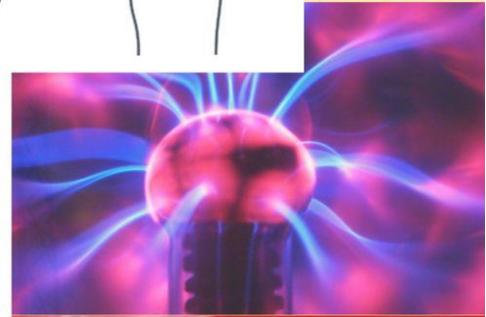
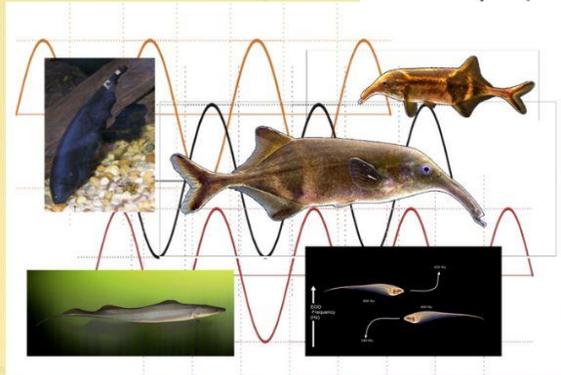
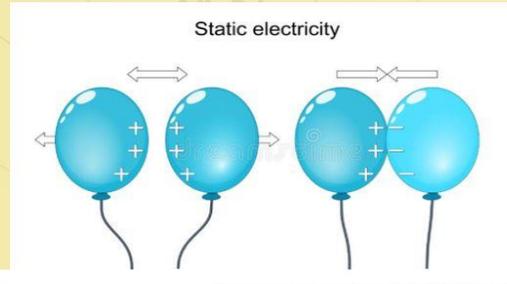


Dr. Wahyuni Handayani, M.T.
Dr. Tri Wahyu Agustina, M.Pd.



Listrik Statis & Aplikasi pada Makhluk Hidup

Dr. Wahyuni Handayani, M.T.

Dr. Tri Wahyu Agustina, M.Pd.

Listrik Statis
&
Aplikasi pada Makhluk Hidup



Listrik Statis dan Aplikasi pada Makhluk Hidup

Penulis:

Dr. Wahyuni Handayani, M.T.
Dr. Tri Wahyu Agustina, M.Pd.

ISBN: 978-623-98725-5-7

Penyunting:

Dr. Sutarno, M.Pd.

Desain sampul dan tata letak:

Muhammad Ghilman Firdaus

Penerbit:

Yayasan Rumah Rawda Indonesia

Alamat Penerbit:

Griya Cempaka Arum Cluster Andalus Blok B115 RT 02 RW 08,
Kelurahan Cimenerang, Kecamatan Gedebage 40294, Jawa Barat.
Telp. 081313226480

Email: info@rumahrawdaindonesia.com

www.rumahrawdaindonesia.com

Cetakan pertama, November 2022

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas Rahmat dan Ridho-Nya, buku berjudul “Listrik Statis dan Aplikasi pada Makhluk Hidup” dapat diselesaikan. Buku ini disusun dan dapat digunakan untuk siapa saja yang membutuhkan informasi terkait listrik statis dan aplikasi pada makhluk hidup.

Buku ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang konsep listrik statis dan aplikasinya pada makhluk hidup. Buku ini juga dilengkapi dengan beberapa contoh soal sehingga bisa memahami lebih dalam mengenai konsep listrik statis serta hubungannya dengan aspek Biologi.

Tim penyusun menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan buku ini, oleh karena itu sangat diharapkan adanya kritik dan saran dari berbagai pihak. Tim penyusun mengucapkan terima kasih kepada semua pihak atas bantuan dan dorongan dalam menyelesaikan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan kebaikan dan manfaat kepada para pembaca.

Bandung, November 2022

Penulis

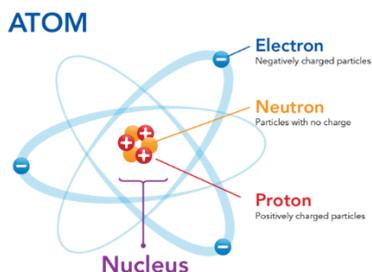
DAFTAR ISI

Kata Pengantar	1
Daftar Isi.....	2
Listrik Statis	3
I. Gaya Elektrostatik	4
A. Muatan Listrik.....	5
B. Mengubah Kenetralan Benda	7
C. Gaya Elektrostatika	10
II. Medan Listrik	22
A. Medan Listrik	22
B. Garis-Garis Gaya.....	24
C. Kuat Medan Listrik	28
III. Potensial Listrik.....	35
A. Usaha pada Muatan Listrik.....	35
B. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik.....	38
C. Hubungan Medan Listrik dan Potensial Listrik	43
D. Potensial Listrik yang disebabkan oleh Muatan Titik.....	43
E. Garis-Garis Ekipotensial	45
IV. Aplikasi Listrik Statis pada MakhluK Hidup	50
A. Struktur Sel Saraf	50
B. Kelistrikan pada Jantung	55
C. Kelistrikan pada Sel Otot Rangka	58
D. Kelistrikan pada Hewan	60
Daftar Pustaka	63

LISTRIK STATIS

Listrik statis adalah hasil dari sesuatu peristiwa yang terjadi setiap kali atom-atom dari lapisan permukaan dua bahan bergesekan satu sama lain (yang disebut pengisian triboelektrik). Saat atom dari dua permukaan bergerak bersama-sama dan kemudian terpisah, beberapa elektron dari satu permukaan dipertahankan oleh yang lain. Dapat dikatakan bahwa listrik statis terjadi karena adanya ketidakseimbangan muatan listrik di dalam atau di permukaan suatu bahan.

Telah kita pahami bahwa semua benda terbuat dari atom. Atom-atom ini terdiri dari bagian-bagian yang lebih kecil lagi yang disebut proton, neutron, dan elektron. Proton bermuatan positif, neutron tidak bermuatan, dan elektron bermuatan negatif. Dalam kondisi normal, jumlah proton dan elektron sama sehingga atom tidak bermuatan.



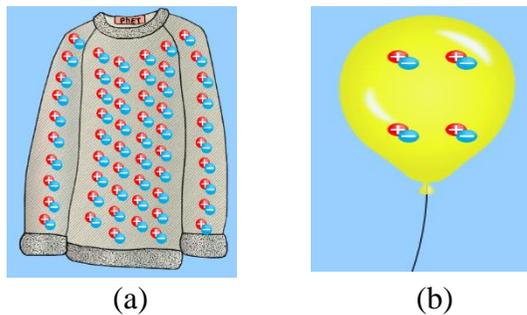
Gambar 1.1 Bagian-bagian Atom

Saat dua bahan saling bergesekan, elektron dapat berpindah dari atom ke atom atau dari satu atom ke atom lainnya (muatan triboelektrik). Ini dapat berarti bahwa atom dapat memiliki muatan positif atau negatif. Besarnya muatan yang dihasilkan tergantung pada hal-hal berikut: 1) Jenis bahan yang mengalami kontak, 2)

Berapa banyak gesekan/waktu, 3) Berapa kelembaban relatifnya. Pada kelembaban relatif yang rendah, karena lingkungan kering, banyaknya muatan yang terbentuk akan meningkat secara signifikan.

I. GAYA ELEKTROSTATIS

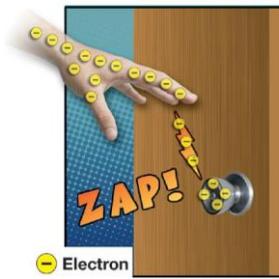
Pada saat hari cerah, setelah kamu berjalan di luar ruangan lalu kamu masuk ke dalam ruangan ber-AC dan memegang handel pintu, tiba-tiba kamu merasa ada sesuatu yang menyengat tanganmu. Pernahkah kamu merasakan peristiwa seperti itu? Peristiwa tersebut dinamai gejala listrik statis. Peristiwa kejutan listrik ini terjadi karena tangan dan handel pintu ingin selalu menempatkan dirinya dalam keadaan netral. Keadaan netral adalah keadaan dimana benda memiliki jumlah muatan positif dan muatan negatif yang sama banyaknya seperti diperlihatkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Benda Netral.

- (a) Pada baju muatan negatif dan positif sama banyaknya
- (b) Pada balon muatan negatif dan positif sama banyaknya

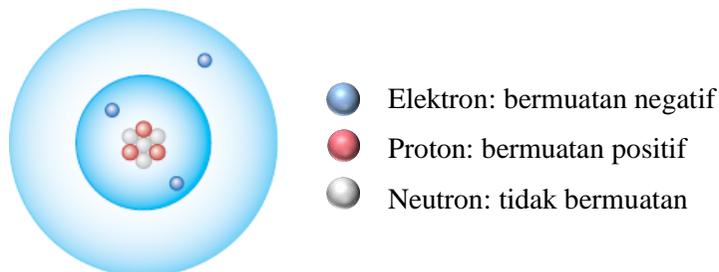
Tanganmu tidak dalam keadaan netral, tanganmu kelebihan muatan negatif. Maka ketika menyentuh handel pintu, sebagian muatan negatifnya berpindah ke handel. Peristiwa penetralan inilah yang dirasakan oleh tangan sebagai kejutan listrik.



Gambar 1.3 Peristiwa Kejutan Listrik

A. Muatan Listrik

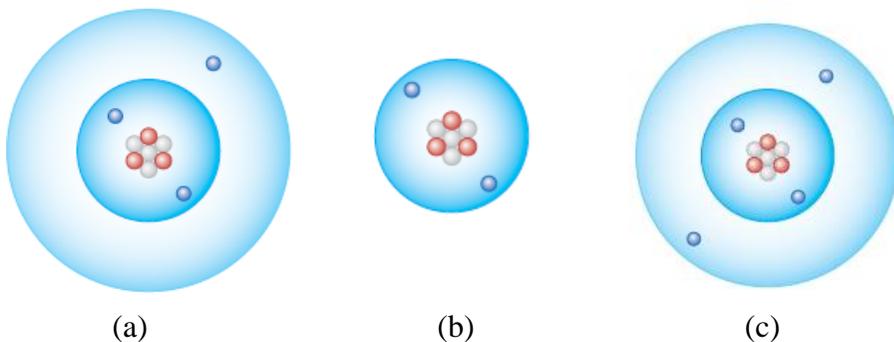
Muatan listrik terdiri dari muatan positif dan muatan negatif. Orang pertama yang mengamati dan menamai muatan positif dan negatif adalah Benjamin Franklin (1706-1790). Agar kalian memahami tentang muatan positif dan muatan negatif, mari kita pahami dulu komponen-komponen atom. Benda tersusun atas milyaran atom. Atom tersusun atas proton, neutron dan elektron. Atom diilustrasikan seperti Gambar 1.4. Proton dan neutron terdapat di dalam inti atom, proton bermuatan positif dan neutron tidak bermuatan, sedangkan elektron yang terdapat di kulit atom muatannya negatif.



Gambar 1.4. Ilustrasi atom

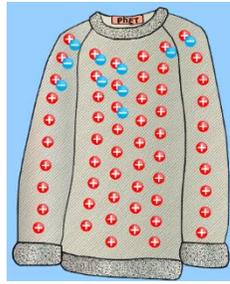
Dalam kondisi normal, atom selalu netral yaitu jumlah proton dan elektron sama banyaknya. Seperti tampak pada Gambar 1.5 (a),

dalam sebuah atom netral proton sama banyaknya dengan elektron. Karena suatu hal misalnya gesekan, elektron dapat meninggalkan atom sehingga atom kekurangan elektron, keadaan ini menjadikan atom bermuatan positif atau disebut atom positif seperti diperlihatkan pada Gambar 1.5 (b). Jika karena suatu hal atom mendapat tambahan elektron sehingga atom kelebihan elektron maka atom bermuatan negatif dan disebut ion negatif seperti tampak pada Gambar 1.5 (c). Dengan demikian, ditinjau dari kelistrikkannya maka ada tiga keadaan atom yaitu atom netral, ion positif dan ion negatif. Pembentukan ion positif dan ion negatif dari sebuah atom dikendalikan oleh perpindahan elektron. Elektron dapat dengan mudah masuk dan meninggalkan bahan tetapi proton tidak mudah karena terikat di inti atom

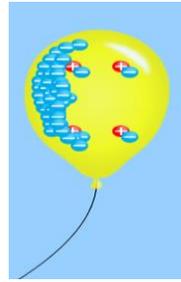


Gambar 1.5. (a) Atom Netral (b) Ion Positif (c) Ion Negatif

Telah kita ketahui bahwa setiap benda tersusun atas milyaran atom-atom. Oleh karena itu, jika pada benda atom-atom penyusunnya lebih banyak ion positif maka dikatakan bahwa benda bermuatan positif dan jika atom-atom penyusun benda lebih banyak ion negatif maka dikatakan bahwa benda bermuatan negatif. Keadaan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 1.6.



(a)



(b)

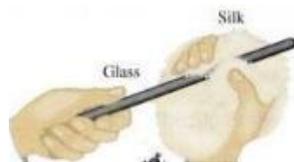
Gambar 1.6. Benda Bermuatan Listrik

(a) Baju bermuatan positif

(b) Balon bermuatan negatif

B. Mengubah Kenetralan Benda

Kita dapat membuat keadaan sebuah benda menjadi tidak netral dengan cara mengubah jumlah elektron pada benda. Mengubah jumlah elektron biasanya disebut *memuati* dan benda yang sudah bermuatan listrik biasanya disebut *muatan*. Salah satu cara memuati dilakukan dengan menggosok benda tersebut. Perhatikan dua peristiwa berikut yang diperlihatkan oleh Gambar 1.7.



