda muatannya akan saling tarik menarik. Keadaan ini ditandai oleh tanda positif pada persamaan gaya listrik. Jika  $q_1$  dan  $q_2$  memiliki nilai yang sama, keduanya positif atau dua-duanya negatif hasil kali  $q_1q_2$  akan positif, maka gayanya pun bernilai positif, menandakan gaya saling tolak-menolak. Pada sisi lain, Jika  $q_1$  dan  $q_2$  memiliki nilai berbeda hasil kali  $q_1q_2$  negatif, gaya yang diperoleh pun akan bernilai negatif maka gaya yang bekerja bersifat tarik-menarik.

Partikel elementer adalah pembawa muatan. Proton memiliki nilai positif  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C, dan elektron bermuatan negatif  $-e$  dengan nilai yang tepat sama. (neutron bermuatan nol.) Muatan dari suatu partikel merupakan jumlah dari muatan proton dan elektron yang ada di dalamnya. Oleh karena itu partikel yang memiliki jumlah proton dan elektron sama akan bermuatan nol. yang biasa disebut partikel tak bermuatan atau netral.

Partikel netral bisa bermuatan dengan menangkap atau melepaskan elektron. Singkatnya, ketika sebuah batang kaca digosok oleh sutera, elektron akan berpindah dari batang kaca ke kain sutera. Jika kaca kehilangan sebanyak  $N$  elektron maka ia akan kelebihan sebanyak  $N$  proton. Maka kaca tersebut akan bermuatan  $Ne$ . sama halnya dengan sutera akan memiliki kelebihan sebanyak  $N$  elektron dibanding proton maka muatan totalnya  $-Ne$ . total muatan pada kaca dan batang kaca adalah

$$Ne + (-Ne) = 0$$

bernilai sama seperti sebelum digosokkan.

Hal ini merupakan contoh dari hukum kekekalan muatan, dimana dikatakan bahwa pada setiap proses fisika, jumlah total muatan tidak berubah. Hukum ini secara jelas benar untuk proses yang hanya meliputi perpindahan elektron dari satu partikel ke partikel lain. Bagaimanapun, hukum ini lebih umum dibanding proses- proses ini, seperti peluruhan inti, dimana proton dan elektron akan terbentuk dan hilang.

Merupakan hal yang membandingkan antara gaya gravitasi dengan gaya listrik yang terbentuk diantara dua partikel elementer. Table 16.1 memperlihatkan massa dan muatan dari proton, neutron dan elektron. Dengan menggunakan table tersebut kita dapat menghitung besarnya gaya gravitasi antara proton dan elektron yang terpisah sejauh r, adalah:

$$F_g = -G \frac{m_p m_e}{r^2}$$

$$F_g = - \frac{(6.67 \times 10^{-24} \text{ N-m}^2/\text{kg}^2) (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}) (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{r^2}$$

$$F_g = \frac{1.01 \times 10^{-27} \text{ N-m}^2}{r^2}$$

Table 16.1 massa dan muatan dari partikel elementer.

Partikel	Massa ( kg )	Muatan ( C )
Proton	$1.673 \times 10^{-27}$	$1.602 \times 10^{-19}$
Neutron	$1.675 \times 10^{-27}$	0
Elektron	$9.110 \times 10^{-31}$	$- 1.602 \times 10^{-19}$

Selain itu kita pun dapat mencari besarnya gaya listrik antara elektron dan proton adalah

$$F_e = +K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_e = \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N-m}^2/\text{C}^2) (1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) (-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{r^2}$$

$$F_e = - \frac{2.30 \times 10^{-28} \text{ N-m}^2}{r^2}$$

Perbandingan antara kedua gaya tersebut adalah

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{2.30 \times 10^{-28}}{1.01 \times 10^{-67}} = 2.28 \times 10^{39}$$

Karena gaya listrik jauh lebih besar daripada gaya gravitasinya, maka gaya gravitasi dapat dihilangkan ketika menjumlahkan gaya antara dua partikel elementer. Tetapi, pada skala yang besar seperti system astronomi didominasi oleh gaya gravitasi karena objeknya bermuatan neutral.

### Induksi

Sebuah batang kaca yang bermuatan positif akigbat digosok oleh sutra akan menarik gabus-gabus kecil. Meskipun gabus tidak bermuatan. Gabus

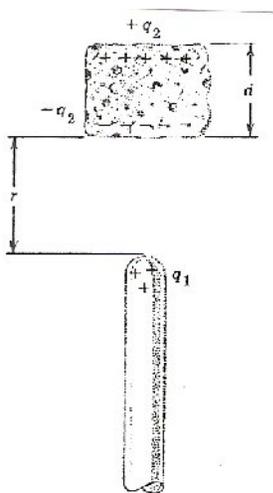


FIGURE 16.5 Induction of charge on a piece of cork. The cork is attracted to the inducing charge  $q_1$  because the attraction between  $q_1$  and the negative induced charge is greater than the repulsion between  $q_1$  and the positive induced charge.

tersusun dari proton dan elektron yang berbeda muatan, yang secara alami terdistribusi uniform, maka jumlah muatannya nol untuk setiap bagian gabus. Ketika objek yang bermuatan, seperti batang kaca didekatkan dengan gabus, muatan positif pada kaca akan berinteraksi dengan elektron-elektron ( menarik ) dan menolak proton pada gabus pada gabus, hal inilah yang menyebabkan perubahan kecil dari posisi alaminya. Hasilnya muatan negatif akan terakumulasi pada sisi dekat kaca dan muatan positif akan terakumulasi pada sisi lainnya. Proses tersebut

dinamakan induksi. Berdasarkan hukum kekekalan muatan, total muatan gabus harus nol, karena tidak ada muatan yang ditambahkan ataupun dipindahkan. Karena disini muatan negatif terinduksi ke satu sisi dan muatan positif terinduksi ke sisi lainnya.

Seandainya batang kaca memiliki muatan  $q_1$  dan jaraknya  $r$  dari sisi depan gabus. Jika muatan induksi pada sisi depan gabus adalah  $-q_2$ , batang akan menarik dengan gaya sebesar:

$$F_e = +K \frac{q_1(-q_2)}{r^2} = -K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

pada waktu yang sama, batang akan menolak muatan  $+q_2$  yang terinduksi ke sisi belakang. Muatan tersebut terletak sejauh  $d$  dari batang, dimana  $d$  adalah diameter sebuah serpihan gabus. Oleh karena itu gaya tolak yang dialami muatan positif itu adalah

$$F_e' = K \frac{q_1 q_2}{(r+d)^2}$$

dengan nilai jauh lebih kecil dari  $F_e$ . Nilai  $F$  pada total jumlah gaya pada gabus adalah jumlah dari  $F_e$  dan  $F_e'$  atau

$$F = F_e + F_e' = -K \frac{q_1 q_2}{r^2} + K \frac{q_1 q_2}{(r+d)^2}$$

$$F = -K q_1 q_2 \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+d)^2} \right]$$

$$F = -K q_1 q_2 \frac{2rd + d^2}{r^2(r+d)^2}$$

nilai di atas memperlihatkan kaca akan menarik muatan negatif pada gabus.

**Catatan penting** : jika batangnya bermuatan negatif maka muatan positif akan terinduksi ke sisi gabus yang dekat dengan batang dan muatan negatif akan terinduksi ke sisi yang lainnya. Maka gabus masih akan tertarik oleh batang. Oleh karena itu objek bermuatan, baik positif ataupun negatif akan menarik objek tidak bermuatan.

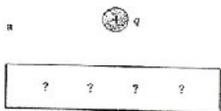


FIGURE 16.6  
(a) Induction of charge on an object by an external charge  $q$ . (b) Object cut to try to isolate the induced charge.

### Isolator dan konduktor

Perbedaan bahan adalah pada kebebasan relative dengan muatan yang dapat bergerak yang

dimilikinya. Bahan yang memiliki muatan yang dapat bergerak dengan sangat bebas disebut konduktor, dan bahan yang muatannya dapat bergerak hanya sedikit disebut isolator ( atau dielektrik). Logam merupakan konduktor yang baik, sedangkan kasa, karet, dan gabur adalah contoh isolator yang baik.

