

BAB 18

KEMAGNETAN

Kemagnetan merupakan dasar pokok gaya, terutama yang berhubungan dengan listrik. Karena adanya kemunculan benda magnetic, beberapa contoh efek magnetic telah diketahui sejak zaman dahulu kala. Akan tetapi, gejala elektromagnetik penting mengadakan kontak antara listrik dan kemagnetan yang dikembangkan hanya pada abad ke-19. Buktinya, semua perangkat digunakan dalam pembangkitan komersial dan distribusi listrik, seperti generator, transformator, dan motor, yang berdasar pada prinsip elektromagnetik yang dikembangkan antara tahun 1820 dan tahun 1831. Lagipula, pada tahun 1873 Maxwell menunjukkan perhitungan bahwa prinsip-prinsip itu termasuk gelombang medan magnet dan listrik yang keadaannya tunggal menyebar dengan melintas pada kecepatan cahaya. Demikianlah prinsip elektromagnetik merupakan dasar teknologi kita, dan pemahaman kita mengenai sifat dasar cahaya dan bentuk lain dari radiasi gelombang elektromagnetik.

18.1 Magnet

Contoh termasyur dari kemagnetan adalah ditariknya besi plat tipis oleh ujungnya, atau kutub magnet. Gejala ini memiliki kesamaan merunut ditariknya plat tipis apung oleh tangkai berlistrik. Bagaimanapun, besi merupakan salahsatu bahan langka yang ditarik oleh magnet. Sedangkan beberapa bahan lainnya ditarik oleh tangkai berlistrik. Selanjutnya, sebuah tangkai tetap mengandung listrik dalam waktu sebentar, padahal sebuah magnet memelihara kemagnetannya secara tidak terbatas.

Sebuah jarum kompas merupakan sepotong magnet tipis panjang yang demikian dibuat menggantung di pusat gravitasi supaya dapat berputar bebas di bidang datar. Bilamana tidak ada benda magnetic di dekatnya, jarumnya akan lurus sendiri di dekat arah penunjuk utara-selatan. Ujung jarum yang menunjuk mata angin utara disebut kutub utara magnet; Ujung yang lainnya disebut kutub selatan. Utara dan selatan digunakan untuk membedakan lawan dari kutub magnet, sebagaimana positif dan negative yang digunakan untuk membedakan lawan dari muatan listrik.

Selanjutnya, gaya antara dua kutub magnetic bergantung pada kutubnya pada cara yang sama bahwa gaya antara dua muatan listrik bergantung pada muatannya; Lawan kutub tarik-menarik, dan kutub sejenis tolak menolak Hal ini mudah diperagakan dengan dua batang magnet yang kutubnya telah ditentukan dari penunjuk cenderung utara (atau penunjuk selatan). Ketika kutub utara salahsatu magnet didekatkan ke kutub selatan magnet yang satu lagi, maka kedua kutub tersebut tarik-menarik. Sedangkan saat kutub utara magnet didekatkan ke kutub utara magnet yang satu lagi, maka kedua kutub satu sama lain tolak-menolak

Karena tarik-menarik di kutub tak sama, jarum kompas didekatkan ke batang magnet akan lurus sendiri dengan kutub utaranya diarahkan menghadap kutub selatan magnet. Bumi sendiri adalah magnet raksasa yang kutub selatannya berlokasi di dekat kutub utara geografis. Oleh karena itu, dengan kehadiran magnet lainnya, kutub utara pada jarum kompas menunjuk arah utara menghadap kutub selatan magnet bumi. Bagaimanapun, magnet bumi itu lemah yang dampaknya di jarum kompas tidak memenuhi syarat dibandingkan dengan magnet terdekat. Dengan konsekuensi kita dapat mengabaikan magnet bumi saat mempertimbangkan efek magnet terdekat dari kompas.

Tidak seperti muatan listrik, magnet yang terisolasi kutubnya tidak tetap. Misalnya, bila kita mencoba memisahkan kutub utara dan selatan pada magnet panjang dengan membelahnya menjadi dua, kita mendapati bahwa kutub utara dan selatan dengan segera muncul pada ujung yang dipatahkan, maka tiap bagian sisanya menjadi magnet utuh dengan kedua kutubnya utara dan selatan. Buktinya, tidak menjadi masalah bagaimana banyaknya potongan magnet yang dipatahkan, tiap potongan memiliki kutub utara dan selatan yang sama kuatnya. Lagi pula, sejumlah unsur partikel, seperti electron, proton, dan neutron, berperan sebagai magnet utuh dengan kutub utara dan selatan. Karena unsure partikel dengan satu kutub magnet saja tidak pernah didapati, kekurangan mendasar pada kutub magnet signifikan bahwa muatan listrik ada.