(a)



(b)

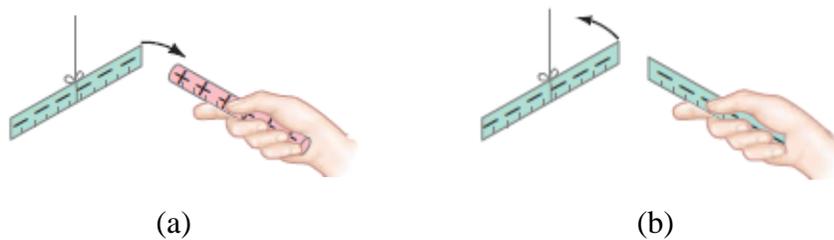
Gambar 1.7. Menggosok Batang dengan Kain

(a) Batang kaca digosok kain sutra

(b) Batang plastik digosok kain wol

Gambar 1.8 adalah gambaran aktivitas menggosok batang plastik dan kaca. Setelah batang plastik digosok dengan kain wol, kemudian didekatkan pada batang kaca yang sudah digosok dengan

kain sutra, ternyata kedua batang tersebut tarik-menarik. Sebaliknya, batang plastik yang digosok dengan kain wol dan didekatkan dengan batang plastik lain, ternyata kedua batang plastik tolak-menolak. Demikian pula pada batang kaca, jika keduanya didekatkan maka tolak-menolak. Berdasarkan peristiwa tersebut, maka dinyatakan bahwa muatan pada batang kaca dan muatan pada batang plastik berbeda jenisnya. Dinyatakanlah bahwa batang kaca bermuatan positif sedangkan batang plastik bermuatan negatif.

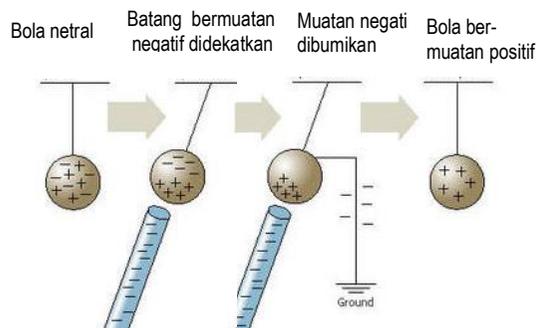


Gambar 1.8. Peristiwa tarik-menarik dan tolak-menolak
(a) Batang plastik dan batang kaca tarik menarik
(b) Batang plastik tolak menolak

Menggosok batang gelas dengan sutra mengakibatkan elektron-elektron atom gelas terlepas, dan pindah ke sutra sehingga batang gelas kekurangan elektron dan sutra kelebihan elektron. Mengapa elektron pada atom gelas yang terlepas bukan elektron pada atom sutra? Hal ini dijelaskan dengan mengaitkannya dengan sifat atom khususnya gaya tarik antara proton di dalam inti atom dengan elektron. Gaya tarik inti bekerja untuk mengikat elektron agar tidak mudah terlepas dari atom. Kekuatan gaya tarik proton berbeda-beda sesuai sifat masing-masing atom. Elektron-elektron pada atom gelas lebih mudah lepas karena gaya tarik proton pada atom gelas lebih lemah dibandingkan gaya tarik proton atom sutra, oleh karena itu

atom gelas lebih mudah kehilangan elektron dibanding atom sutra. Dari pembahasan tersebut, dapat dinyatakan bahwa kekuatan gaya tarik proton atom sutra mampu mengikat elektron yang pindah dari atom gelas.

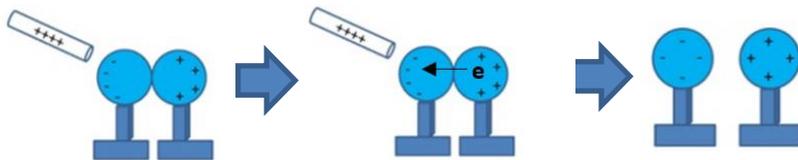
Cara lain dalam memuati sebuah benda adalah dengan cara induksi. Memuati dengan cara induksi dapat dilakukan dalam dua cara. Cara yang pertama seperti diperlihatkan pada Gambar 1.9. Mula-mula sebuah bola konduktor (logam) dalam keadaan netral. Benda lain yang bermuatan negatif (tongkat) lalu didekatkan pada bola, maka muatan negatif pada bola bergerak menjauhi tongkat. Mengapa? Karena sesuai sifat muatan, muatan sejenis akan saling menolak. Muatan negatif pada bola selanjutnya dibumikan dengan cara menghubungkan bola dengan bumi melalui seutas kawat. Sekarang bola yang semula netral menjadi bola yang bermuatan positif.



Gambar 1.9. Memberi muatan dengan cara induksi

Cara kedua memuati dengan cara induksi diperlihatkan pada Gambar 1.10. Dua bola logam yang tidak bermuatan berada dalam keadaan kontak. Ketika sebuah batang bermuatan dibawa mendekati salah satu dari kedua bola tersebut, terjadi aliran elektron dari satu

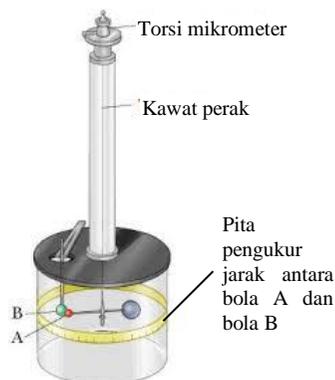
bola ke bola yang lain. Karena batang bermuatan positif maka batang akan menarik elektron yang bermuatan negatif dan bola yang berada di dekat batang menerima elektron dari bola konduktor lainnya. Hal ini menyebabkan bola sisi kiri bermuatan negatif dan bola sisi kanan bermuatan sama besar tapi bertanda positif. Jika kedua bola terpisah sedangkan batang tetap pada tempat semula, kedua bola akan mempunyai muatan yang sama besar dan berlawanan tanda.



Gambar 1.10. Memberi muata dengan cara induksi

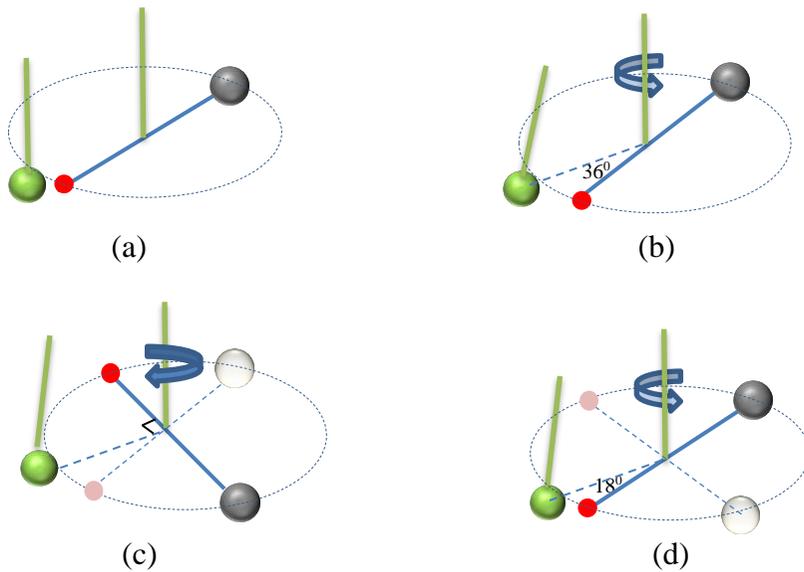
C. Gaya Elektrostatika

Charles Coulomb (1736 – 1806) adalah orang yang menyatakan tentang gaya interaksi dari dua benda bermuatan listrik. Karena itu gaya interaksi ini disebut gaya Coulomb atau gaya elektrostatika. Interaksi dua benda bermuatan listrik diteliti oleh Coulomb menggunakan neraca puntir seperti tampak pada Gambar 1.11.



Gambar 1.11. Neraca Puntir

Percobaan Coulomb seperti diperlihatkan pada Gambar 1.12, adalah sebagai berikut:



Gambar 1.12. Percobaan Neraca Puntir

- (a) Bola A dan bola B yang jenis muatannya sama didekatkan
 - (b) Bola A dan bola B tolak-menolak dan memuntir kawat perak sejauh 36°
 - (c) Torsi mikrometer diputar dengan arah berlawanan
 - (d) Efek puntiran terjadi lagi
-
- (a) Mula-mula Bola A dan bola B yang jenis muatannya sama didekatkan.
 - (b) Karena terjadi gaya tolak-menolak antara bola A dan bola B maka gaya elektrostatis memuntir kawat perak sejauh 36° (efek puntiran)
 - (c) Efek puntiran dipulihkan dengan cara memutar torsi mikrometer dengan arah berlawanan dengan efek puntiran sehingga bola A dan bola B terpisah secara tegak lurus

- (d) Efek puntiran terjadi lagi hingga kedua bola saling mendekati namun kemudian saling menjauh sebesar 18°
- (e) Coulomb menetapkan sudut pemulihan puntiran sebagai ukuran relatif dari gaya listrik yang bekerja pada bola A
- (f) Coulomb menalarkan bahwa untuk mendekatkan bola A dan bola B menjadi setengah kali jarak sebelumnya diperlukan gaya sebesar empat kali gaya sebelumnya seperti dinyatakan dalam Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Hubungan antara jarak bola dengan besarnya gaya tolak

Muatan Bola A	Muatan Bola B	Jarak antara Bola A dan Bola B	Sudut Pemulihan Efek Puntiran	Gaya tolak
Q	Q	36°	0	F
		18°	$144^\circ = (4 \times 36^\circ)$	4F
		9°	$576^\circ = (16 \times 36^\circ)$	16F

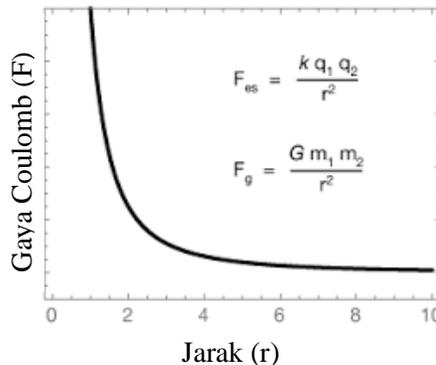
Untuk memperoleh besarnya muatan pada bola dengan nilai setengah dan seperempat dari muatan awal, Coulomb melakukannya dengan cara menyentuhkan bola B ke bola lainnya yang tak bermuatan. Dari percobaannya Coulomb menyimpulkan bahwa gaya pada dua bola bermuatan sebanding dengan hasil kali muatan pada kedua bola, seperti disajikan pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2. Hubungan antara gaya dengan besarnya muatan

Muatan Bola A	Muatan Bola B	Gaya tolak
Q	Q	F
Q	$1/2Q$	$1/2F$
Q	$1/4Q$	$1/4F$

Jika dinyatakan dalam grafik, hubungan antara gaya Coulomb terhadap jarak antara kedua muatan diperlihatkan pada Gambar 1.13 dan berdasarkan eksperimennya, Coulomb menyatakan bahwa besarnya gaya yang dilakukan oleh satu muatan listrik pada muatan lainnya:

- (a) Bekerja sepanjang garis yang menghubungkan kedua muatan tersebut,
- (b) Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua muatan.
- (c) Berbanding lurus dengan perkalian kedua muatan



Gambar 1.13. Grafik perubahan gaya terhadap perubahan jarak antar muatan

Dengan demikian bunyi Hukum Coulomb adalah, **“Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua muatan listrik berbanding lurus dengan hasil kali besar kedua muatan dan berbanding terbalik dengan jarak antara kedua muatan”**

Jika kita ingin mengetahui besar gaya Coulomb tanpa perlu mengetahui arahnya maka kita cukup memerlukan informasi besar muatan dan jarak antar muatan. Besarnya gaya tarik atau gaya tolak secara matematis dinyatakan dalam persamaan 1.1.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

Dengan

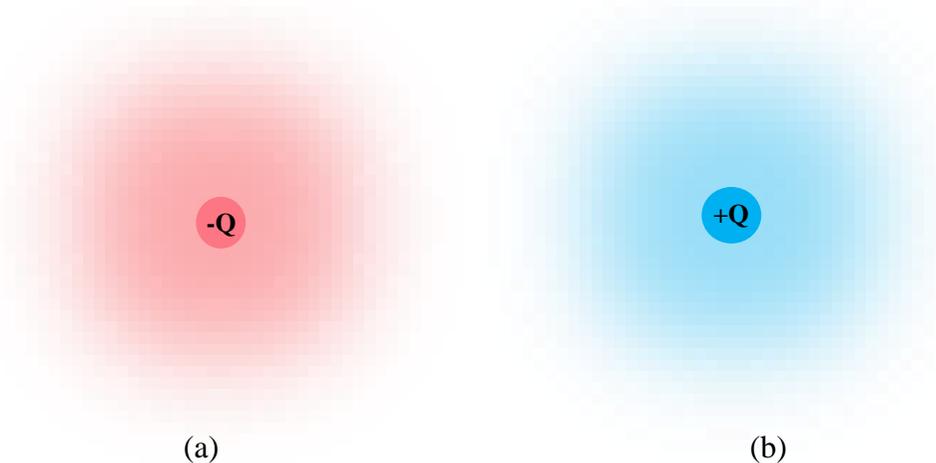
F = gaya Coulomb (N)

q_1 dan q_2 = muatan listrik (C)

$k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

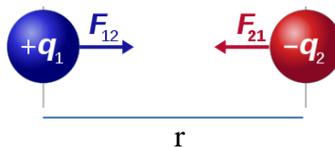
r = jarak antar muatan (m)

Dalam mempelajari Hukum Coulomb, biasanya muatan digambarkan dalam bentuk lingkaran kecil. Perhatikanlah Gambar 1.14. Muatan positif digambarkan berupa lingkaran kecil dan diberi simbol +Q sedangkan muatan negatif digambarkan berupa lingkaran kecil dan diberi simbol -Q. Di sekitar muatan terdapat medan gaya listrik yang dihasilkan oleh muatan tersebut. Dalam buku-buku teks, medan gaya listrik biasanya disebut medan listrik saja. Medan listrik mengerjakan gaya (menarik atau menolak) pada muatan lain yang ada di sekitarnya. Gaya tersebut bersifat *tak sentuh*. Dikatakan *gaya tak sentuh* karena tarikan atau tolakan pada muatan lain tidak terjadi dengan cara kontak langsung. Gaya ini timbul akibat adanya efek medan listrik yang dihasilkan oleh muatan. Jadi meskipun dua muatan tidak bersentuhan atau berjauhan, kedua muatan dapat tarik-menarik atau tolak-menolak. Semakin jauh dari pusat muatan, kekuatan medan listrik semakin lemah oleh karena itu gaya tarik atau gaya tolak pun semakin lemah.