Perbedaan diantara isolator dengan konduktor digambarkan dengan eksperimen berikut. Sebuah muatan  $q$  didekatkan dengan bahan yang tidak bermuatan, maka akan terjadi induksi muatan. Objek itu lalu dipotong menjadi dua, dan muatan  $q$  dijauhkan. Apakah setegah bagian dari objek tersebut mengalami induksi? Jawabanya ya jika objeknya berbahan konduktor dan tidak jika bahannya isolator. Untuk memahami hal tersebut kita harus membandingkan antara struktur atom konduktor dan isolator.

Pada bahan isolator, setiap elektron terikat pada atom dan tidak dapat bebas berpindah. Atom-atom pada bahan isolator digambarkan pada gambar 16.7 a seperti unit yang netral komposisi proton dan elektron berlapis-lapis satu dengan lainnya. Muatan positif  $q$  didekatkan dengan isolator menarik muatan negatif pada elektron dan menolak muatan positif pada inti. Hal tersebut menyebabkan muatan positif dan negatif sedikit terpisah. Atom yang seharusnya bermuatan netral, muatan positif, tetapi akhirnya menjadi bermuatan positif dan sebagian lagi bermuatan negatif. Sebagai hasilnya terdapat kelebihan muatan negatif pada satu sisi dan kelebihan muatan positif pada sisi yang lainnya. Tentu saja bukan muatan bebas, muatan itu hanyalah akhir dari atom netral. Gambar 16.7 c

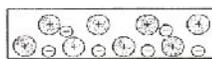
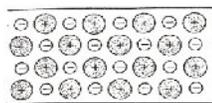


FIGURE 16.8 (a) A conductor. The positive charges are the ions, which have fixed positions, and the negative charges are the electrons, which are free to move around. (b) Induction of charge on an insulator. The external charge  $q$  causes the free electrons to move toward one side of the insulator. (c) When the insulator is cut in half, an excess of electrons is trapped on one half and a deficit of electrons is trapped on the other half.

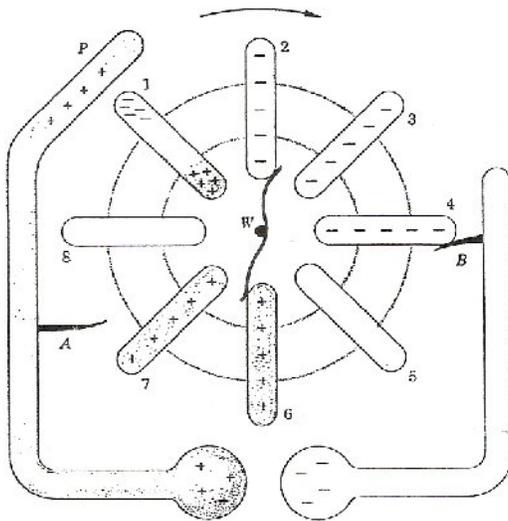
memperlihatkan gambaran jika bahan isolator dipotong menjadi dua. Induksi muatan muncul pada permukaan potongan tetapi total muatannya nol.

Pada konduktor logam, sedikitnya terdapat satu buah elektron terpisah dari atom dan bebas dalam konduktor. Atom yang kehilangan elektron disebut ion. Pada logam muatan positif berada pada tempat yang tetap. Bahan logam terdiri dari muatan positif yang tetap posisinya dengan dikelilingi muatan negatif di sekitarnya. Secara normal ion dan elektron terdistribusi

pada sisi yang dekat dengi uniform, maka total muatannya nol di setiap daerah pada logam. Tetapi, objek yang bermuatan yang didekatkan pada bahan ini akan mengubah distribusi tersebut. Muatan positif akan menarik elektron dan akan menolak ion. Karena elektron bebas bergerak, mereka terakumulasi pada sisi dekat  $q$ , dan menjadi bermuatan negatif. Pada sisi berlawanan, akan kekurangan elektron dan menjadi bermuatan positif. Jika konduktor dipotong di tengah-tengahnya, kelebihan elektron terjebak pada sisi yang dekat dengan  $q$ , meninggalkan sisi lain yang kekurangan elektron. Maka setengah bagian itu tetap bermuatan meskipun muatannya telah diijauhkan.

Untuk membuat bahan konduktor menjadi tidak bermuatan hanya dengan menghubungkan bahan konduktor dengan kabel. Konduktor yang kelebihan muatan negatif ditarik oleh konduktor yang bermuatan positif, mengalir sepanjang kabel, sampai kedua konduktor kembali netral.

### Mesin penginduksi



Gambar disamping memperlihatkan satu dari banyak mesin penginduksi yang menggunakan induksi untuk memisahkan muatan. Seperti mesin utama yang digunakan untuk menunjukkan demonstrasi fisika sekarang ini, tetapi pada abad 90an digunakan untuk penelitian mengenai kelistrikan. Pada mesin diperlihatkan batang logam dibuat radial

membentuk sebuah roda yang diputar dengan sebuah engkol secara langsung. Plat yang dinamai P memiliki muatan muatan positif yang kecil. Maka muatan tersebut akan menginduksi pada posisi 1. Ketika roda di putar ke titik 2, akan membuat kontak sesaat dengan kabel W, yang secara

simultan terhubung dengan batang pada posisi 6. Muatan negatif mengalir dari batang di posisi 6, maka ketika terhubung akan mengalami kerusakan, roda ini, sekarang ada di posisi 7, meninggalkan muatan positif. Demikian juga, roda pada posisi 3 mengangkat muatan negatif. Batangan ini menyimpan muatannya pada dua bola yang dinamakan A dan B.

Beberapa muatan positif yang disimpan pada A akan terakumulasi pada plat P. karena muatan pada P meningkat maka jumlah muatan induksi ke posisi 2 pun meningkat. Hal ini akan tambah meningkatkan lagi jumlah muatan di P. karena itu mesin menggunakan umpan balik positif untuk mempercepat terbentuknya muatan yang besar pada dua bola konduktor. Ketika muatan sudah cukup besar, udara diantara dua bola konduktor akan terkonduksi dan dapat mengalirkan elektron dari bola negatif ke bola positif. Akan terlihat seperti pecikan antara kedua bola.

### 1.3 Medan listrik

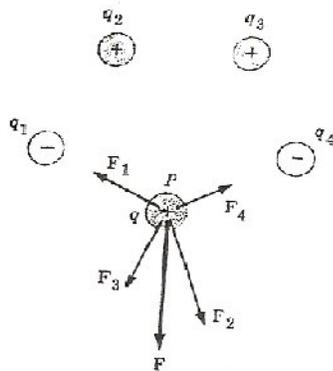


FIGURE 16.10  
The force on a test charge  $q$  due to four source charges,  $q_1, q_2, q_3, q_4$ .

Gambar 16.10 memperlihatkan perubahan konfigurasi muatan ( $q_1, q_2, \dots, q_n$ ). Gaya  $F$  mengatur muatan terhadap  $q$  pada titik P merupakan jumlah vector dari gaya-gaya  $F_1, F_2, \dots, F_n$  dimana mengatur masing-masing muatan terhadap  $q$ . Semua gaya ini tergantung pada muatan uji  $q$  dan pada muatan sumber  $q_1, q_2, \dots, q_n$  pada konfigurasi aslinya. hal ini sangat penting untuk menggambarkan

gaya sebagai hasil perkalian yang tergantung hanya pada muatan uji dan muatan sumber. Hal ini memudahkan karena  $F$  proporsional terhadap  $q$ , maka rasionya adalah

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

Tidak bergantung pada  $q$ , vector  $E$  merupakan medan magnet di titik  $P$  yang dibentuk oleh muatan sumber. Hal tersebut sama untuk gaya pada muatan yang bekerja pada muatan positif 1-C pada  $P$ . satuan untuk  $E$  adalah Newton per Coloumb (  $N/C$  ). Dalam bahasan  $E$ , gaya pada muatan sumber bekerja pada perubahan muatan  $q$  di titik  $P$  dapat ditulis

$$F = qE$$

16.4

Persamaan di atas menggambarkan vector  $F$  sebagai hasil perkalian sejumlah  $q$  yang hanya tergantung pada muatan uji dan vector  $E$  hanya tergantung pada muatan sumber. Hasil perkalian dari sejumlah muatan positif dan vector  $E$  adalah vector  $F$  yang searah dengan  $E$  dan memiliki nilai  $qE$ . Jika  $q$  negatif, arah  $F$  akan berlawanan dengan  $E$ .

Medan listrik merupakan konsep yang penting karena membiarkan kita untuk memikirkan mengenai gaya yang merupakan konfigurasi dari muatan akan bekerja pada muatan meskipun tidak ada bmuatan di sekitarnya. Karemna gaya yang bekerja pada muatan uji tergantung pada titik posisinya, medan listrik bervariasi ndari satu titik ka titik lainnya. Akibat dari konfigurasi muatan dapat digambarkan oleh medan magnet dari berbagai titik. Sebagai contoh pada gambar 16.11 memperlihatkan medan magnet pada beberapa titik yang berbeda yang dibentuk oleh titik muatan positif. Panah-panah menggambarkan medan arahnya berasal dari muatan karena arah dari medan adalah arah dari gaya yang bekerja pada muatan uji positif. Panjang dari garis menurun sesuai jarak dari muatan karena gaya pada muatan uji menurun akibat jarak, seperti yang dikatakan pada hukum Coloumb.

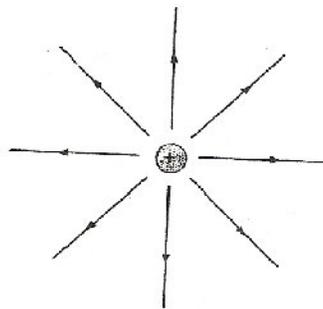


FIGURE 16.12  
The lines of force of a positive point charge.

Gambar 16.12 memperlihatkan gambaran lain dari medan magnet pada muatan positif. Garis, yang disebut dengan garis gaya magnet, digambarkan parallel terhadap medan pada setiap titik, memberikan gambaran yang baik mengenai arah dari medan magnet dimanapun. Bandingkan gambar 16.11 dengan 16.12 kita

lihat bahwa garis dari gaya berdekatan jika medannya besar dan akan lebih berjauhan jika medannya kecil. Oleh karena itu jarak antara garis gaya menunjukkan nilai relative medan.

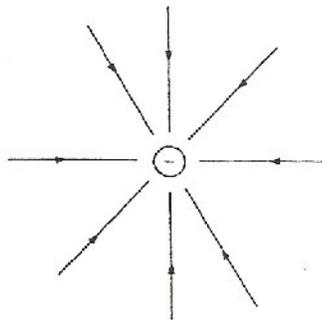


FIGURE 16.13  
The lines of force of a negative point charge.

Gambar 16.13 memperlihatkan garis gaya pada muatan negatif. Garis-garis itu menyerupai garis gaya pada muatan positif hanya berbeda arahnya menuju ke muatan. Hal itu karena muatan positif menarik muatan negatif. Gambar 16.14 memperlihatkan garis gaya yang dibentuk oleh dua muatan yang sama besar berbeda jenis yang diletakan sejauh  $d$ . semua garis berawal dari titik positif

dan berakhir di titik negatif. Medan listrik pada titik P adalah garis singgung dari garis gaya di titik P dan sama nilainya dengan jumlah vector dari medan listrik akibat muatan yang terpisah.

Konfigurasi muatan pada gambar 16.14 disebut dengan dipole. Meskipun total muatan pada konfigurasi adalah nol, akan terbentuk gaya terhadap muatan lain. Keadaannya sama halnya positif dan negatif pada sisi

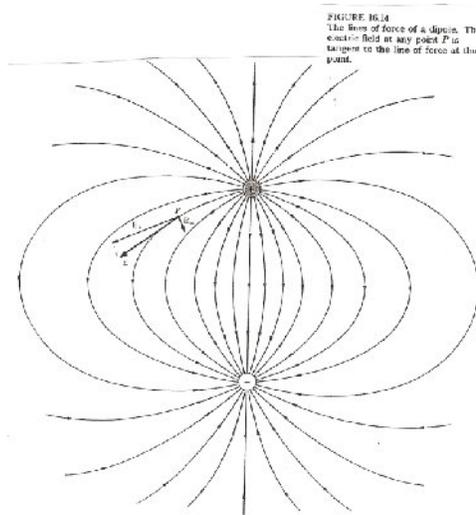


FIGURE 16.14  
The lines of force of a dipole. The electric field at any point P is tangent to the line of force at that point.

yang berbeda pada gabus. Hal tersebut menginduksi muatan dari dipole yang gayanya bekerja terhadap muatan.

Medan listrik yang dihasilkan oleh dipole dapat dikalkulasikan pada beberapa titik dari hukum coulomb. Penjumlahan dari partikel sederhana untuk kasus khusus pada titik P pada sumbu dipole.

Misalkan  $q_1$  dan  $q_2 = -q_1$  menjadi muatan dipol, dan andaikan ada muatan uji  $q$  pada penampang dipole sejauh  $r$  dari pusat dipole. Total gaya  $F$  pada  $q$  adalah jumlah gaya  $F_1$  dan  $F_2$  dari muatan  $q_1$  dan  $q_2$ . Karena gayanya paralel maka nilai  $F$  adalah :

$$F = F_1 + F_2$$

$$F = K \frac{q_1 q_2}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2} + K \frac{q_1 q_2}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2}$$

$$F = K q_1 q_2 \left[ \frac{1}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2} \right]$$

$$F = K q_1 q_2 \frac{-2rd}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2 \left(r - \frac{d}{2}\right)^2}$$

Ketika  $r$  sangat besar dibanding  $d$ , katakanlah setengah  $d$  dapat diabaikan. Gaya diberikan dengan persamaan:

$$F = -K q_1 q_2 \frac{2rd}{r^4} = F = -K q_1 q_2 \frac{2d}{r^3}$$

Hal itu menunjukkan gaya yang dilakukan oleh dipole menurun terbalik dengan nilai pangkat tiga jarak dari dipole, berbeda dengan gaya yang bekerja pada muatan tunggal, yang menurun sebagai fungsi kuadrat dari jaraknya. Pada jarak yang sangat jauh, gaya dipole akan lebih lemah dibandingkan gaya yang dihasilkan masing-masing oleh  $q_1$  dan  $q_2$  karena gaya masing-masing muatan akan menggagalkan pada jarak jauh (meski tidak semuanya). Nilai dari medan listrik yang dibentuk oleh dipole di titik  $P$  adalah:

$$E = \frac{F}{q} = -K \frac{2dq_2}{r^3}$$

#### 1.4 Potensial listrik

Dengan menganggap massa  $m$  dan muatan  $q$  dari  $q_1$  tetap. Jika keduanya bermuatan positif  $q_1$  melakukan gaya tolak

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

Pada objek. Jika objek awalnya ada di titik A akan dipercepat keluar sepanjang garis gaya. Pada titik B sksn memiliki kecepatan  $V_B$  dengan energi kinetik  $K_B = \frac{1}{2} m v_B^2$ . Berdasarkan teorema usaha-energi. Usaha  $W_{AB}$  bekerja pada q dengan gaya F pada perpindahan objek dari A ke B sebanding dengan perubahan energi kinetiknya.

$$W_{AB} = K_A - K_B \quad 16.5$$

Karena objek berawal dari diam maka nilai  $K_A$  adalah nol pada kasus ini

Usaha  $W_{AB}$  dilakukan oleh gaya listrik, seperti usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi, dapat ditulis sebagai perbedaan energi potensial U dari objek pada titik A dan B,

$$W_{AB} = U_A - U_B \quad 16.6$$

Maka suatau U dapat ditandai untuk setiap titik seperti usaha yang dilakukan gaya listrik dalam memindahkan object pada dua titik diberikan pad persamaan diatas. Jelasnya, jika jumlah yang sama ditambahkan pada nilai U di setiap titik, persamaan diatas tidak akan berubah nilainya.kebebasan dalam mendefinisikan U digunakan untuk membuat U mendekati Nol untuk beberapa situasi pada titik yang tepat.

$$U_A - U_B = K_B - K_A$$

Atau

$$U_A + K_A = U_B + K_B \quad 16.7$$

Hal itu mengatakan bahwa jumlah dari energi kinetic dan energi potensial pad titik A sama dengan jumlah energi kinetic dan energi potensial pada titik b. karena A dan B berada pada titik yang dapat berubah, jumlah energinya tetapsama pada setiap titik, dengan kata lain konstan.