Gambar 1.14. Medan Listrik (a) Muatan Negatif (b) Muatan Positif

Setelah kalian memahami konsep medan listrik, marilah sekarang kita pelajari gaya interaksi yang terjadi pada dua muatan yang terpisah pada suatu jarak r . Telah kita pelajari sebelumnya jika dua benda berlainan jenis muatannya, maka kedua benda tarik-menarik. Sebaliknya jika kedua benda memiliki jenis muatan yang sama, maka kedua benda tolak-menolak. Gaya interaksi bekerja di sepanjang garis hubung kedua muatan. Gaya tarik-menarik antara dua muatan berbeda jenis dinyatakan dalam vektor gaya seperti tampak pada Gambar 1.15. Mula-mula kedua muatan terpisah sejauh r . Karena gaya listrik yang dimiliki oleh masing-masing muatan, kedua muatan tarik-menarik dengan mengerahkan gayanya masing-masing. Tarik-menarik adalah upaya dari kedua muatan untuk menjadi netral. Ingatlah bahwa setiap atom dan benda di alam semesta ini selalu netral.



Gambar 1.15. Gaya Coulomb pada Muatan Berbeda Jenis $F_{12} = -F_{21}$

Muatan $+q$ menarik muatan $-q$ dan muatan $-q$ menarik muatan $+q$. Pada kondisi ini berlaku Hukum III Newton, gaya F_{21} yang dilakukan q_2 pada q_1 adalah negatif dari F_{12} . Gaya F_{21} mempunyai harga yang sama dengan F_{12} namun arahnya berlawanan.

Gaya tolak-menolak antara dua muatan yang sejenis dinyatakan dalam bentuk vektor gaya seperti tampak pada Gambar 1.16. F_{12} adalah gaya yang bekerja pada muatan q_1 yang disebabkan oleh kehadiran q_2 . Sedangkan F_{21} adalah gaya yang bekerja pada muatan q_2 yang disebabkan oleh kehadiran q_1 . Besarnya $F_{12} = F_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$.



Gambar 1.16. Gaya Coulomb pada Muatan Sejenis $F_{12} = -F_{21}$

Satuan dari muatan adalah coulomb (C). Sebagai gambaran, muatan yang dihasilkan pada peristiwa menggosok penggaris plastik dengan kain wol biasanya sekitar satu microcoulomb atau kurang. Dalam satu coulomb muatan negatif terdapat $1/(1,602 \times 10^{-19}) = 6,24 \times 10^{18}$ buah elektron. Kalian masih ingat bahwa muatan sebuah elektron adalah $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb. Agar kalian dapat memahami dengan lebih baik hukum Coulomb, perhatikanlah contoh soal pada halaman selanjutnya.

Contoh 1.1

Soal:

Dua buah muatan positif $q_1 = 50 \mu\text{C}$ dan $q_2 = 1 \mu\text{C}$, dipisahkan sejauh 5 cm. Berapakah gaya Coulomb yang dialami muatan q_1 ? Berapakah gaya Coulomb yang dialami muatan q_2 ?

Jawab:

Berdasarkan hukum Coulomb, gaya yang dialami oleh muatan $q_1 = 50 \times 10^{-6} \text{C}$ akibat adanya muatan $q_2 = 1 \times 10^{-6} \text{C}$ yang jaraknya $r = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$ adalah $F_{12} = 9 \times 10^9 \frac{(50 \times 10^{-6}) \times (1 \times 10^{-6})}{(5 \times 10^{-2})^2} = 1,8 \times 10^{-2} \text{ N}$

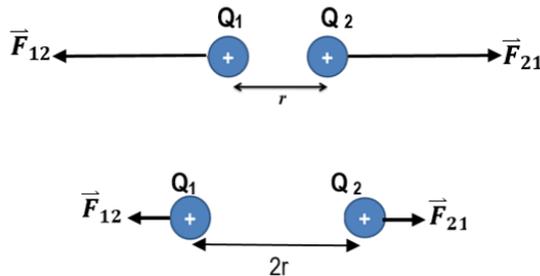
Gaya yang dialami oleh q_2 akibat q_1 adalah F_{21} yang besarnya sama dengan F_{12}

Meskipun muatan $+q_1$ lebih besar dari muatan $+q_2$, tapi besarnya gaya yang dialami oleh kedua muatan sama besar. Gaya yang dialami q_2 akibat q_1 adalah F_{21} dan gaya yang dialami oleh q_1 akibat q_2 adalah F_{12} . Oleh karena itu vektor gaya untuk kedua muatan digambar sama besar seperti gambar di bawah ini



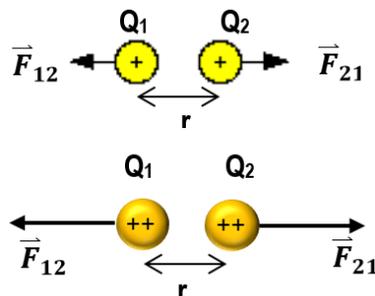
Jika kita ingin mengetahui gaya secara lengkap, yaitu besar maupun arahnya maka gaya harus dinyatakan dalam notasi vektor yang dinyatakan dalam bentuk persamaan: $\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$. Besarnya gaya Coulomb akan berubah jika jarak antara kedua muatan berubah. Gaya akan bertambah jika kedua muatan didekatkan. Namun sebaliknya gaya Coulomb akan berkurang jika kedua muatan dijauhkan. Perubahan gaya coulomb sebanding dengan kuadrat jarak antar kedua muatan. Gaya berkurang menjadi 1/4 kali gaya semula jika jarak kedua muatan dua kali jarak semula. Gambar 1.17 memperlihatkan perubahan yang terjadi. Perhatikanlah panjang vektor

yang menyatakan besarnya gaya Coulomb. Tanda vektor yang panjang menyatakan gaya yang besar sedangkan tanda vektor pendek menyatakan gaya yang kecil.



Gambar 1.17. Gaya berkurang menjadi 1/4 kali gaya semula jika jarak kedua muatan dua kali jarak semula

Besarnya gaya Coulomb akan berubah pula jika jumlah muatan berubah. Gaya bertambah menjadi 4 kali gaya semula jika banyaknya kedua muatan dua kali semula. Gambar 1.18 memperlihatkan perubahan yang terjadi.

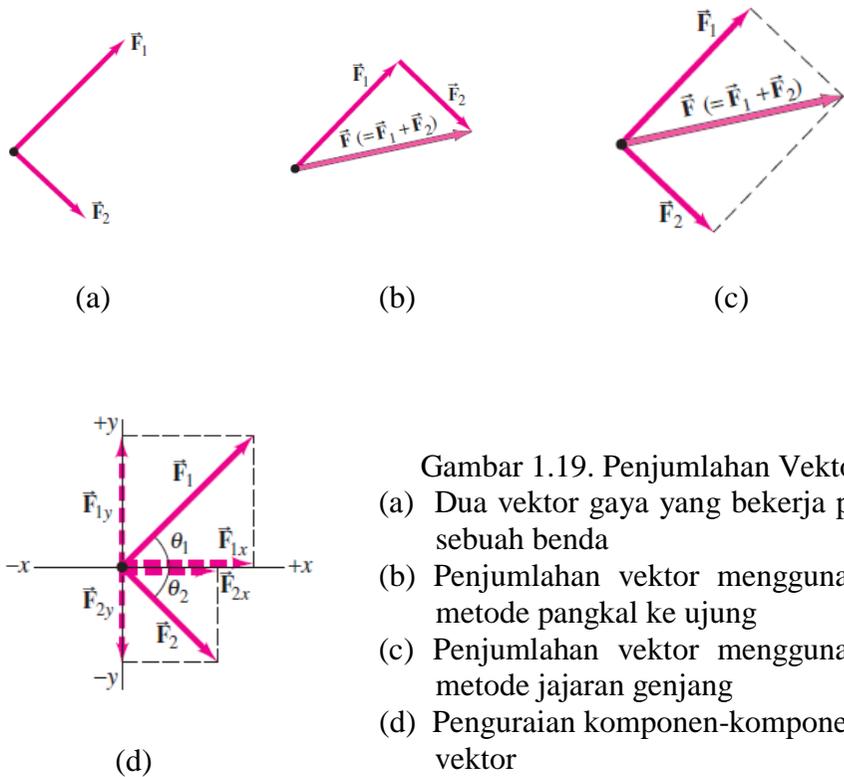


Gambar 1.18. Gaya bertambah menjadi 4 kali gaya semula jika jumlah muatan dua kali semula

Bagaimana gaya Coulomb yang terjadi jika terdapat lebih dari 2 muatan ? Untuk mengetahui besarnya gaya pada sebuah muatan akibat adanya muatan lain kita harus menggunakan pengetahuan kita tentang vektor. Masih ingatkah kalian tentang penjumlahan vektor?

Sebelum kita membahas penyelesaian masalah gaya antar partikel bermuatan menggunakan kaidah vektor, marilah kita mengingat kembali penjumlahan vektor.

Perhatikan dua vektor gaya \vec{F}_1 dan \vec{F}_2 bekerja pada suatu benda (Gambar 1.19a). Kedua gaya dapat ditambahkan menggunakan metode pangkal ke ujung (Gambar 1.19b) atau dengan metode jajaran genjang (Gambar 1.19c). Tetapi untuk menghitung arah dan besarnya jumlah gaya yang dihasilkan, lebih tepat jika kita gunakan metode analisis vektor atau metode penguraian vektor. Gambar 1.19d menunjukkan gaya \vec{F}_1 dan \vec{F}_2 yang diuraikan menjadi komponen di sepanjang sumbu x dan y.



Gambar 1.19. Penjumlahan Vektor
 (a) Dua vektor gaya yang bekerja pada sebuah benda
 (b) Penjumlahan vektor menggunakan metode pangkal ke ujung
 (c) Penjumlahan vektor menggunakan metode jajaran genjang
 (d) Penguraian komponen-komponen vektor

Dari definisi fungsi trigonometri kita peroleh:

$$F_{1x} = F_1 \cos \theta_1$$

$$F_{2x} = F_2 \cos \theta_2$$

$$F_{1y} = F_1 \sin \theta_1$$

$$F_{2y} = -F_2 \sin \theta_2$$

Maka vektor gaya yang bekerja sepanjang sumbu x dan sumbu y, masing-masing dinyatakan sebagai berikut:

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 \sin \theta_1 - F_2 \sin \theta_2$$

Sehingga besarnya gaya resultan adalah:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

sedangkan arah gaya resultan ditentukan oleh besarnya sudut yang dibentuk oleh sumbu x dengan gaya resultan yang diperoleh menggunakan persamaan

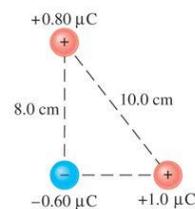
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{F_y}{F_x}$$

Mari kita perhatikan contoh 2 berikut ini agar kalian lebih memahami bagaimana gaya Coulomb yang terjadi jika terdapat lebih dari 2 muatan.

Contoh 1.2:

Soal:

Berapakah gaya Coulomb yang dirasakan oleh muatan $q_1 = -0,60 \mu\text{C}$ akibat muatan lainnya seperti yang tampak pada Gambar 19 ?



Gambar 1.19. Contoh 2

Jawab:

Gaya pada muatan $q_1 = -0,60 \mu\text{C}$ diakibatkan oleh muatan $q_2 = +0,8 \mu\text{C}$ dan $q_3 = +1,0 \mu\text{C}$. Besarnya adalah:

$$F_{12} = 9 \cdot 10^9 \frac{(0,6 \cdot 10^{-6}) \cdot (0,8 \cdot 10^{-6})}{(8 \cdot 10^{-3})^2} = 67,5 \text{ N}$$

Sebelum menentukan F_{13} , harus kita hitung dulu r_{13}

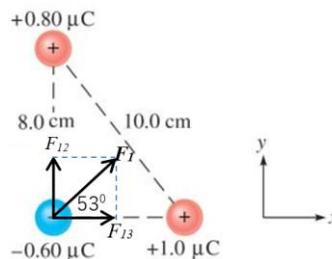
$$r_{13} = \sqrt{r_{23}^2 - r_{12}^2} = \sqrt{100 - 64} = 6 \text{ cm}$$

$$F_{13} = 9 \cdot 10^9 \frac{(0,6 \cdot 10^{-6}) \cdot (1,0 \cdot 10^{-6})}{(6 \cdot 10^{-3})^2} = 1500 \text{ N}$$

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} = 1.567,5 \text{ N}$$

Sudut yang dibentuk oleh F_1 dengan sumbu x, sebesar:

$$\text{tg}^{-1} \theta = \frac{8}{6} \rightarrow \theta = 53^\circ$$

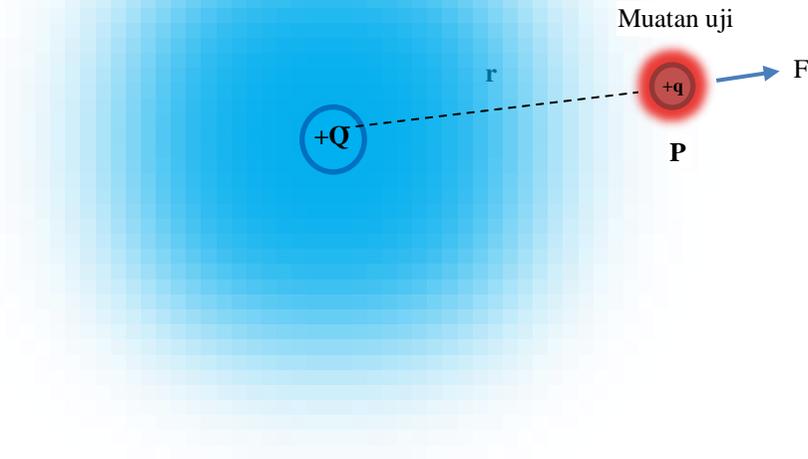


II. MEDAN LISTRIK

Pada materi listrik statis, kalian telah mengenal medan gaya listrik. Masih ingatkah kalian bahwa benda bermuatan listrik menghasilkan medan gaya listrik? Medan listriklah yang mengerjakan gaya (menarik atau menolak) pada muatan lain yang ada di sekitarnya. Jika pada bab sebelumnya kita membahas kekuatan gaya tarik atau gaya tolak antar dua benda bermuatan, pada bab ini kita akan mempelajari besarnya kekuatan medan listrik yang dihasilkan benda bermuatan. Kekuatan medan ini biasanya kita sebut dengan istilah kuat medan listrik atau medan listrik.