Hal itu dapat memperlihatkan bahwa energi potensial pada muatan titik  $q_1$  akibat muatan titik  $q_2$  diberikan dengan

$$U = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad 16.8$$

hal ini sangat menyerupai energi potensial gravitasi, kecuali untuk perbedaan tanda, yang hanya menggambarkan perbedaan tanda pada hukum gaya. Jika  $q$  dan  $q_1$  memiliki kesamaan tanda, akan terjadi tolak-menolak satu sama lain dan  $U$  bernilai positif. Jika  $q$  dan  $q_1$  memiliki tanda yang berbeda maka akan tarik-menarik dan  $U$  negatif. Karena gaya gravitasi selalu tarik menarik maka persamaan 5.18 harus bertanda negatif. Energi potensial diberikan dengan persamaan 16.8 tidak pernah bernilai nol, tapi akan semakin kecil semakin kecil seiring dengan semakin besarnya  $r$ . maka dapat dikatakan energi potensial akan nol jika jaraknya tak hingga.

Sebagai contoh, anggaplah elektron berada pada titik A, jarak  $r_A = 0.53 \times 10^{-10}$  m dari sebuah proton. Dengan menggunakan table 16.1 dan persamaan 16.8 kita dapat memperoleh nilai potensial elektron pada titik A adalah

$$U_A = K \frac{q_1 q_2}{r_A}$$

$$U_A = \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) (1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) (-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{5.3 \times 10^{-11} \text{ m}}$$

Nilai energinya negatif karena elektron ditarik oleh proton. Persamaan 16.7 dapat digunakan untuk menghitung kecepatan  $V_A$  dimana elektron harus ada pada A untuk terbebas dari proton. Elektron dengan kecepatan pembebasan minimum dapat pindah sampai tak hingga dari proton, tapi kecepatannya nol. Maka ketika elektron berada pada jarak tak hingga dari proton, energi potensial dan energi kinetiknya nol. Oleh karena itu, dari persamaan 16.7 didapat

$$K_A + U_A = K_{\infty}$$

$$K_A = \frac{1}{2} m v_A^2 = -U_A = 4.3 \times 10^{-18} \text{ J}$$

dimana  $m$  adalah massa elektron. Maka penyelesaian untuk  $V_A$  adalah

$$v_A = \frac{4.3 \times 10^{-18} \text{ J}}{\frac{1}{2} m}$$

$$v_A = \frac{4.3 \times 10^{-18} \text{ J}}{\frac{1}{2} (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})}$$

$$v_A = 9.4 \times 10^{12} \text{ J/kg}$$

maka

$$V_A = 3.1 \times 10^6 \text{ m/s}$$

Catatan penting: hasil perhitungan ini bisa dibandingkan dengan hasil perhitungan pada bagian 5.4 mengenai kecepatan yang dibutuhkan untuk membebaskan diri dari bumi. Terdapat prinsip yang sama dalam kedua perhitungan itu. Tetapi, kecepatan pembebasan gravitasi tidak tergantung pada massa objek, sedangkan pada kasus listrik tergantung massa. Kenapa?

Energi potensial pada muatan uji akibat konfigurasi dari muatan sumber ( $q_1, q_2, \dots, q_n$ ) adalah jumlah dari energi yang disebabkan oleh masing-masing muatan. Energi potensial tergantung pada kebersamaan dari muatan uji dengan muatan sumber  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . hal itu sangat berguna untuk menyatakan energi potensial, seperti gaya listrik, hasil kali dari factor yang tergantung pada muatan uji dengan factor yang

bergantung pada muatan sumber. Karena U sebanding dengan q, dengan rasio

$$V = U/q \quad 16.9$$

Dengan nilai q bebas. Jumlah V, disebut dengan potensial listrik, hanya bergantung pada nilai muatan sumber. Energi potensial U pada muatan uji adalah gambaran sederhana dari pembahasan potensial V,

$$U = q V \quad 16.10$$

Satuan dari potensial adalah joule per coulomb ( J/C ), yang biasa juga disebut Volt ( V ):

$$1V = 1 J/C$$

Dari persamaan 16.8 dan 16.9 nilai potensial akibat muatan titik  $q_1$  dinyatakan

$$V = \frac{U}{q} = K \frac{q}{r} \quad 16.11$$

Sebagai contoh, besarnya potensial pada jarak  $r = 5.3 \times 10^{-11}$  dari proton adalah

$$V = \frac{(9.0 \times 10^9 N-m^2/C^2)(1.60 \times 10^{-19} C)}{5.3 \times 10^{-11} m}$$

$$V = 27.2 N-m/C = 27.2 J/kg = 27.2 V$$

Potensial pada semua titik pada konfigurasi muatan dapat digambarkan dengan ekipotensial, garis yang potensialnya tetap sepanjang garis. Gambar 16.17 menggambarkan ekipotensial ( garis putus-putus) dan garis gaya ( garis penuh ) pada dipole ( dua muatan sama besar berbeda

jenis.). medan listrik tidak bekerja pada muatan uji yang berpendah

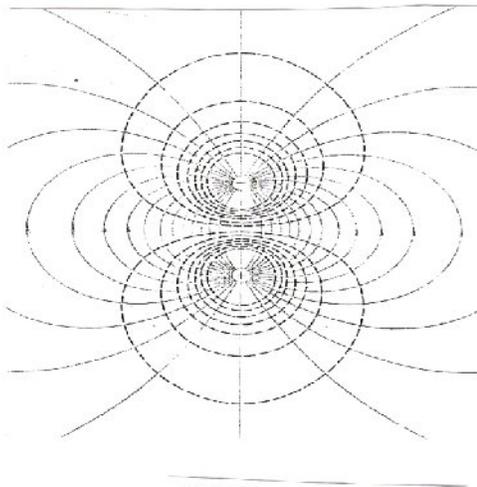


FIGURE 16.17 Equipotentials and lines of force of a dipole. The lines of force are everywhere perpendicular to the equipotentials.

sepanjang garis ekipotensial, karena energi potensialnya tidak berubah. Hal ini menandakan bahwa garis gaya harus tegak lurus dengan garis equipotensial, seperti diperlihatkan pada gambar 16.17 jika untuk kasus lain, gaya listrik akan memiliki komponen parallel dengan equipotensial dan beberapa usaha akan dikenakan terhadap muatan uji yang bergerak disekitarnya. Gaya pada muatan

uji positif akan selalu terjadi dari potensial tinggi ke potensial rendah, tegak lurus dengan equipotensial. Sedangkan untuk muatan uji negatif, sebaliknya, akan terjadi dari potensial rendah ke potensial tinggi.

Ketika logam konduktor ditempatkan pada medan listrik statis, bagian yang berbeda dari konduktor akan berada pada potenseal yang berbeda dalam waktu sesaat. Jika pada kasus ini, muatan negatif elektron yang bebas bergerak dalam logam, akan mengalir dari potensial yang rendah ke potensial yang tinggi. Elektron akan kembali terdistribusi oleh sendirinya, sedikitnya satu juta elektron per detik, potensial akan sama nilainya pada tiap titik pad logam. Maka ketika tidak terjadi aliran muatan listrik di dalamnya logam dengan objek konduktor lainnya berada pada keadaan equipotensial. selanjutnya karena terdapat banyak medan listrik pada konduktor akan menyebabkan elektron bebas berpindah, medan listrik konduktor harus nol ketika tidak terjadi aliran muatan.

Konduktor terhubung dengan baik dengan bumi dinamakan ground. Permukaan bumi sendiri merupakan konduktor yang baik, maka bumi dan seluruh kondutor ground bersama-sama membentuk sebuah konduktor yang sangat besar, semuanya memiliki potensial yang sama, disebut bumi. Pada penerapannya potensial dalam bumi adalah nol.

Contoh, listrik yang digunakan rumah pada umumnya 120 v. artinya satu sisi mengandung potensial 120 v relative terhadap sisi lainnya, yang di groundkan. Ketika sebuah alat dinyalakan pada keluar, muatan positif mengalir akibat sisi dengan potensial tinggi, begitupun dengan alat, dan kembali ground. Usaha yang dilakukan adalah

$$\begin{aligned}
 W &= U_{120} - U_0 \\
 &= q \times 120 \text{ v} - 0 \\
 &= q \times 120 \text{ v}
 \end{aligned}$$

Untuk lebih mudah, usaha dilakukan pada muatan 10 C adalah

$$W = 10 \text{ C} \times 120 \text{ V} = 1200 \text{ J}$$

Usaha ini di udah menjadi panas, cahaya, atau energi mekanik, tergantung pada alat yang dihubungkan.

### 1.5 Berkas elektron

Sejumlah perangkat penting , seperti osiloskop, televise, mesin sinar-X, mikroskop elektron, dan tabung vacuum elektron yang dipercepat dengan menggunakan medan listrik. Pada semua kasus mengenai berkas terkandung pemindahan tabung, seperti pada gambar 16.18. Piringan logam, atau elektroda, terkumpul di satu sisi tabung, dan kabel mendorong elektron untuk mencapai dinding tabung. Satu elektroda,

disebut katoda, yang dipanaskan dengan kabel filament dengan arus yang mengalir padanya. Ketika temperatur cukup tinggi, beberapa elektron bebas memiliki energi yang cukup untuk lepas dari logam, seperti penguapan pada cairan. Penguapan elektron ini berasal

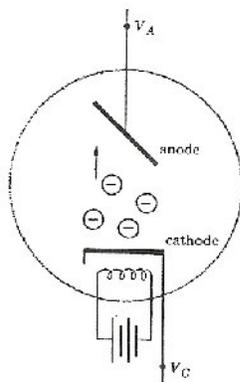


FIGURE 16.18  
A vacuum tube. Electrons that evaporate from the heated cathode are accelerated toward the anode, which is maintained at a positive potential with respect to the cathode.

dari katoda; jika terlalu rapat, maka penguapan akan terhambat.

Jika elektroda yang satunya lain disebut anoda, terbangun dari potensial positive yang jauh dibanding katoda, elektron bisa tertarik ke plat tersebut. Karena tidak ada udara dalam tabung, elektron bergerak bebas sampai ke anoda tanpa bertabrakan molekul udara. Seperti gerakan elektron dalam awan elektron, mereka akan terganti dari elektron yang menguap dari katoda.

Misalkan  $V_A$  adalah potensial di anoda, dan  $V_C$  adalah potensial di katoda. Energi potensial dari elektron yang bermuatan  $q = -e$  pada anoda dan katoda adalah

$$U_A = -e V_A$$

dan

$$U_C = -e V_C$$

Energi listrik hanya yang mempengaruhi elektron, maka ketika elektron bergerak dari katoda ke anoda, dengan jumlah energi kinetic dan energi potensialnya konstan.

$$K_C + U_C = K_A + U_A$$

penyelesaian dari energi kinetic  $K_A$  pada anoda, kita peroleh

$$\begin{aligned} K_A &= K_C + (U_C - U_A) \\ &= K_C + e(V_A - V_C) \end{aligned}$$

energi kinetic  $K_C$  pada elektron seperti pada katoda mendekati nol, maka perkiraan paling baik yang diperoleh,

$$K_A = \frac{1}{2} m v^2 = e (V_A - V_C)$$

$$V_A^2 = \frac{2e(V_A - V_C)}{m}$$

16.13

dimana m adalah massa elektron.

Sebagai contoh, jika potensial anoda 5000 V terhadap katoda, kecepatan elektron yang diperoleh

$$\begin{aligned} v^2 &= \frac{2(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(5000 \text{ V})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \\ &= 17.6 \times 10^{-14} \text{ J/kg} \\ &= 4.2 \times 10^7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Catatan penting, kecepatan elektron pada hasil perhitungan di atas mendekati kecepatan cahaya ( $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) ketika  $V_A - V_C$  lebih besar daripada 256.000 V. tetapi menurut teori relativitas, sebuah objek tidak dapat bergerak lebih cepat dari kecepatan cahaya. Oleh karena itu persamaan 16. 13 tidak sepenuhnya tepat. Diperbaiki pada kecepatan yang benar yakni lebih kecil dari kecepatan cahaya, namun akan menjadi lebih akurat jika kecepatan bernilai lebih besar daripada  $\frac{1}{2} c$ . kesalahan itu terjadi karena penggunaan  $\frac{1}{2} mv^2$  untuk menghitung energi kinetic. Untuk kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya, energi kinetic diperoleh dengan

$$K = mc^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1 \right]$$

16.14

Persamaan ini sebanding atau sama dengan  $\frac{1}{2} mv^2$  ketika nilai v lebih kecil dengan c, tapi sangat jauh berbeda untuk v dekat dengan c. ( berdasarkan persamaan 16.14 energi kinetik akan semakin besar jika nilai v lebih mendekati c, ketika  $v = c$  maka nilai energi kinetiknya tak terhingga.). Untungnya tidak disarankan untuk menggunakan persamaan diatas karena energi kinetic elektron jauh lebih penting daripada kecepatannya, dan hubungan antara K dan V diberikan pada persamaan 16.12, adalah sah digunakan untuk setiap energi.

## Sinar – X

Pada tabung sinar X elektron bertabrakan dengan anoda, seperti diperlihatkan pada gambar 16.18. Perlambatan secara tiba-tiba dapat menghasilkan sinar-X, yang menggunakan gelombang elektromagnetik yang gelombangnya sangat pendek. Panjang gelombang sinar-X akan lebih pendek jika beda potensial  $V_A - V_C$  semakin besar. Karena sinar-X dengan panjang gelombang yang pendek lebih besar energinya daripada yang panjang gelombangnya panjang, mesin sinar-X yang digunakan saat ini adalah mesin yang memiliki beda potensial yang besar.

Dengan beda potensial 8000V, energy kinetic elektron yang menumbuk anoda adalah

$$K_A = e (V_A - V_C)$$

$$K_A = 1.60 \times 10^{-19} C \times 8000 V = 12.8 \times 10^{-16}$$

Nilai ini lebih sering dinyatakan dalam satuan *elektron volt (eV)*. Elektron volt adalah energi yang diperoleh oleh elektron atas beda potensial 1 Volt.

Maka hubungan antara elektron volt dengan joule adalah :

$$1 eV = e \times 1 V = 1.60 \times 10^{-19} J$$

$$1 J = 6.25 \times 10^{18} eV$$

Dan

Dengan cepat diperoleh energi kinetik dalam elektron volt adalah

$$K_A = (12.8 \times 10^{-16} J)(6.25 \times 10^{18} eV/J) = 8000 eV$$

Maka disimpulkan energy pada elektron sebanding dengan beda potensial.

## Tabung Katoda

Tabung sinar katoda digunakan dalam osiloskop dan televise untuk menyediakan atau menghasilkan gambar yang dikendalikan oleh listrik. Elektron dipancarkan dari katoda dan dipercepat menuju anoda,

seperti pada tabung sinar-X. oleh karena itu, akan terdapat hole pada anoda akibat terjadinya sinar katodayang menghilangkan sejumlah elektron. Elektron ini akan lalu

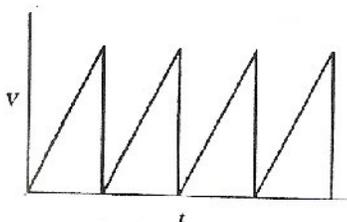


FIGURE 16.20  
Time variation of the sweep potential applied to the horizontal deflection plates of an oscilloscope.

akan tepat jatuh pada sisi permukaan plat di ujung tabung. Permukaan ini dilapisi oleh meteri yang mengandung fluor, yang membentuk bagian yang bercahaya ketika berkas menembuknya.

Posisi ini diatur oleh dua pasang plat pemantul, yang berada pada sudut yang tepat satu sama lain. Tepat ketika elektron hilang diantara kedua plat akan dibelokan menuju plat yang potensialnya lebih tinggi. Jumlah pembelokan diatur oleh perbedaan potensial antara kedua plat. Sepasang plat menghasilkan pembelokan horizontal, dan pasangan lainnya menghasilkan pembelokan ke arah vertikal. Dan kedua plat itu bersama-sama dapat berpindah kemanapun pada layar.