A. Medan Listrik

Medan didefinisikan sebagai besaran yang mempunyai nilai tertentu di setiap titik di dalam ruang. Selain medan listrik, contoh medan antara lain medan magnet, medan temperatur dan medan gravitasi. Medan listrik timbul karena adanya muatan-muatan listrik. Bagaimana kita dapat mengetahui kuat medan listrik yang dimiliki oleh benda bermuatan? Perhatikanlah Gambar 2.1. Untuk mengetahui kuat medan listrik di sekitar muatan $+Q$ (muatan sumber), kita harus meletakkan muatan lain di suatu titik tertentu misalnya titik P yang jaraknya r . Muatan lain ini disebut muatan uji ($+q_0$). Muatan dan massa $+q_0$ harus jauh lebih kecil dibandingkan $+Q$, agar efek medan listrik $+q_0$ tidak mempengaruhi medan listrik $+Q$.



Gambar 2.1. Medan Listrik pada Jarak r

Sekarang kita dapat menentukan kuat medan $+Q$ (muatan sumber). Kuat medan listrik yang dirasakan oleh q_0 (muatan uji) dapat kita peroleh dengan menentukan gaya interaksi antara kedua muatan (yaitu $+Q$ dan $+q_0$). Bagaimana caranya? Ya, dengan menerapkan hukum Coulomb. Tetapi karena kita akan menentukan kuat medan listrik, bukan menentukan gaya Coulomb, maka harus ada cara lain untuk menentukan kuat medan. Para ahli membuat definisi bahwa kuat medan listrik adalah gaya yang dirasakan oleh muatan uji positif dan dinyatakan dalam persamaan:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (2.1)$$

E : Kuat medan dari muatan sumber (N/C)

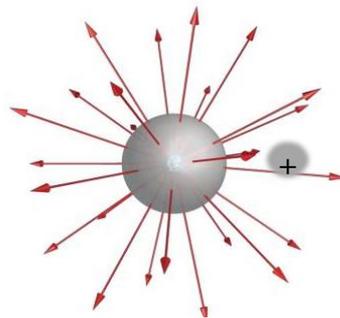
F : Gaya Colomb (N)

q_0 : muatan uji (C)

Persamaan (2.1) akan kita pelajari lebih dalam pada sub-bab berikutnya setelah kita membahas garis-garis gaya.

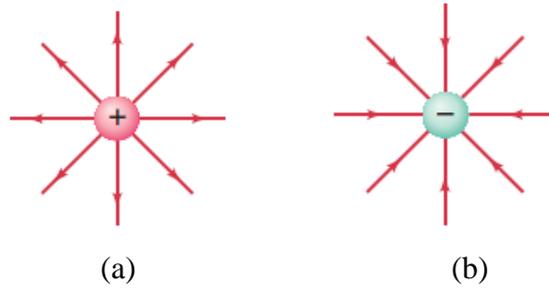
B. Garis-garis Gaya

Agar dapat memahami kuat medan listrik, akan lebih baik jika kita mengingat kembali definisi medan. Masih ingatkah kalian definisi medan? Medan adalah, “Besaran fisika vektor yang memiliki nilai tertentu di setiap titik di dalam ruang”. Dari definisi medan, maka kita dapat menyatakan bahwa, “medan listrik di dalam suatu ruang, memiliki kekuatan yang berbeda-beda bergantung pada jaraknya dari sumber muatan”. Medan listrik arahnya radial. Ini artinya setiap titik di dalam ruang merasakan adanya medan listrik. Medan listrik dari sebuah muatan $+Q$ sesungguhnya adalah tiga dimensi seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Medan Listrik dari Muatan $+Q$

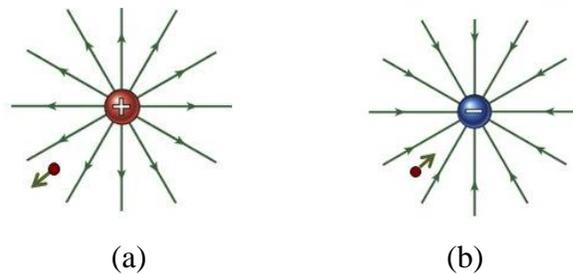
Agar mudah mempelajarinya medan listrik dinyatakan dalam dua dimensi. Medan listrik dari sebuah benda bermuatan, dinyatakan dengan cara menggambarkan garis-garis yang menunjukkan arah medan.



Gambar 2.3. Garis-garis Gaya
(a) Garis Gaya Muatan Positif
(b) Garis Gaya Muatan Negatif

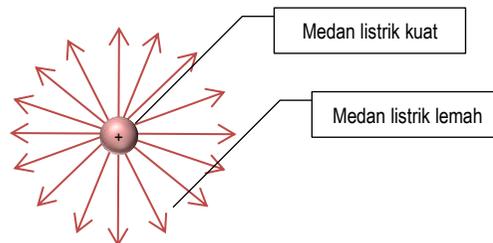
Garis-garis medan disebut garis-garis gaya. Garis-garis gaya sangat membantu dalam menggambarkan medan listrik. Garis gaya adalah garis khayal, bukan garis yang dapat kita lihat di sekitar benda bermuatan. Garis-garis gaya diperlihatkan pada Gambar 2.3. Perhatikanlah dengan seksama Gambar 2.3. Garis-garis gaya digambar simetris “keluar” atau “menjauh” dari muatan positif dan garis-garis gaya muatan negatif “masuk” atau “menuju” ke muatan negatif. Visualisasi garis gaya yaitu “keluar” atau “menjauh” dari muatan positif dan “masuk” atau “menuju” ke muatan negatif dapat dijelaskan dengan konsep gaya interaksi muatan sumber dengan muatan uji yaitu konsep gaya Coulomb.

Mari kita perhatikan Gambar 2.4. Kalian tentu masih ingat gaya interaksi antara muatan sejenis dan berlainan jenis. Jika jenis muatan sumber positif dan muatan uji juga positif, maka gaya Coulomb bersifat tolak-menolak seperti tampak pada Gambar 2.4a. Dengan demikian arah garis gaya dari muatan sumber “keluar” atau “menjauh” dari muatan sumber. Namun jika jenis muatan sumber negatif dan muatan uji positif, maka gaya Coulomb bersifat tarik-menarik seperti tampak pada Gambar 2.4b. Sehingga arah garis gaya dari muatan sumber “masuk” atau “menuju” ke muatan sumber.



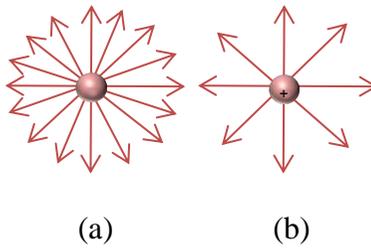
Gambar 2.4. Interaksi Muatan Sumber dengan Muatan Uji
 (a) Arah garis gaya “keluar” atau “menjauh” dari muatan sumber
 (b) Arah garis gaya “masuk” atau “menuju” ke muatan sumber

Kerapatan garis-garis gaya menunjukkan kekuatan medannya, artinya semakin jauh dari muatan, semakin lemah pula kuat medan. Oleh karena itu garis-garis gaya digambar semakin rengang. Keadaan tersebut diperlihatkan lebih jelas pada Gambar 2.5.



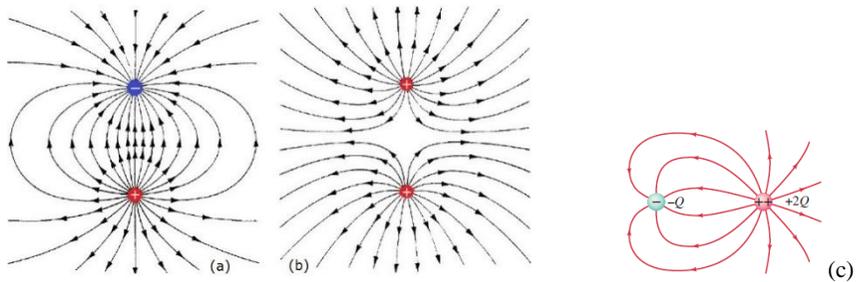
Gambar 2.5. Kerapatan Garis Gaya

Kerapatan garis-garis gaya selain menunjukkan kekuatan medannya, menunjukkan pula besar kecilnya muatan. Gambar 2.6 memperlihatkan perbandingan garis-garis gaya dari dua benda bermuatan. Garis-garis gaya pada benda bermuatan $+2Q$ digambarkan lebih rapat daripada benda bermuatan $+Q$.



Gambar 2.6. Kerapatan Garis Gaya Sebanding dengan Besar Muatan
 (a) Garis Gaya Rapat (b) Garis Gaya Kurang Rapat

Marilah kita lanjutkan pembahasan tentang garis-garis gaya. Ingat, bahwa dua muatan sejenis tolak-menolak dan muatan tak sejenis tarik menarik. Gambaran garis-garis gaya dari dua muatan sejenis yang berada dalam pengaruh medan masing-masing dinyatakan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Garis-garis gaya dari dua muatan
 (a) Dua muatan tak sejenis
 (b) Dua muatan sejenis
 (c) Dua muatan yang berbeda jenis dan besarnya

Sampai di sini kalian telah mengetahui aturan-aturan yang berlaku dalam menggambar garis-garis gaya. Berikut adalah rangkuman dari aturan yang digunakan dalam menggambar garis-garis gaya:

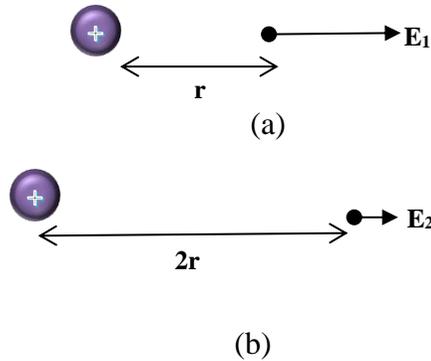
1. Garis-garis digambar simetris keluar atau menjauh dari muatan positif dan masuk atau menuju ke muatan negatif
2. Bermula dari muatan positif dan berakhir pada muatan negatif

3. Jumlah garis yang meninggalkan atau memasuki muatan sebanding dengan besarnya muatan
4. Kerapatan garis-garis gaya sebanding dengan kuat medan di titik tersebut
5. Tidak ada garis-garis gaya yang berpotongan

C. Kuat Medan Listrik

Pada sub-bab A kalian telah mengenal bahwa kuat medan listrik yang dirasakan oleh muatan uji didefinisikan sebagai gaya per satuan muatan dan dinyatakan dalam persamaan: $E = \frac{F}{q_0}$. Pada sub-bab ini kita akan mempelajari lebih lanjut kuat medan listrik tersebut. Mari kita perhatikan persamaan (2.1). Lebih tepatnya, E didefinisikan sebagai limit dari F / q_0 karena q_0 sangat kecil bahkan mendekati nol ($q_0 \rightarrow 0$). Dari persamaan tersebut kita dapat melihat bahwa kuat medan listrik diperoleh dari persamaan gaya Coulomb. Masih ingatkah kalian gaya Coulomb? Definisi Gaya Coulomb adalah, “Gaya interaksi antara dua benda bermuatan listrik, berbanding lurus dengan perkalian antara kedua muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda bermuatan tersebut”. Jika kita kaitkan gaya Coulomb dengan kuat medan listrik, maka kita dapatkan bahwa, jika jarak menjadi dua kali semula maka kuat medan listrik menjadi seperempat kali semula. Kuat medan listrik pada suatu titik, diperlihatkan pada Gambar 2.8. Seperti halnya gaya Coulomb, kuat medan listrik adalah besaran vektor sehingga digambarkan dengan tanda panah. Arah panah menyatakan arah medan listriknya dan panjang panah menyatakan nilai atau besarnya medan listrik.

Karena kuat medan listrik adalah besaran vektor, maka persamaan (1) dinyatakan dalam bentuk vektor, menjadi $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$



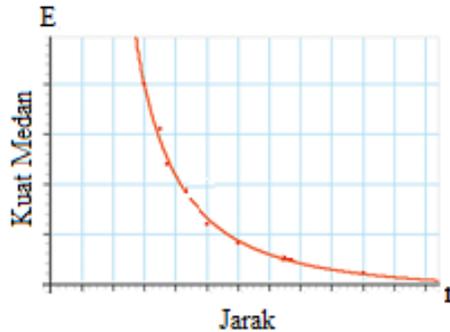
Gambar 2.8. Kuat Medan Listrik pada Suatu Titik
(a) Pada jarak r dan (b) Pada jarak $2r$

Jika letak titik yang akan kita tentukan kuat medannya diubah-ubah, maka kita akan peroleh kuat medan yang berubah-ubah pula. Hal ini diperlihatkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perubahan Kuat Medan Listrik (E) terhadap Jarak (r)

Jarak (r)	Kuat Medan Listrik (E)
R	E
$2r$	$\frac{E}{4}$
$3r$	$\frac{E}{9}$
$4r$	$\frac{E}{16}$

Tabel 2.1 dapat kita nyatakan dalam bentuk grafik seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.9 pada halaman selanjutnya.