Osiloskop digunakan untuk menampilkan potensial beda fase, yang terbentuk dari impuls akson pada sel syaraf. Dengan menganggap bahwa elektroda ditanam dalam sel, potensial terbaca akan di masukan ke dalam plat vertikal pada osiloskop, menyebabkan pembelokan pertikan pada tempat tersebut. Untuk menampilkan pulsa variasi waktu, akan menyapu secara spontan pada bidang horizontal dari sisi kiri ke kanan dengan kecepatan konstan. Pada ujung penrambatn secara cepat akan berbalik ke kiri lagi dan akan kembali lagi. Perambatan mengharuskan masukan potensial menghasilkan bentuk gelombang gigi gergaji seperti pada gambar 16.20. perambatan gelombang dihasilkan oleh rangkaian elektronik pada osiloskop, dan yang mengatur variasinya adalah frekuensi perambatan.

Pada operasinya, frekuensi perambatan disamakan dengan frekuensi sampainya pulsa ke plat vertikal. Kemudian, pada rmbatan

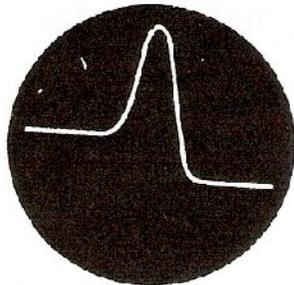
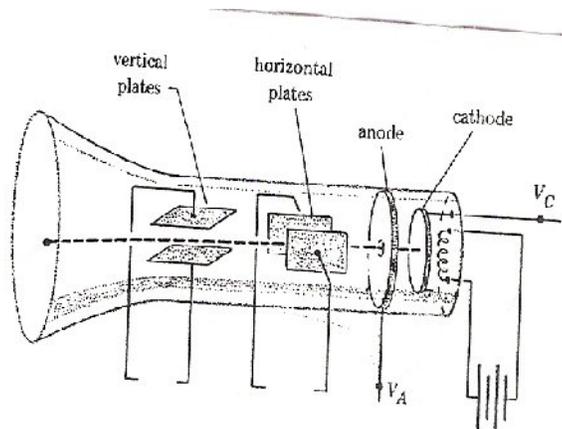


FIGURE 16.21  
Action potential of the giant axon  
of a squid as displayed on an  
oscilloscope.

horizontal, pulsa yang baru ditampilkan sama dengan pulsa sebelumnya, seolah-olah gambarnya posisi tunggal. Pada gambar 16.21 memperlihatkan potensial pada akson yang besar pada cumi-cumi, seperti terlihat pada layar osiloskop.

## Tabung Televisi

**FIGURE 16.19**  
Cathode-ray tube. Some electrons pass through the hole in the anode and go on to strike the fluorescent screen. The position of the beam on the screen is controlled by the potentials applied to the deflection plates.



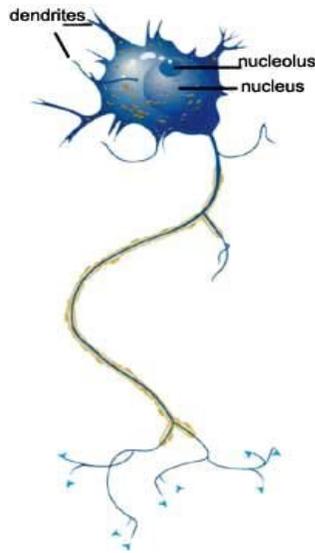
Gambar pada televisi sama dengan tabung sinar katoda, kecuali pembelokannya yang lebih banyak menggunakan medan magnet disbanding medan listrik. Gambar terbentuk dari 525 garis horizontal, dan berganti 30 kali tiap sekon. Berarti bahwa berkas yang merambat di bidang horizontal pada layar  $525 \times 30 = 15,750$  kali per sekon. Sama seperti perambatan pada bidang horizontal, pada bidang vertikalpun terjadi perambatan yang sama dengan perambatan rata-rata 60 kali per sekon. Ada dua perambatan secara vertikal untuk membentuk sebuah gambar karena hanya setengah gambar yang Nampak pada perambatan ini. Perambatan arah vertikal dan horizontal dihasilkan dari rangkaian listrik dalam alat ini, tetapi di sesuaikan dengan sinyal yang ditransmisikan dari pemancar. Sinyal yang ada mengatur intensitas berkas elektron dan dan sebab itu kecerahan yang dihasilkan sebagai berkas merambat ke layar. Hal ini merupakan variasi dari intensitas dari berkas seperti berkas balik dan lintangnya akan membentuk partikel gambar.

#### 1.6 Aplikasi dalam bidang biologi

Selama periode hujan badai pada tahun 1786, Luigi Galvani menyentuh otot tungkai seekor katak dengan menggunakan suatu metal, dan teramati bahwa otot katak dengan menggunakan suatu metal, dan teramati otot katak tersebut berkontraksi. Dari pengamatan tersebut merambat bahwa aliran listrik akibat badai tersebut merambat melalui syaraf si katak sehingga otot-ototnya berkontraksi. Sel syaraf menghantarkan impils dari satu bagian tubuh ke bagian tubuh lainnya ,

impuls terdiri dari ion-ion yang mengalir sepanjang sel syaraf. Untuk mengetahui penerapan listrik dalam bidang biologi baik yang timbul dalam tubuh manusia ataupun yang digunakan pada tubuh manusia.

#### a. System syaraf



Sel saraf atau neuron berfungsi mengirimkan pesan (*impuls*) yang berupa rangsang atau tanggapan. Jutaan sel saraf ini membentuk suatu sistem saraf. Setiap neuron terdiri dari satu badan sel yang di dalamnya terdapat sitoplasma dan inti sel. Dari badan sel keluar dua macam serabut saraf, yaitu dendrit dan akson (neurit).

Dendrit berfungsi mengirimkan impuls ke badan sel saraf, sedangkan akson berfungsi mengirimkan impuls dari badan sel ke jaringan lain. Akson biasanya sangat panjang. Sebaliknya, dendrit pendek.

Setiap neuron hanya mempunyai satu akson dan minimal satu dendrit. Kedua serabut saraf ini berisi plasma sel. Pada bagian luar akson terdapat lapisan lemak disebut mielin yang merupakan kumpulan sel Schwann yang menempel pada akson. Sel Schwann adalah sel glia yang membentuk selubung lemak di seluruh serabut saraf mielin. Membran plasma sel Schwann disebut neurilemma. Fungsi mielin adalah melindungi akson dan memberi nutrisi. Bagian dari akson yang tidak terbungkus mielin disebut nodus Ranvier, yang berfungsi mempercepat penghantaran impuls.

Berdasarkan struktur dan fungsinya, sel saraf dapat dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu sel saraf sensori, sel saraf motor, dan sel saraf intermediet (asosiasi).

#### **Sel saraf sensori**

Fungsi sel saraf sensori adalah menghantar impuls dari reseptor ke sistem saraf pusat, yaitu otak (ensefalon) dan sumsum belakang

(medula spinalis). Ujung akson dari saraf sensori berhubungan dengan saraf asosiasi (intermediet).

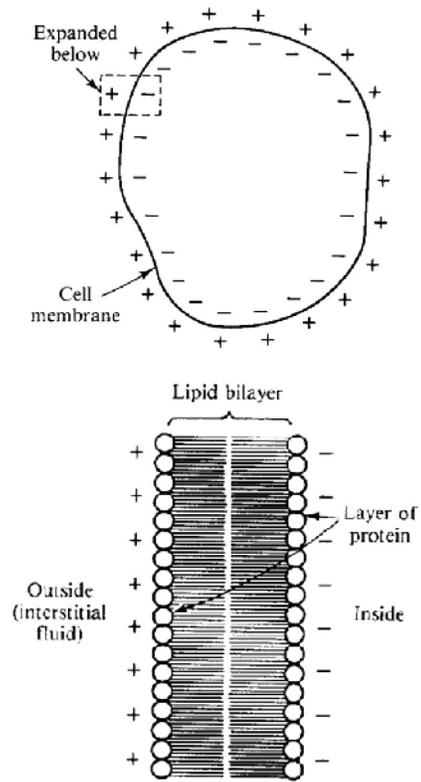
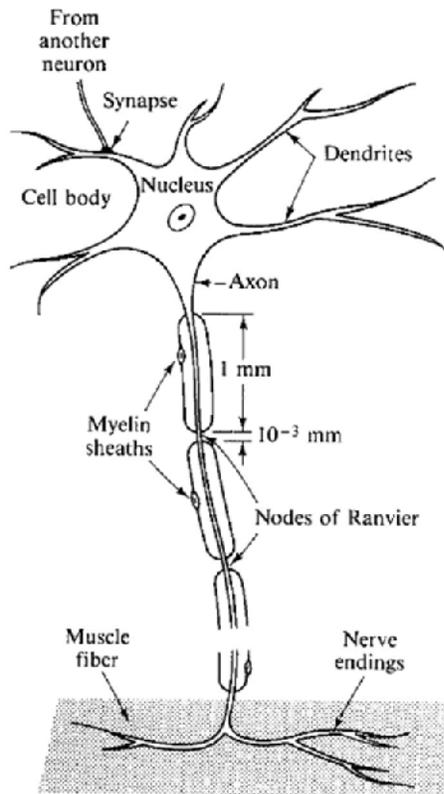
### **Sel saraf motor**

Fungsi sel saraf motor adalah mengirim impuls dari sistem saraf pusat ke otot atau kelenjar yang hasilnya berupa tanggapan tubuh terhadap rangsangan. Badan sel saraf motor berada di sistem saraf pusat. Dendritnya sangat pendek berhubungan dengan akson saraf asosiasi, sedangkan aksonnya dapat sangat panjang.

### **Sel saraf intermediet**

Sel saraf intermediet disebut juga sel saraf asosiasi. Sel ini dapat ditemukan di dalam sistem saraf pusat dan berfungsi menghubungkan sel saraf motor dengan sel saraf sensori atau berhubungan dengan sel saraf lainnya yang ada di dalam sistem saraf pusat. Sel saraf intermediet menerima impuls dari reseptor sensori atau sel saraf asosiasi lainnya. Kelompok-kelompok serabut saraf, akson dan dendrit bergabung dalam satu selubung dan membentuk urat saraf. Sedangkan badan sel saraf berkumpul membentuk ganglion atau simpul saraf.

Sel-sel mampu menghasilkan potensial listrik yang merupakan lapisan tipis muatan positif pada permukaan luar dan lapisan tipis muatan negatif pada permukaan dalam bidang batas/membran. Kemampuan sel syaraf (*neurons*) menghantarkan isyarat biolistrik sangat penting. Gambar dibawah ini adalah sebuah sel syaraf dengan ekor panjangnya yang disebut sebagai axon atau serat syaraf membawa isyarat biolistrik atau pulsa syaraf menjauhi sel menuju otot, kelenjar atau neuron lain .



Penampang lintang yang kecil dengan tahanan yang tinggi

$$R = \tilde{r} \frac{L}{A}$$

R : hambatan (  $\Omega$  )

$\tilde{r}$  : konstanta kesebandingan/ resistivitas (  $\Omega / m$  )

L : panjang akson ( cm )

A : luas penampang (  $cm^2$  )

Secarik akson dengan panjang 1 cm memiliki tahanan listrik sekitar  $2,5 \times 10^8 \Omega \cdot S$

Saraf dalam keadaan istirahat memiliki konsentrasi ion di dalam dan luar sel syaraf adalah sebagai berikut:

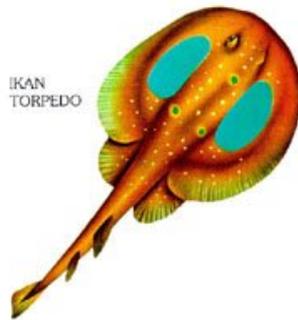
ion	Konsentrasi ( mmol / L )	
	Di dalam	Di Luar
Na <sup>+</sup>	15	145
K <sup>+</sup>	150	5

CI	9	120
Lainnya	156	30

b. Ikan listrik

Beberapa ratus species ikan memiliki organ penghasil listrik, namun hanya sedikit yang dapat menghasilkan daya listrik yang kuat. Organ penghasil listrik yang dimiliki oleh kebanyakan ikan tersusun dari sel saraf dan sel otot yang telah mengalami perubahan penting. Bentuk organ listrik seperti piringan kecil yang memproduksi lendir disebut elektrosit, tersusun dan menyatu di bagian atas dari susunan lain yang sejajar. Pada umumnya, semua piringan menghadap arah yang sama yang memuat 150 atau 200 piringan setiap susunannya. Misalnya, pada ikan torpedo terdapat 140 sampai 1000 piringan listrik pada setiap kolom. Pada ikan torpedo yang sangat besar, jumlah seluruh piringan sampai setengah juta. Prinsip kerja piringan listrik ini mirip dengan cara kerja baterai. Ketika ikan beristirahat, otot-otot yang tidak berhubungan belum aktif. Namun jika menerima pesan dari saraf, akan segera bekerja secara serentak untuk mengeluarkan daya listrik. Pada saat itu, voltase semua piringan listrik atau elektrosit menyatu, sehingga mampu menghasilkan daya listrik sampai 220 volt pada ikan torpedo atau sampai 650 volt pada belut listrik.

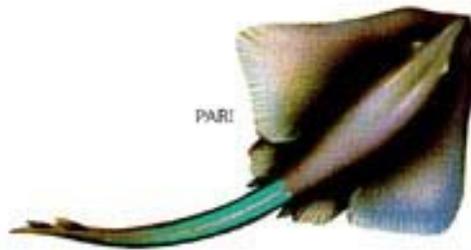
Pada umumnya semua spesies ikan tawar hanya bersifat listrik ringan, kecuali sembilang listrik dan belut listrik. Ikan listrik yang hidup di laut memiliki tenaga listrik yang lebih kuat dan berbahaya, karena air laut mengandung garam membuat dirinya lebih tahan terhadap arus listrik. Posisi dan bentuk organ listrik ini bervariasi tergantung pada speciesnya. Dibawah ini dapat dilihat posisi organ listrik dari beberapa spesies ikan:



Ikan torpedo, organ listriknya terdapat pada pangkal sirip



Belut listrik, organ listriknya membentuk dua kolom di sepanjang tubuh bagian bawah yang mengirim arus listrik dari ekor sampai kepala



Pari dan Mormyridae memiliki organ listrik di bagian ekor, mereka hanya mampu mengeluarkan daya listrik yang lemah



Pada beberapa Uranoscopidae, organ listriknya terletak di bagian tengah tubuhnya.



Ikan sembilang, organ tubuhnya ditemukan di kepala

Apa manfaatnya menghasilkan listrik di dalam laut, bagi ikan listrik? Kemampuan mengeluarkan daya listrik yang besar adalah untuk mempertahankan diri terhadap pemangsa atau musuh dan untuk menangkap mangsa. Dengan menciptakan gelombang arus listrik secara terus menerus ke perairan disekitarnya, melalui pelepasan daya listrik mencapai lebih dari 1000 impuls per detik. Bila ada sesuatu yang memasuki medan listrik ini, akan membuat perubahan medan yang akan segera diketahui oleh ikan listrik. Hal ini dapat dilakukan berkat kepekaan ikan listrik terhadap perubahan arus listrik.

Salah satu contoh ikan listrik adalah belut listrik. Belut listrik (*Electrophorus electricus*) adalah sejenis ikan yang dapat



menghasilkan aliran listrik kuat (sampai 650 volt) untuk berburu dan membela diri. Walaupun namanya belut listrik, ia bukan termasuk golongan belut melainkan ikan (Gymnotiformes).

Belut listrik biasa ditemukan di sungai Amazon dan (serta daerah-daerah disekitarnya). Ia bisa tumbuh hingga panjang 2,5 m (8,2 kaki) dan berat 20 kg (44 pound), walaupun biasanya ukuran rata-ratanya adalah 1 m.

Belut listrik, yang panjangnya kadang-kadang melebihi 6,6 kaki (2 meter), hidup di Amazon. Dua pertiga tubuh ikan ini tertutup dengan alat-alat listrik, yang mempunyai sekitar 5000 hingga 6000 titik listrik. Oleh karena itu, mereka dapat menghasilkan arus listrik sebesar 500 volt per sekitar 2 amper. Kira-kira kekuatannya melebihi yang digunakan oleh seperangkat TV biasa.