Gambar 2.9. Grafik Kuat Medan (E) terhadap Jarak (r)

Selanjutnya kita akan membahas persamaan matematika dari kuat medan listrik E . Kuat medan listrik E diturunkan dari gaya Coulomb. Dengan membagi gaya Coulomb oleh muatan uji, maka kita peroleh persamaan kuat medan listrik, yaitu:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = k \frac{Qq_0}{\vec{r}^2} \frac{1}{q_0}$$

Dari sini kita peroleh persamaan matematika untuk kuat medan listrik,

$$\vec{E} = k \frac{Q}{\vec{r}^2} \quad (2.2)$$

Contoh 2.1:

Soal

Hitunglah **besar dan arah kuat medan listrik** pada sebuah titik berjarak 30 cm di sebelah kanan muatan Q sebesar $-3\mu\text{C}$.



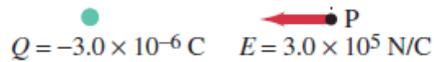
Ingatlah, tidak ada muatan listrik pada titik P. Tetapi ada medan listrik di sana. Satu-satunya muatan adalah Q .

Jawaban

Besarnya kuat medan listrik kita hitung menggunakan persamaan (2.2), yaitu

$$E = k \frac{Q}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{3 \times 10^{-6}}{(30 \times 10^{-2})^2}$$
$$E = 3 \times 10^5 \text{ N/C.}$$

Karena E adalah besaran vektor maka selain nilainya harus kita tentukan pula arahnya. Arah E di titik P menuju ke muatan $-Q$:



$Q = -3.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ $E = 3.0 \times 10^5 \text{ N/C}$

Jika muatan $Q = +3 \mu\text{C}$, maka arah E di titik P menjauh dari muatan $+Q$:



$Q = +3.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ $E = 3.0 \times 10^5 \text{ N/C}$

Arah kuat medan listrik sesuai dengan arah garis-garis gaya. Arah garis-garis gaya dari muatan positif ($+Q$) menjauh dari muatan dan sebaliknya arah garis-garis gaya dari muatan negatif ($-Q$) menuju ke muatan.

Jika di suatu tempat terdapat lebih dari satu muatan sumber dan kita ingin menentukan kuat medan yang dihasilkannya pada suatu titik tertentu (titik P), bagaimanakah caranya? Mari kita perhatikan contoh berikut ini yang disajikan pada halaman selanjutnya.

Contoh 2.2:

Soal

Dua muatan berjarak 10 cm. Muatan pertama sebesar $-25\mu\text{C}$ dan yang lainnya $+50\mu\text{C}$. Tentukan arah dan besarnya medan listrik pada titik P yang letaknya diantara kedua muatan yang berjarak 2 cm dari muatan negatif.

Jawaban

Untuk menjawab soal ini, kita buat gambarnya seperti tampak pada gambar:



Setiap muatan yaitu $Q_1 = -25\mu\text{C}$ dan $Q_2 = +50\mu\text{C}$, di titik P masing-masing menyumbang kuat medan. Maka kuat medan listrik total adalah:

$$\begin{aligned} E &= k \frac{Q_1}{r_1^2} + k \frac{Q_2}{r_2^2} = k \left(\frac{Q_1}{r_1^2} + \frac{Q_2}{r_2^2} \right) \\ &= (9 \times 10^9) \left(\frac{25 \times 10^{-6}}{(2,0 \times 10^{-2})^2} + \frac{50 \times 10^{-6}}{(8,0 \times 10^{-2})^2} \right) \\ &= 6,3 \times 10^8 \text{ N/C} \end{aligned}$$

Arah medan listrik di titik P seperti tampak pada gambar di bawah ini. Arah E_1 di titik P menuju ke muatan Q_1 (negatif) dan arah E_2 di titik P menjauh dari muatan Q_2 (positif).



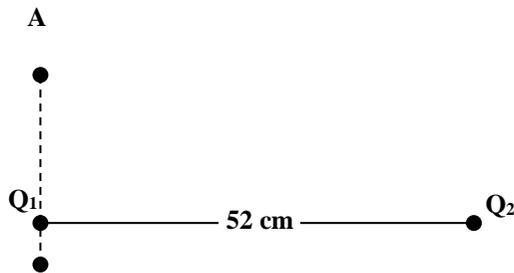
Perhatikanlah panjang vektor E_1 dan E_2 pada gambar (b). Panjang masing-masing vektor berkaitan dengan besarnya medan. Dari hitungan yang telah kita lakukan, kita dapatkan bahwa E_1 lebih besar dari E_2 . Maka vektor E_1 lebih panjang dibanding vektor E_2

Kuat Medan Listrik yang disebabkan oleh beberapa muatan titik pada suatu titik (titik P) dapat diperoleh dengan menerapkan prinsip superposisi. Mari kita perhatikan contoh berikut ini.

Contoh 2.3

Soal:

Dua muatan berjarak 52 cm. Muatan pertama sebesar $-50\mu\text{C}$ dan yang lainnya $+50\mu\text{C}$. Tentukan arah dan besarnya medan listrik pada titik A.



Jawaban:

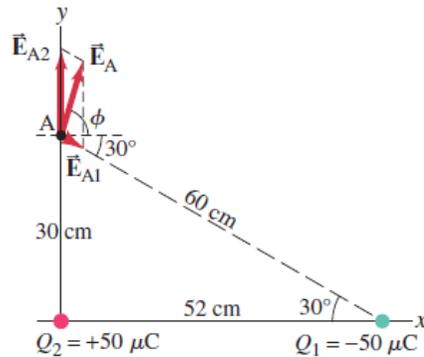
Kuat medan listrik di titik A oleh masing-masing muatan Q_1 dan Q_2 , diperoleh menggunakan persamaan:

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

$$E_{A1} = \frac{(9,0 \times 10^9)(50 \times 10^{-6})}{(0,6)^2} = \frac{1,25 \times 10^6 \text{ N}}{\text{C}}$$

$$E_{A2} = \frac{(9,0 \times 10^9)(50 \times 10^{-6})}{(0,3)^2} = \frac{50 \times 10^6 \text{ N}}{\text{C}}$$

Arah E_{A1} dan E_{A2} diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Pada titik A, E_{A1} menuju ke arah Q_1 (muatan negatif), sedangkan E_{A2} menjauh dari Q_2 (muatan positif) jadi total medan listrik di A, memiliki komponen

$$E_{Ax} = E_{A1} \cos 30^\circ = 1,1 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_{Ay} = E_{A2} - E_{A1} \sin 30^\circ = 4,4 \times 10^6 \text{ N/C}$$

Besarnya E_A dinyatakan sebagai berikut:

$$E_A = \sqrt{(1,1)^2 + (4,4)^2} \times 10^6 = 4,5 \times 10^6 \text{ N/C}$$

Arahnya:

$$\text{tg } \varphi = \frac{E_{Ay}}{E_{Ax}} = \frac{4,4}{1,1}$$

Sehingga $\varphi = 76^\circ$

III. POTENSIAL LISTRIK

Jika kita menempatkan sebuah muatan dalam ruang yang mengandung medan listrik maka partikel yang mula-mula diam akan bergerak. Ini berarti partikel mengalami peningkatan energi kinetik yang semula nol menjadi tidak nol. Peningkatan energi kinetik ini hanya mungkin disebabkan oleh dua faktor, yaitu ada kerja luar yang bekerja pada muatan, atau ada energi lain yang mengalami pengurangan. Jika tidak ada gaya luar yang kita berikan pada muatan, maka pastilah peningkatan energi kinetik disertai oleh pengurangan energi bentuk lain sehingga energi total konstan (ingat tentang hukum kekekalan energi). Energi bentuk lain yang paling mungkin dimiliki partikel tersebut adalah energi potensial. Dengan demikian, partikel bermuatan listrik yang berada dalam ruang yang mengandung medan listrik memiliki energi potensial listrik.

A. Usaha pada Muatan Listrik

Sebuah muatan mula-mula berada di titik a dekat muatan sumber berjarak r_2 seperti ditunjukkan oleh gambar 3.1(a). Jika muatan pindah ke titik b seperti pada Gambar 3.1(b) , maka muatan harus mampu melawan medan listrik yang dihasilkan oleh muatan sumber. Jadi untuk pindah dari a ke b muatan $+q$ harus melakukan usaha untuk melawan gaya elektrostatik. Masih ingatkah kalian bagaimana hubungan antara usaha dan gaya? Besarnya usaha sebanding dengan gaya dan perpindahan yang dinyatakan dalam persamaan $W = F S$. Pada muatan $+q$ besarnya usaha yang harus dilakukan untuk pindah dari a ke b sebanding dengan besarnya gaya Coulomb dan jarak perpindahannya yaitu $r = r_2 - r_1$. Secara matematis dinyatakan dalam persamaan: $W = -F r$. Tanda *negatif* menunjukkan usaha dari $+q$ untuk *melawan gaya Coulomb*. Karena

hubungan antara gaya Coloumb dengan medan listrik adalah $F = qE$, maka:

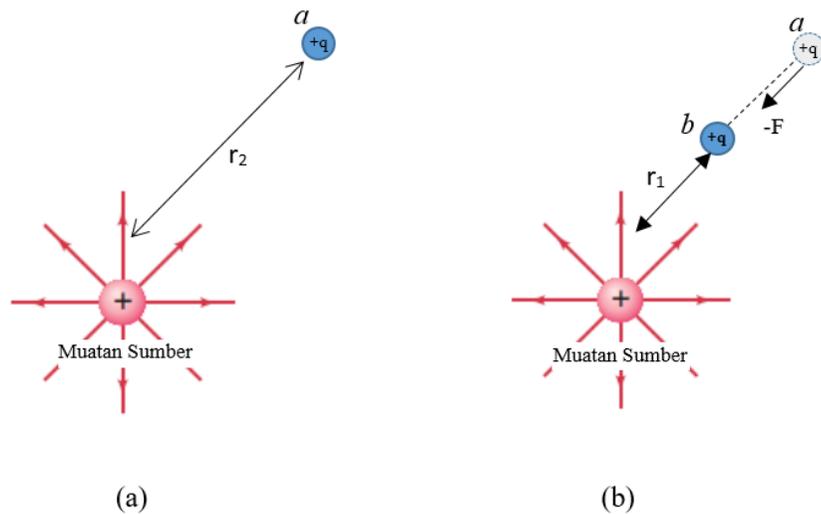
$$W = -qEr \quad (3.1)$$

Keterangan:

W : Usaha untuk memindahkan muatan $+q$ dari a ke b (J)

E : Medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan sumber (N/C)

r : perpindahan muatan $+q$ dari a ke b (m)



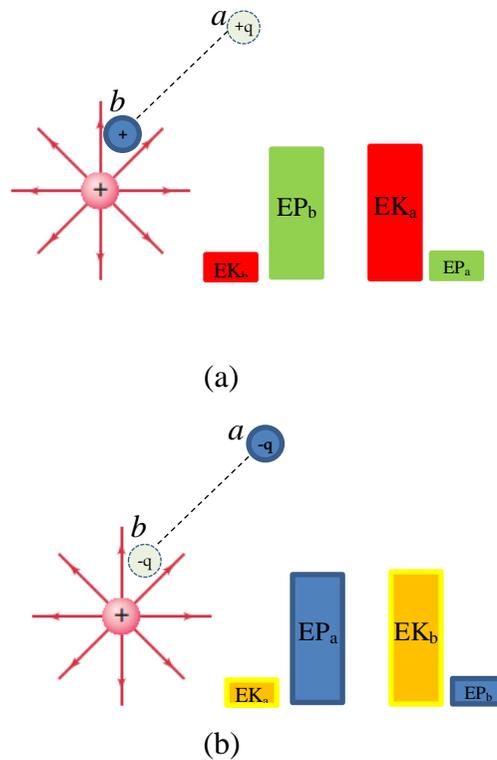
Gambar 3.1. Memindahkan Muatan Listrik

- (a) Mula-mula muatan di titik a, bejarak r_2 dari muatan sumber
- (b) Muatan dipindahkan ke titik b, bejarak r_1 dari muatan sumber

Perhatikanlah kembali Gambar 3.1, jika muatan $+q$ yang mula-mula berada di titik b yang berjarak r_1 dari muatan sumber, seperti tampak pada Gambar 1 (b), lalu dilepaskan, maka muatan $+q$ akan bergerak menjauhi muatan sumber dengan *percepatan konstan*. Hal ini terjadi karena *gaya elektrostatik melakukan usaha pada $+q$* . Muatan $+q$ bergerak dengan mengalami peningkatan energi kinetik. Mengingat energi bersifat kekal, maka peningkatan energi kinetik disertai oleh penurunan energi potensial. Setelah energi potensial

diubah seluruhnya menjadi energi kinetik, akhirnya partikel berhenti bergerak.

Peningkatan energi kinetik dan penurunan energi potensial yang dipaparkan tersebut hanya berlaku untuk muatan $+q$. Untuk muatan $-q$ berlaku sebaliknya. Peningkatan energi kinetik (sehingga mengakibatkan penurunan energi potensial) terjadi jika muatan $-q$ bergerak mendekati muatan sumber. Perubahan energi potensial dan energi kinetik pada muatan $+q$ dan muatan $-q$ ditampilkan pada Gambar 3.2.

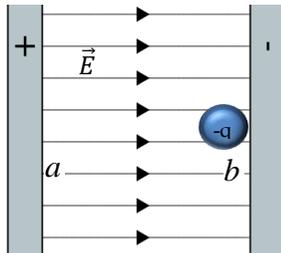


Gambar 3.2. Perubahan Energi Kinetik dan Energi Potensial
(a) pada muatan $+q$
(b) Pada Muatan $-q$

Contoh 3.1:

Soal:

Misalkan sebuah muatan negatif yaitu elektron diletakkan di titik b dekat pelat bermuatan negatif seperti tampak pada gambar berikut:



Jika elektron dilepaskan sehingga bebas bergerak, bagaimana energi potensialnya? Bertambah atau berkurang?