Kemampuan menghasilkan listrik telah dianugerahkan kepada makhluk ini untuk tujuan pertahanan maupun penyerangan. Ikan ini menggunakan arus listrik ini untuk membunuh pemangsanya dengan memberi mereka kejutan listrik. Kejutan listrik yang dihasilkan oleh ikan ini cukup untuk membunuh ternak dari jarak 6,6

kaki (2 meter). Cara kerja penghasil listrik pada ikan ini dapat digunakan sangat cepat mencapai dua hingga tiga perseribu detik.

Kekuatan yang luar biasa pada makhluk ini merupakan suatu keajaiban mengagumkan tentang penciptaannya itu sendiri. Sistem ini sangat rumit dan tidak mungkin dijelaskan melalui perkembangan setahap demi setahap. Hal ini karena sistem listrik tanpa pemanfaatan penuh tidak bisa membawa keuntungan apa pun bagi makhluk ini untuk mempertahankan diri. Dengan kata lain, semua bagian pada sistem ini harus telah tercipta secara sempurna di saat yang bersamaan.

### **Ikan yang "Melihat" dengan Medan Listrik**



Selain ikan yang dipersenjatai dengan muatan listrik potensial, ada jenis ikan lain pula yang menghasilkan sinyal bertegangan rendah dua hingga tiga volt. Jika ikan-ikan ini tidak menggunakan sinyal listrik lemah semacam ini untuk berburu atau mempertahankan diri, lalu digunakan untuk apa?

Ikan ini memanfaatkan sinyal lemah ini sebagai alat indera. Allah menciptakan sistem indera dalam tubuh ikan ini, yang menghantarkan dan menerima sinyal-sinyal tersebut.

Ikan ini menghasilkan pancaran listrik dalam suatu alat khusus di ekornya. Listrik ini dipancarkan melalui ribuan pori-pori di punggung makhluk ini dalam bentuk sinyal yang untuk sementara menciptakan medan listrik di sekitarnya. Benda apa pun dalam medan ini membiaskannya, sehingga ikan ini mengetahui ukuran, daya alir dan gerak dari benda tersebut. Pada tubuh ikan ini, ada pengindra listrik yang terus menentukan medan ini seperti halnya radar.

Pendeknya, ikan ini memiliki radar yang memancarkan sinyal listrik dan menerjemahkan perubahan pada medan yang disebabkan oleh benda yang menghambat sinyal-sinyal di sekitar

tubuhnya. Ketika kerumitan radar yang digunakan oleh manusia kita renungkan, penciptaan mengagumkan dalam tubuh ikan akan menjadi jelas.

c. Isyarat listrik tubuh

Isyarat listrik merupakan hasil perlakuan kimia dari tipe-tipe sel tertentu. Dengan mengukur isyarat listrik tubuh secara selektif sangat berguna untuk memperoleh informasi klinik tentang fungsi tubuh. Yang termasuk kedalam isyarat listrik tubuh :

1. EMG ( Elektromiogram )

Elektromiogram adalah pencatatan potensial otot biolistrik selama pergerakan otot.

2. ENG ( Elektroneurogram )

Pembuatan ENG :

- a. Untuk mengetahui keadaan lengkungan reflex
- b. Untuk mengetahui kecepatan konduksi saraf motoris dan sensoris
- c. Untuk menentukan penderita miastenia gravis

3. ERG ( Elektoretinogram )

Elektoretinogram adalah suatu bentuk kompleks potensial biolistrik yang ada pada retina mata yang dikerjakan melalui rangsangan cahaya pada retina.

4. EOG ( Elektrookulogram )

Elektrookulogram adalah suatu pengukuran/pencatatan berbagai potensial pada kornea retina sebagai akibat perubahan posisi dan gerakan mata.

5. EGG ( elektrogastrogram )

Elektrogastrogram merupakan EMG yang berkaitan gerakan peristaltic traktus gastrotestinalis.

6. EEG ( elektroensefalogram )

Elektroensefalogram adalah pencatatan potensial listrik otak merupakan sumasi dari potensial aksi sel syaraf di dalam otak.

Tujuan pemeriksaan EEG:

- a. Pada waktu operasi, apabila tidak dapat mempergunakan EKG, dapat mempergunakan EEG sebagai alat monitor
- b. Untuk mendiagnosis epilepsy dan klasifikasi epilepsy.
- c. Untuk menunjukkan tumor otak, dimana aktivitas listrik pada daerah tumor akan menurun.

7. EKG ( Elektrokardiogram )

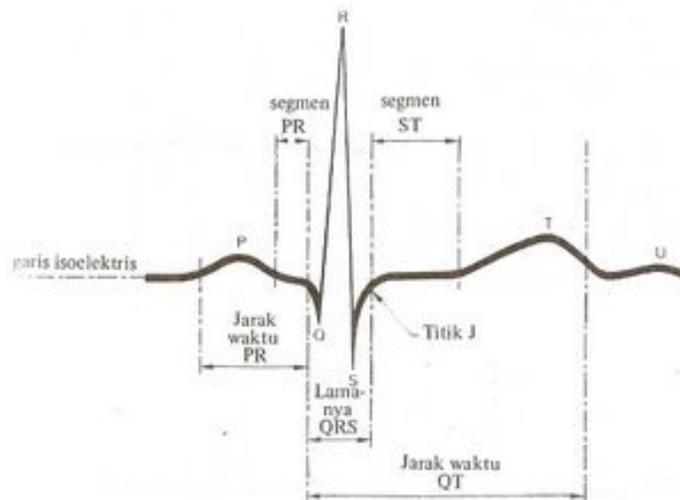
Elektrokardiogram adalah merupakan pencatatan isyarat biolistrik jantung, dilakukan pada permukaan kulit. Salah satu bentuk EKG:



Untuk simulasi jantung buatan. Alat ini digunakan untuk kalibrasi ECG, karena dengan phantom ECG, kita dapat mengatur pola waveform ECG yang kita inginkan.

Puncak EKG, segmen dan jarak-

waktu



Adalah suatu gambaran grafis dari perbedaan potensial antara dua titik pada permukaan tubuh. Dengan ini terjadi kurva, yang terdiri dari berbagai puncak, yang terdiri dari berbagai puncak. Puncak yang menuju ke atas disebut positif, dan yang menuju ke bawah disebut negatif.

Puncak P disebabkan karena depolaritas atrium. Q, R dan S membentuk bersama-sama kompleks QRS, dan ini adalah hasil depolarisasi ventrikel. Setelah kompleks QRS, menyusul puncak T, yang merupakan ungkapan dari repolarisasi ventrikel.

Peranan dari puncak U, tidaklah begitu penting, dan berkaitan antara lain dengan konsentrasi kalsium dan kalium dalam darah. Terjadi puncak U ini, kemungkinan disebabkan karena repolarisasi dari serabut Purkinje.

Bahwa repolarisasi dari atrium sering tidak jelas terlihat pada EKG adalah disebabkan karena gelombang repolarisasi ini (T) kira-kira terjadi bersamaan dengan depolarisasi ventrikel (QRS) sehingga hilang ke dalamnya. Pemberian nama dari puncak-puncak dalam kompleks QRS, adalah sebagai berikut. Gelombang pertama, bila negatif dinamakan Q. Defleksi positif pertama adalah R. Defleksi positif kedua disebut R'. Defleksi negatif pertama sesudah R disebut S, suatu defleksi negatif sesudah R' dan S'. Huruf kecil q, r dan s, dan berturut-turut r' dan s', digunakan bila defleksinya adalah kecil. Besarnya suatu defleksi adalah relatif dan mempunyai hubungan dengan refleksi sebelum atau sesudahnya, di dalam kompleks QRS yang sama.

**Note :**

**Kalau secara Bahasa Inggris disebut dengan ECG**

***Atrium*** – serambi jantung

***Depolarisasi*** – aktivasi, eksitasi

***EKG*** – elektrokardiogram, perekaman dari perbedaan potensial elektrik yang terjadi sewaktu siklus jantung

***Repolarisasi*** – pemulihan kembali, dari potensial waktu istirahat.

***Serabut Purkinje*** – suatu anyaman dari serabut, yang membentuk hubungan, antara cabang berkas His, dengan sel-sel miokard dari ventrikel

**His, berkas** – berkas dengan kemampuan menghantarkan rangsangan secara cepat, yang berjalan dari simpul atrio ventrikuler ke sel-sel ventrikel

**Miokard** – jaringan otot jantung.

**Ventrikel** – kamar jantung