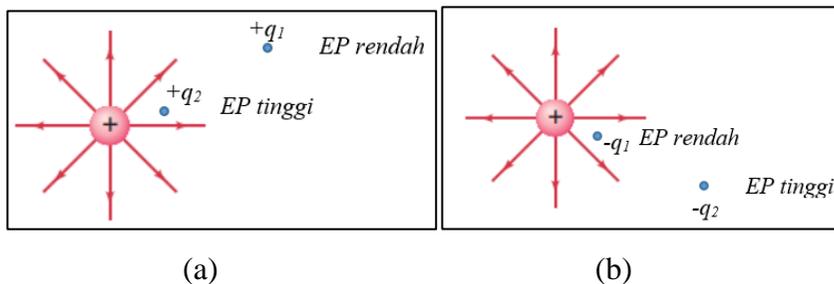
Jawaban:

Elektron akan bergerak meninggalkan pelat negatif menuju pelat bermuatan positif. Mengapa? Karena muatan sejenis akan selalu tolak menolak. Elektron bergerak menuju pelat positif dengan percepatan tetap, maka energi kinetik elektron bertambah. Mengingat bahwa energi kekal, maka peningkatan energi kinetik mengakibatkan penurunan energi potensial.

B. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik

Energi potensial listrik, adalah sebutan untuk energi potensial yang dihasilkan gaya Coulomb dan dikaitkan dengan muatan titik tertentu dalam sebuah sistem. Sebuah muatan dapat memiliki energi potensial listrik berdasarkan pada dua elemen utama yaitu muatan listrik itu sendiri dan posisi relatifnya terhadap muatan listrik lainnya (yaitu muatan sumber). Agar kalian dapat memahami dengan lebih baik perhatikanlah Gambar 3.3. Gambar 3.3(a) memperlihatkan posisi relatif muatan $+q_1$ dan $+q_2$ terhadap muatan sumber. Energi

potensial $+q_1$ lebih besar dibanding energi potensial $+q_2$. Namun apabila muatan adalah negatif ($-q_1$ dan $-q_2$), maka energi potensial $-q_1$ lebih kecil dibanding energi potensial $-q_2$. Hal ini dapat dijelaskan menggunakan konsep gaya Coulomb. Semakin jauh dari muatan sumber, maka gaya interaksi (tolak-menolak maupun tarik menarik) semakin lemah.



Gambar 3.3. Posisi Relatif Muatan Listrik dan Energi Potensialnya
 (a) Muatan $+q$
 (b) Muatan $-q$

Perhatikanlah kembali Gambar 3.3 dan perhatikan hal-hal penting berikut ini:

- ✓ Muatan sumber adalah sebuah muatan positif, maka energi potensial $+q_1$ lebih besar dibanding energi potensial $+q_2$ (Gambar 3.3.a)
- ✓ Namun apabila muatan adalah negatif ($-q_1$ dan $-q_2$), dan muatan sumber adalah sebuah muatan positif maka energi potensial $-q_1$ lebih kecil dibanding energi potensial $-q_2$ (Gambar 3.3.b)

Telah kalian pelajari di kelas X, ketika sebuah objek pindah dari titik a ke titik b maka usaha yang dilakukan oleh gaya konservatif sama dengan perubahan energi potensialnya. Hal tersebut dinyatakan dalam persamaan: $\Delta EP = -W$. Gaya listrik atau gaya Coulomb termasuk gaya konservatif sehingga kita dapat menerapkan persamaan $\Delta EP = -W$ pada sebuah muatan q yang pindah dari satu titik ke titik lainnya. Perubahan energi potensial listrik sebanding dengan usaha yang dilakukan untuk melawan gaya elektrostatik, yang dinyatakan dalam persamaan $EP_b - EP_a = -Fr$. Karena $Fr = qEr$, (ingat: $F = qE$) maka:

$$EP_b - EP_a = -qEr \quad (3.2)$$

Jika persamaan (3.2) kita kalikan dengan $1/q$, maka kita peroleh

$$\frac{1}{q}(EP_b - EP_a) = -Er$$

Definisi kuat medan listrik, yaitu gaya per satuan muatan dan dinyatakan dalam persamaan: $E = F/q$. Dengan cara yang sama dapat kita nyatakan bahwa $\Delta EP/q$ yaitu energi potensial per satuan muatan sebagai potensial listrik. Potensial listrik didefinisikan sebagai energi potensial listrik per satuan muatan, yang dinyatakan dalam persamaan matematika:

$$V = \frac{EP}{q} \quad (3.3)$$

Keterangan:

V : Potensial Listrik (J/C atau Volt)

EP : Energi Potensial Listrik (J atau eV)

Potensial tidak memiliki arti fisis karena besaran tersebut tidak dapat diukur secara langsung. Oleh karena itu digunakan konsep beda potensial, dan dinyatakan dalam persamaan:

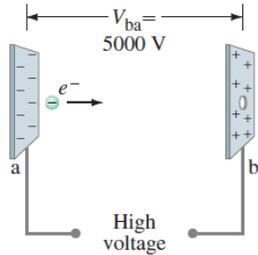
$$\frac{EP_b - EP_a}{q} = V_b - V_a \quad (3.4)$$

Satuan dari potensial listrik adalah *Joule/Coulomb* dan diberikan nama khusus yaitu *Volt*. Potensial listrik lebih sering disebut potensial dan beda potensial karena dinyatakan dalam satuan Volt, maka disebut *Voltage* atau dalam bahasa Indonesia dikenal dengan sebutan tegangan. Satuan energi potensial adalah *Joule*. Namun untuk menyatakan energi yang terkait dengan elektron, atom atau molekul satuan tersebut terlalu besar. Oleh karena itu digunakan satuan *elektron volt (eV)*. Muatan sebuah elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ C maka $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Jika kita membahas tentang potensial V_a di sembarang titik, kita harus memperhatikan tempat dimana potensial suatu titik bernilai nol. Tempat dimana potensial bernilai nol dapat kita tetapkan sembarang. Mengapa demikian? Karena yang kita ukur adalah selisih atau beda potensialnya. Umumnya penetapan potensial nol adalah bumi, namun dalam beberapa kasus kita dapat menetapkan potensial nol adalah pada suatu titik di tempat yang jauh tak hingga yaitu titik di luar pengaruh muatan medan listrik.

Contoh 3.2:

Soal:



Misalkan elektron pada tabung layar TV bergerak dipercepat karena adanya beda potensial sebesar $V_{ba} = +5.000$ Volt

- Berapakah perubahan energi potensial elektron?
- Berapakah energi kinetik elektron?
- Berapakah laju elektron?

Jawaban:

Perubahan energi potensial elektron diperoleh melalui persamaan (4) :

$V = \frac{EP}{q}$, maka $EP = 5.000 \times -1,6 \times 10^{-19} = -8 \times 10^{-18}$ J (tanda minus mengandung arti bahwa EP berkurang)

- a. Mengingat bahwa energi kekal, maka penurunan energi potensial mengakibatkan peningkatan energi kinetik

$$\Delta EK + \Delta EP = 0$$

$$\Delta EK = -\Delta EP$$

$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = -q(V_b - V_a) = -qV_{ba}$ dari persamaan ini kita peroleh

$$EK = -qV_{ba} = 8 \times 10^{-18} \text{ J}$$

- b. $EK = 8 \times 10^{-18} \text{ J} = \frac{1}{2}mv^2$, maka $v = \sqrt{\frac{2EK}{m}} =$

$$\sqrt{\frac{2 \times 8 \times 10^{-18}}{9 \times 10^{-31}}} = 4,2 \times 10^7 \text{ m/s}$$

C. Hubungan Medan Listrik dan Potensial Listrik

Efek dari adanya muatan listrik di suatu tempat dapat kita kaji dari sudut pandang medan listrik maupun dari sudut pandang potensial listrik. Selain itu terdapat hubungan antara medan listrik dengan potensial listrik seperti dinyatakan oleh persamaan (3.3). Dari persamaan (3.3) yaitu: $EP_b - EP_a = -qEr$ dan persamaan (3.4) yaitu:

$$\frac{EP_b - EP_a}{q} = V_b - V_a \text{ kita dapatkan persamaan:}$$

$$Er = -(V_b - V_a)$$

Jika $V_b - V_a$ kita nyatakan sebagai V_{ba} , maka

$$E = -\frac{V_{ba}}{r} \quad (3.5)$$

Contoh 3.3:

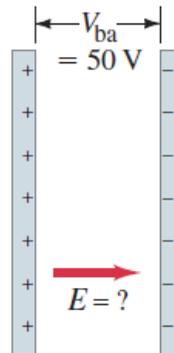
Soal:

Dua pelat sejajar dimuati hingga tegangannya mencapai 50V. Jika jarak antara kedua pelat adalah 0,05m, hitunglah medan listrik diantara kedua pelat.

Jawaban:

Dari persamaan (3.5), kita peroleh

$$E = \frac{V}{r} = \frac{50}{0,05} = 100 \text{ V/m}$$



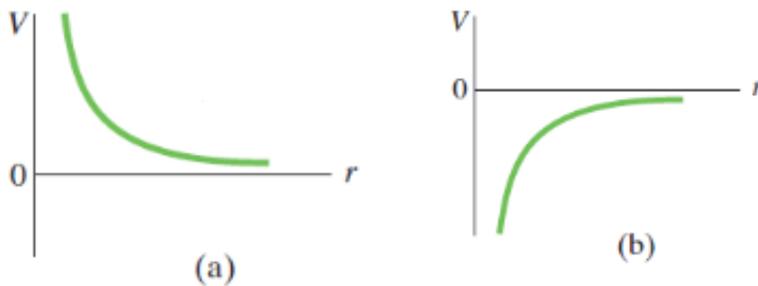
D. Potensial Listrik yang Disebabkan oleh Muatan Titik

Potensial listrik pada jarak r dari suatu benda bermuatan $+Q$ dapat diperoleh dari medan listrik yang ditimbulkannya. Masih ingatkah kalian persamaan medan listrik? Persamaan medan listrik

adalah $\vec{E} = k \frac{Q}{r^2}$. Dengan menggunakan hitung kalkulus, kita dapatkan persamaan untuk potensial listrik, yaitu:

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

Potensial listrik diasumsikan bernilai nol di suatu titik yang berjarak tak hingga dari muatan sumber. Sama seperti asumsi pada medan listrik. Potensial berkurang terhadap jarak sedangkan medan listrik berkurang terhadap kuadrat jarak. Potensial dekat muatan positif (+Q) besar dan menurun menuju nol pada jarak yang sangat jauh. Untuk muatan negatif (-Q) potensialnya negatif dan naik menuju nol pada jarak yang sangat jauh, seperti tampak pada Gambar 3.4.



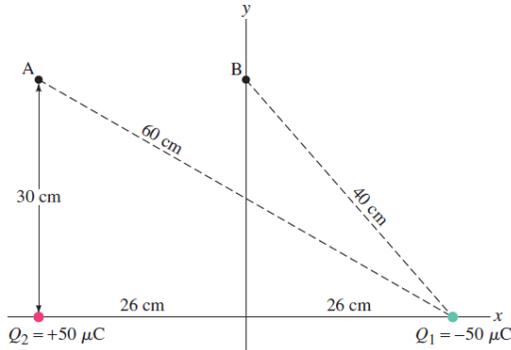
Gambar 3.4. Grafik Potensial Listrik

(a) Muatan +Q

(b) Muatan -Q

Contoh 3.4:

Soal:



Hitunglah potensial listrik pada titik A dan B yang disebabkan oleh dua muatan $Q_1 = -50 \mu\text{C}$ dan $Q_2 = +50 \mu\text{C}$

Jawaban:

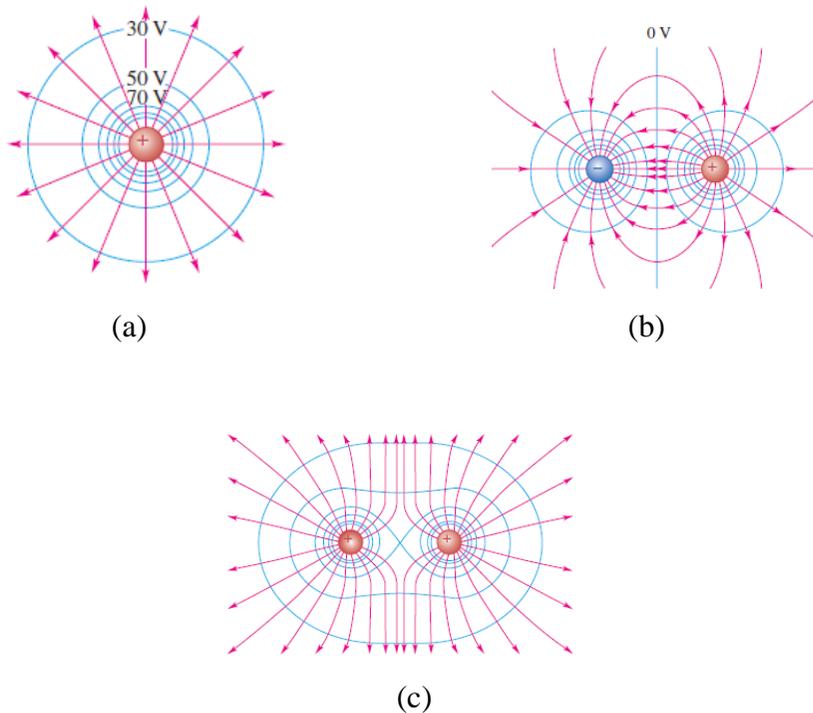
$$V_A = V_{A1} + V_{A2} = k \frac{Q_2}{r_{2A}} + k \frac{Q_1}{r_{1A}}$$
$$V_A = 9 \times 10^9 \frac{(5 \times 10^{-5})}{0,3} + 9 \times 10^9 \frac{(-5 \times 10^{-5})}{0,6}$$
$$V_A = 7,5 \times 10^{-5} \text{ Volt}$$
$$V_B = V_{B1} + V_{B2}$$
$$V_B = 9 \times 10^9 \frac{(5 \times 10^{-5})}{0,4} + 9 \times 10^9 \frac{(-5 \times 10^{-5})}{0,4}$$
$$V_B = 0$$

E. Garis-garis Ekipotensial

Masih ingatkah kalian tentang garis-garis gaya? Garis-garis gaya adalah garis-garis khayal yang fungsinya untuk menggambarkan medan listrik yang dihasilkan oleh muatan. Untuk menggambarkan potensial listrik, kita akan membuat permukaan yang serupa dengan garis khayal tersebut. Dalam potensial listrik garis khayal ini disebut garis-garis ekipotensial atau permukaan ekipotensial. Perhatikanlah

Gambar 3.5, yang memperlihatkan permukaan ekipotensial dan garis-garis gaya.

→ Garis-garis gaya
 — Permukaan ekipotensial



Gambar 3.5. Permukaan Ekipotensial
 (a) Sebuah Muatan Positif
 (b) Dua muatan Berbeda Jenis
 (c) Dua Muatan Sejenis

Permukaan ekipotensial menggambarkan bahwa semua titik di permukaan tersebut memiliki potensial yang sama. Artinya di permukaan yang sama beda potensial bernilai nol. Sehingga untuk memindahkan muatan listrik dari satu titik ke titik lain di permukaan tersebut tidak diperlukan usaha ($W = 0$). Perhatikanlah kembali

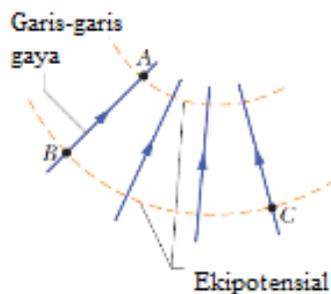
Gambar 3.5. Dari gambar tersebut dapat kita lihat bahwa garis-garis gaya selalu menembus tegak lurus permukaan ekipotensial.

Seperti halnya garis-garis gaya, pada daerah yang dekat dengan sumber muatan, permukaan ekipotensial lebih rapat dibanding daerah yang jauh dari muatan sumber. Kerapatan ini berkaitan dengan kuat dan lemahnya medan listrik. Jadi semakin jauh dari muatan sumber potensial listrik semakin lemah atau menurun nilainya.

Contoh 3.5:

Soal:

Saat elektron pindah dari A ke B sepanjang garis gaya seperti tampak pada gambar di bawah ini, medan gaya listrik mengerjakan usaha pada elektron tersebut yang besarnya $3,94 \times 10^{-19}$ J.



Berapakah besarnya beda potensial listrik pada:

- $V_B - V_A$
- $V_C - V_A$
- $V_C - V_B$

Jawaban:

Sebelum menjawab besarnya potensial listrik, mari kita perhatikan garis-garis gaya yang disajikan pada gambar dalam soal. Garis-garis gaya arahnya menuju ke sumber. Berarti sumber medan listrik adalah muatan negatif. Dengan demikian elektron bergerak menjauhi muatan sumber (ingat, muatan sejenis akan saling menolak). Karena elektron bergerak menjauhi muatan sumber, maka potensial di A lebih tinggi dibanding potensial di B dan di C. Dengan menerapkan persamaan :

$$1) \Delta EP = -W$$

$$2) \frac{EP_b - EP_a}{q} = V_b - V_a$$

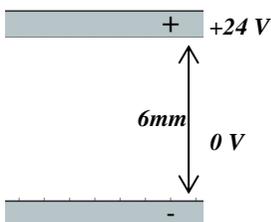
Maka kita peroleh persamaan: $\frac{-W}{q} = V_b - V_a$

Karena besarnya muatan sebuah elektron $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, maka:

$$a. V_B - V_A = -\frac{3,94 \times 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \times 10^{-19}} = -2,46 \text{ Volt}$$

$$b. V_C - V_A = V_B - V_A = -2,46 \text{ Volt}$$

c. $V_C - V_B = 0$ karena titik C dan titik B memiliki potensial yang sama. Di permukaan yang sama beda potensial bernilai nol.

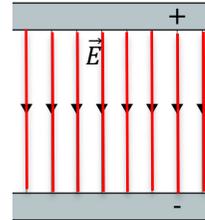
Contoh 3.6:**Soal:**

Sepasang pelat berjarak 6mm, dengan beda potensial 24 V. Potensial pada pelat negatif adalah nol dan pada pelat positif 24 V. Gambarlah garis-garis gaya diantara kedua pelat tersebut dan gambarlah pula

permukaan ekuipotensial yang besarnya 24 V, 18 V, 12 V, 6 V, and 0.

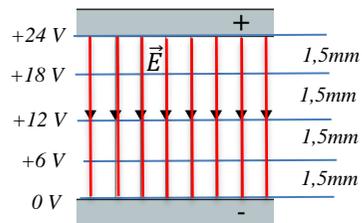
Jawaban:

Diantara kedua pelat, medan listrik yang dihasilkan seragam dan arahnya dari pelat positif menuju pelat negatif. Medan listrik tersebut tegak lurus terhadap pelat. Seperti ditampilkan pada Gambar 6 (a).



Gambar 6 (a). Medan Listrik diantara Pelat

Diantara pelat terdapat permukaan-permukaan ekuipotensial yang paralel dengan pelat. Potensial pada pelat negatif adalah nol dan pada pelat positif 24 Volt. Maka diantara pelat yang berjarak 6 mm, potensial bertambah secara linier dari kecil ke besar dalam rentang 4. Dengan demikian kita dapat menetapkan bahwa setiap 1,5 mm potential meningkat sebesar 4V. Gambar 6 (b) memperlihatkan permukaan ekuipotensial diantara pelat tersebut

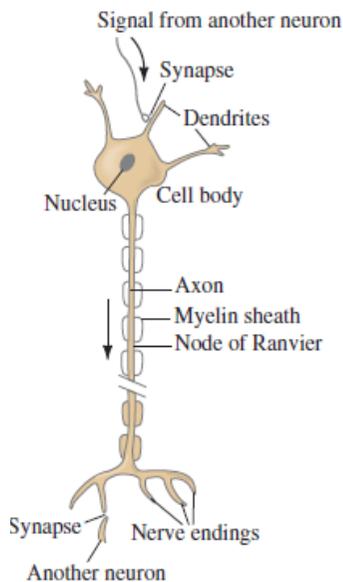


Gambar 6 (b). Permukaan Ekuipotensial diantara Pelat

IV. APLIKASI LISTRIK STATIS PADA MAKHLUK HIDUP

A. Sel Saraf Manusia

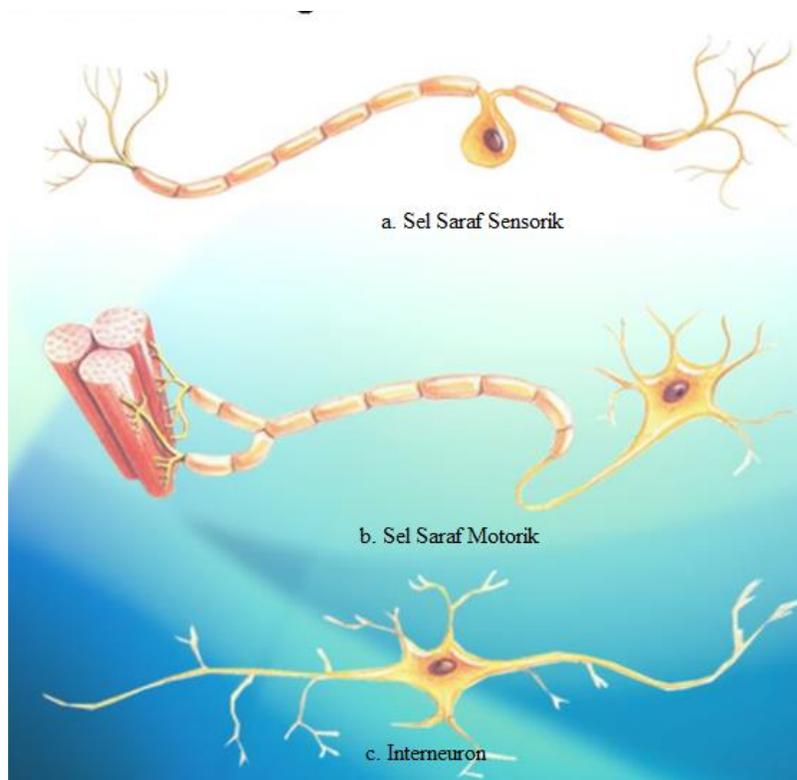
Aplikasi dari aliran muatan listrik adalah pada sistem saraf. Sistem saraf menyediakan fasilitas untuk komunikasi di dalam tubuh dan untuk mengendalikan otot-otot tubuh. Komunikasi di dalam tubuh ditransmisikan oleh sinyal-sinyal listrik sepanjang elemen dasar sistem saraf yang disebut neuron. Neuron terdiri dari dendrit dan ekor panjang yang disebut akson yang terpasang ke tubuh sel utama. Sinyal-sinyal yang diterima oleh dendrit dirambatkan sepanjang akson. Ketika sinyal mencapai ujung syaraf, sinyal ditransmisikan ke saraf berikutnya melalui penghubung yang disebut sinapsis. Gambar 4.1 adalah sketsa dari Neuron yang disederhanakan.



Gambar 4.1. Sketsa Neuron yang disederhanakan

Neuron bekerja dalam tiga kapasitas, yaitu: 1). Neuron sensorik, 2). Neuron motorik dan 3). Interneuron. Neuron sensorik

membawa pesan dari mata, telinga, kulit dan organ lain ke sistem saraf pusat (otak dan saraf tulang belakang). Neuron motorik membawa pesan dari sistem saraf pusat ke otot-otot tertentu dan bisa memberi perintah pada otot untuk berkontraksi. Neuron sensorik dan neuron motorik membentuk sistem periferal karena terpisah dari sistem saraf pusat. Sedangkan interneuron bertugas dalam mengirimkan pesan antar neuron. Interneuron terdapat pada otak dan tulang belakang dan saling terhubung dengan susunan yang sangat rumit. Gambar 4.2 memperlihatkan jenis-jenis neuron.

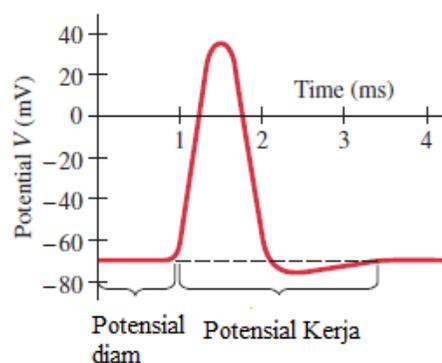


Gambar 4.2. Jenis-jenis Neuron

Neuron dalam keadaan relaksasi atau diam tidak mengirim sinyal-sinyal listrik. Saat itu dikatakan sebagai potensial diam. Sel-

sel saraf akan bereaksi terhadap adanya rangsangan dan menghantarkan sinyal listrik sepanjang sel saraf. Rangsangan yang dapat menyebabkan sel saraf bereaksi bisa bersifat termal (ketika kita menyentuh benda panas), kimiawi (rasa makanan), tekanan (pada kulit atau gendang telinga), cahaya (pada mata) atau rangsangan listrik dari sinyal yang datang dari otak atau neuron lain.

Semua aktivitas manusia dikendalikan oleh otak dan diaktifkan dengan sinyal listrik. Otak memutuskan perintah dan diantarkan oleh sinyal listrik ke bagian tubuh yang dituju melalui sistem saraf. Neuron adalah sel saraf yang bertanggung jawab seperti kabel listrik, ia menghantarkan sinyal listrik ke seluruh tubuh manusia. Jika rangsangan melampaui nilai ambang tertentu maka akan timbul suatu pulsa (denyut/impuls) tegangan yang merambat sepanjang akson. Pulsa tegangan ini disebut potensial aksi memiliki bentuk seperti diperlihatkan pada Gambar 4.3. Potensial aksi mampu bertahan sampai 1 milidetik dan merambat sepanjang akson dengan laju 30m/detik sampai 150 m/detik.



Gambar 4.3. Potensial Aksi

Apa yang dimaksud dengan potensial diam dan apa yang menyebabkan munculnya potensial aksi? Kita akan membahasnya kemudian setelah kita membahas distribusi muatan listrik pada akson. Sel-sel dalam kondisi istirahat (relaksasi) memiliki muatan positif yang menempati membrane plasma sel bagian luar dan muatan negatif menempati membrane plasma bagian dalam seperti diperlihatkan pada Gambar 4.4. Keadaan relaksasi ini potensialnya disebut potensial diam yang dinyatakan sebagai $V_{\text{dalam}}-V_{\text{luar}}$ yang besarnya sekitar -60mV sampai -90mV (Lihat Gambar 4.4).



Gambar 4.4. Muatan Listrik pada Akson dalam Kondisi Relaksasi

Potensial aksi adalah suatu peristiwa yang terjadi antara neuron dalam rangka untuk mengirim pesan dari otak ke bagian-bagian tubuh yang berbeda, baik untuk tindakan sadar atau tak sadar. Dalam arti sederhana, potensial aksi dapat digambarkan sebagai pulsa listrik pendek yang dibuat di dalam badan sel neuron.

Apa yang menyebabkan munculnya potensial aksi? Pada titik rangsangan, membran plasma sel mengubah sifatnya permeabilitasnya yang memungkinkan ion-ion positif mampu menghambur ke dalam sel sehingga permukaan dalam sel menjadi bermuatan positif. Seperti tampak pada Gambar 4.5 Keadaan ini membuat beda potensial antara permukaan dalam dan permukaan luar menjadi positif yaitu sekitar 30mV (lihat Gambar 4.5).

dengan menggunakan cakram logam kecil (elektroda) yang dilekatkan pada kulit kepala. Sel otak berkomunikasi melalui impuls listrik dan aktif setiap saat, bahkan ketika sedang tidur. Aktivitas ini kemudian ditampilkan sebagai garis bergelombang pada rekaman EEG. Pemeriksaan EEG adalah salah satu tes diagnostik utama untuk epilepsi. Pemeriksaan ini juga dapat berperan dalam mendiagnosis gangguan otak lainnya.

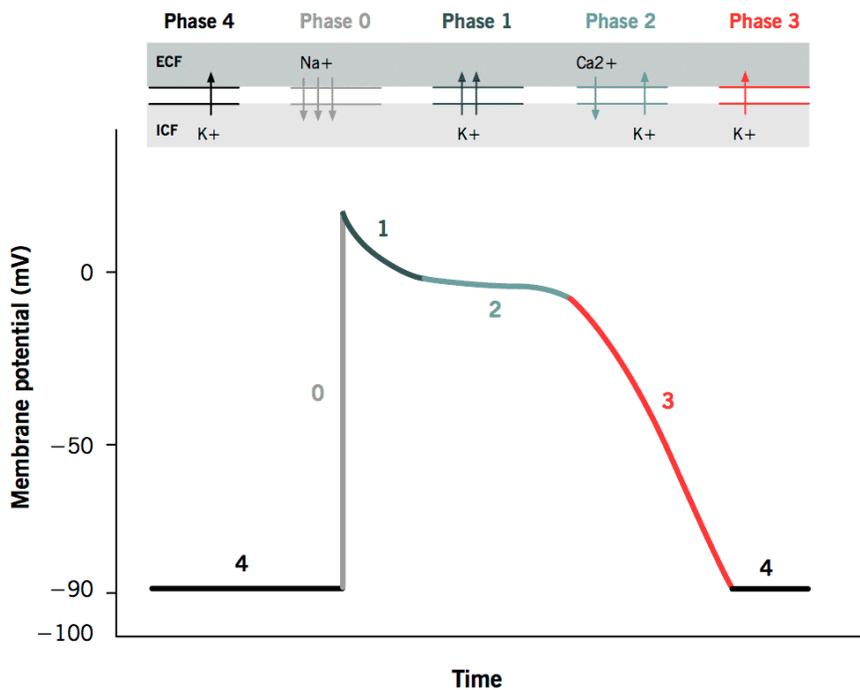
B. Kelistrikan pada Jantung

Sistem listrik jantung mengontrol kecepatan dan irama detak jantung. Tiap kali jantung berdenyut, sinyal listrik merambat dari jantung bagian atas ke bagian bawah. Saat sinyal ini berjalan, jantung berkontraksi dan memompa darah. Kontraksi sel otot jantung dalam siklus di picu oleh aksi potensial yang menyebar ke seluruh membran sel otot. Terdapat dua jenis sel otot jantung. Yang pertama adalah sel kontraktil yang membentuk 99% dari sel-sel otot jantung, melakukan kerja mekanis memompa darah. Dalam keadaan normal, sel ini tidak membentuk sendiri potensial aksinya. Yang kedua adalah sel otoritmik, yang tidak berkontraksi tapi khusus memulai dan menghantarkan potensial aksi yang menyebabkan kontraksi sel-sel jantung kontraktil.

Sel otoritmik jantung merupakan sel otot khusus yang berbeda dari sel saraf dan sel otot rangka di mana sel otoritmik jantung tidak memiliki potensial istirahat. Sel ini memperlihatkan aktivitas pemicu yaitu potensial membran secara perlahan terdepolarisasi sampai ke ambang (potensial pemicu). Dengan siklus yang berulang tersebut, sel otoritmik memicu potensial aksi yang kemudian menyebar ke

seluruh jantung untuk memicu denyut berirama tanpa rangsangan saraf apapun.

Kontraksi sel otot jantung terjadi oleh adanya potensial aksi yang dihantarkan sepanjang membran sel otot jantung. Jantung akan berkontraksi secara ritmik, akibat adanya impuls listrik yang dibangkitkan oleh jantung sendiri (*Autorhythmicity*). Dengan siklus yang berulang sel otoritmik memicu potensial aksi yang kemudian menyebar ke seluruh jantung untuk memicu denyut berirama tanpa rangsangan saraf apapun. Potensial aksi yang dihantarkan sepanjang membran sel otot jantung melalui fase-fase berikut:



Gambar 4.7 Grafik Potensial Aksi pada Jantung

- Fase 0 (Depolarisasi Cepat)

Dalam keadaan normal, serat otot jantung dapat berkontraksi sekitar 60-100 kali/menit oleh karena impuls listrik. Aksi ini merubah

potensial istirahat membran dan membiarkan masuknya aliran Na^+ (sodium) secara cepat ke dalam sel melalui natrium channel. Dengan masuknya ion natrium (bersifat positif) ke dalam sel, maka potensial dalam membran sel akan menjadi lebih positif sehingga ambang potensialnya akan naik (depolarisasi) sekitar 30 mV.

- Fase 1 (Repolarisasi Awal)

Segera setelah fase 0, channel untuk ion K^+ (potassium) terbuka dan melewatkan ion kalium ke luar dari dalam sel. Hal ini membuat potensial membran sel menjadi lebih turun sedikit.

- Fase 2 (Plateu)

Segera setelah repolarisasi awal, untuk mempertahankan ambang potensial di membran sel maka ion kalsium (Ca^+) akan segera masuk sementara ion kalium tetap keluar. Dengan begini, ambang potensial membran sel akan tetap datar untuk mempertahankan kontraksi sel otot jantung.

- Fase 3 (Repolarisasi Cepat)

Aliran lambat ion kalsium berhenti, akan tetapi aliran ion kalium yang keluar membran sel tetap terjadi sehingga potensial membran menjadi turun (lebih negatif) dan disebut dengan repolarisasi.

- Fase 4 (Istirahat/resting state)

Potensial membran menjadi ke fase istirahat dimana potensialnya sekitar -90 mV. Dikarenakan ion natrium yang berlebihan di dalam sel dan ion kalium yang berlebihan di luar sel dikembalikan ke tempat semula dengan pompa natrium-kalium, sehingga ion natrium kembali ke luar sel dan ion kalium kembali ke dalam sel. Pada otot jantung, ion Na^+ mudah bocor sehingga setelah repolarisasi, ion Na^+ akan masuk kembali ke sel disebut depolarisasi spontan (nilai ambang dan potensial aksi tanpa memerlukan rangsangan dari luar). Sel otot

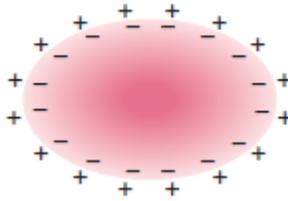
jantung akan mencapai nilai ambang dan potensial aksi pada kecepatan yang teratur disebut Natural Rate.

Elektrokardiogram (EKG) adalah pemeriksaan untuk mengukur dan merekam aktivitas listrik jantung. EKG umumnya dilakukan untuk memeriksa kondisi jantung dan menilai efektivitas pengobatan penyakit jantung. Elektrokardiogram, atau yang disebut juga dengan pemeriksaan rekam jantung, dilakukan menggunakan mesin pendeteksi impuls listrik jantung yang disebut elektrokardiograf. Dengan alat tersebut, impuls atau aktivitas listrik jantung akan terpantau dan tampak berupa grafik yang ditampilkan di layar monitor.

Elektrokardiogram adalah istilah yang digunakan untuk alat perekam aktivitas listrik jantung melalui alat sadapan listrik. Sadapan listrik ini ditempelkan pada kulit tangan, kaki, dan dada kiri. Terdapat 10 alat penyadap listrik yang ditempelkan pada kulit, disebut juga sebagai elektroda. Lewat 10 elektroda ini, aktivitas listrik jantung diukur dari beragam sisi, membentuk gambaran 12 sudut pandang. Keduabelas sudut pandang ini akan dicetak pada kertas dalam bentuk gelombang yang kemudian diartikan secara keseluruhan oleh dokter untuk menentukan penyakit pasien.

C. Kelistrikan pada Sel Otot Rangka

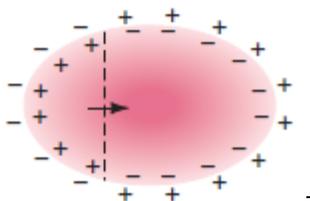
Pada sel-sel otot dalam kondisi istirahat (relaksasi) muatan positif menempati membrane plasma sel bagian luar dan muatan negatif menempati membrane plasma sel bagian dalam seperti diperlihatkan pada Gambar 4.8. Umumnya beda potensial, atau kita kenal dengan sebutan tegangan, pada membran sel sebesar 80 Mv.



Gambar 4.8. Muatan Listrik pada Sel dalam Kondisi Relaksasi

Jumlah muatan tergantung ukuran selnya. Umumnya ada sebanyak 10^{-3}C per meter persegi permukaan sel. Jika permukaan sel luasnya 10^{-5}m^2 , berarti ada 10^{-8}C muatan (ingat muatan sebuah partikel adalah $1,602 \times 10^{-19}\text{C}$). Jadi dalam sel seluas 10^{-5}m^2 kira-kira ada berapa banyak muatan listrik? (ada 10^{11} muatan).

Pada keadaan kontraksi terjadi perubahan pada membrane plasma sel. Melalui mekanisme biologi dan kimia tertentu, muatan-muatan positif masuk ke bagian dalam sel melalui pori-pori sempit yang memiliki penampang lingkaran dengan radius 0,15 nm. Pori-pori ini terbuka selama 1 ms dan melewatkan $1,1 \times 10^4$ ion kalium terionisasi tunggal. Muatan positif yang semula berada diluar sel, akhirnya menghambur ke dalam sel. Muatan positif melintasi membran sehingga menciptakan tegangan (potensial) searah yang nilainya kecil seperti diperlihatkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Muatan Listrik pada Sel dalam kondisi Kontraksi

Sebagaimana kita tahu bahwa di dalam benda apapun termasuk dalam sel otot jika ada ketidakseimbangan muatan-muatan listrik di dalamnya maka benda akan selalu berusaha menetralkan diri. Dengan demikian muatan-muatan listrik positif akan bergerak menuju ke muatan negatif dan sebaliknya. Kondisi inilah yang menyebabkan terjadinya aliran listrik di dalam sel.

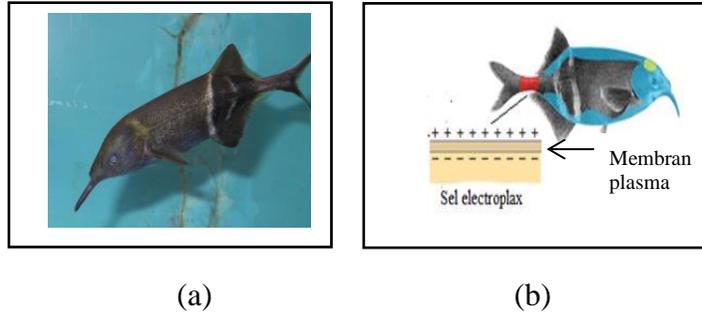
D. Kelistrikan pada pada Hewan

Salah satu contoh hewan yang dapat menghasilkan listrik yaitu Ikan belalai gajah (*Peters's Elephantnose fish*) memiliki nama latin yaitu *Gnathonemus petersii* (Gambar 4.10a). Ikan tersebut banyak ditemukan di wilayah Afrika seperti negara Angola, Kamerun, Republik Afrika Tengah, Chad, Kongo, Nigeria, Zambia dan lainnya. Hidup pada kondisi perairan gelap, dengan arus air yang lambat, bervegetasi lebat, substrat berpasir atau berlumpur. Ikan bersifat nokturnal atau aktif di malam hari.

Ikan belalai gajah memiliki keunikan dengan menghasilkan listrik bertegangan rendah beberapa millivolt untuk menyengat musuh dan mangsa serta navigasi di lingkungan tempat hidupnya. Nama organ yang dapat menghasilkan listrik yaitu sel electroplax yang terletak pada bagian pangkal ekor.

Pada keadaan beristirahat/relaksasi menunjukkan bagian dalam sel electroplax bermuatan negatif dan pada bagian luar sel electroplax terdapat muatan positif (Gambar 4.10b). Sel electroplax terdiri dari sejumlah besar sel otot yang bertumpuk secara seri. Adanya perbedaan muatan yang dihasilkan oleh sel bagian dalam dan bagian luar dari sejumlah besar sel electroplax ini maka terjadi perbedaan

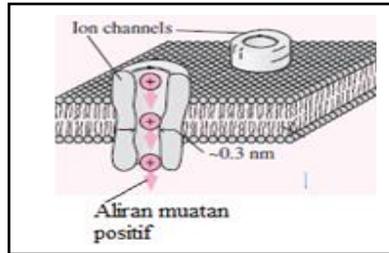
potensial listrik. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa ikan belalai gajah dapat menghasilkan listrik statis.



Gambar 4.10. a). Ikan Belalai Gajah dan b). Muatan Listrik pada Sel Electroplex Kondisi Istirahat

Arus listrik adalah aliran muatan listrik. Ketika ikan belalai gajah merasakan keberadaan musuh dan mangsa maka ekor ikan akan kontraksi. Pada keadaan kontraksi tersebut menyebabkan muatan-muatan listrik positif yang awalnya berada di bagian luar sel electroplex mengalami perpindahan melalui ion channel (merupakan protein membran plasma sel electroplex). Jumlah perpindahan muatan listrik positif sangat banyak.

Setiap *ion channel* yang memiliki luas penampang sekitar 0,3 nm yang berkontribusi memindahkan muatan yang melintasi membran untuk menghasilkan arus yang sangat besar. Muatan listrik positif yang berpindah ke bagian dalam sel menghasilkan aliran listrik (Gambar 4.11). Arus listrik yang mengalir pada sel-sel electroplex akan merambat ke luar tubuh ikan untuk menyengat musuh dan mangsa.



Gambar 4.11. Perpindahan Muatan Listrik Positif pada Sel Electoplax

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, N.A., Reece, J.B., & Mitchell, L.G. (1999). *Biologi*. Jakarta: Erlangga.
- Jung S.N., Kunzel S., & Engelmann J. (2019). Spatial learning through active electroreception in *Gnathonemus petersii*. *Animal Behaviour*. 156: 1-10. doi: 10.1016/j.anbehav.2019.06.029.
- Ramlawati & Yunus, S.R. (2016). *Sumber Belajar Penunjang PLPG 2016 Mata Pelajaran IPA Bab X Listrik dan Kemagnetan*. Jakarta: Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan.
- Irawati, L. (2015). Aktifitas Listrik pada Otot Jantung. *Jurnal Kesehatan Andalas*, 4(2).
- Giancoli, D. C. (2014). *Physics for scientists & engineers with modern physics*. Pearson.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for scientists and engineers*. Macmillan.

ISBN 978-623-98725-5-7