Namun, *medan magnet B* dapat didefinisikan pada cara yang sama sebagaimana kita mendefinisikan medan listrik E . Mengingat bahwa magnet listrik pada berbagai titik di ruang merupakan gaya yang system muatannya akan mendesak pada satu kesatuan muatan listrik positif yang ditempatkan di titik tersebut. Demikian juga, medan magnet pada berbagai titik di ruang merupakan gaya yang system muatannya akan (misalnya

sepotong magnet) akan mendesak pada satu unit kutub utara magnet yang ditempatkan pada titik tersebut. Semenjak kutub terisolasi tidak eksis, kita harus menggunakan jarum compass untuk mengukur medan.

Sebagai contoh, anggap sebuah jarum kompas kecil ditempatkan pada titik P di medan magnet yang dinuat oleh batang magnet. Dua buah kutub magnet mendesak sebuah gaya netto F_1 pada kutub utara jarum kompas dan sebuah gaya netto F_2 pada kutub selatan. Bila kutub utara kompas tidak sediaan diluruskan dengan medan magnet di P , menunjukkan bahwa gaya-gaya tersebut mendesak sebuah torca yang akan memutar sumbu jarum sampai lurus dengan medan. Karena torca pada jarum kompas itu nol saat lurus dengan medan magnet saja, keseimbangan jarum kompas yang arahnya menunjuk medan magnet di sekitarnya. Dengan konsekuensi, arah medan magnet pada berbagai titik di ruang diberikan dari penempatan jarum kompas di titik tersebut.

Gambar 18.5 menunjukkan medan magnet di sekeliling batang magnet. Sebagaimana dengan medan listrik, garis-garis gaya digambarkan masuk bersama-sama dengan magnitude apapun ketika medan magnet makin menguat. Sebuah perbandingan pada gambar 18.5 dan 16.14 menunjukkan bahwa medan magnet di sekeliling batang magnet identik dengan medan listrik di sekeliling sebuah dipole listrik. Hal ini tidak mengherankan ketika anda menyadari bahwa sebuah magnet adalah sebuah dipole magnet. Itulah system yang tersusun dari dua buah kutub yang dipisahkan oleh jarak d .

Gambar 18.7 menunjukkan medan magnet pada magnet C, yang mana magnetnya bengkok, karena itu kedua kutubnya berhadap-hadapan satu sama lain. Konfigurasi ini memiliki banyak aplikasi penting karena memproduksi sebuah medan seragam dekat pada celah antara dua kutub.

18.2 Arus dan Magnetisasi

Banyak bukti dasar mengenai listrik statis, arus, dan magnet permanent yang dikenal pada akhir abad ke-18. Karena kesamaan fenomena antara listrik dan magnet, banyak ilmuwan menduga hubungan diantaranya, tetapi masih belum ditemukan. Kemudian pada tahun 1820, seorang fisikawan Denmark Hans Christian Oersted (1777-1851) membuat sebuah penemuan penting yang dapat mengubah peradaban. Ketika

memperagakan beberapa contoh kepada sejumlah pelajar, Oersted memberitahukan bahwa sebuah jarum kompas dibelokkan kapanpun ketika ada arus di dekat kawat. Bereksperimen lebih lanjut, ia mengembangkan bahwa sebuah kawat arus pembawa memiliki efek yang sama pada sebuah jarum kompas sebagai magnet. Hali ini merupakan satu dari hubungan pencarian pencarian antara listrik dan kemagnetan: kemagnetan dihasilkan oleh arus.

Andre Marie Amper (1775- 1836) menginvestigasikan penemuan Oersted lebih lanjut dan segera mengembangkan sebuah perhitungan matematis lengkap yang menggambarkan hubungan antar listrik dan kemagnetan. Ia berpendapat bahwa garis-garis gaya magnetic yang dekat dengan sebuah kawat arus pembawa merupakan bentuk dari llingkaran konsentrasi mengenai kawat yang ditunjukkan pada gambar 18.8. Hal ini dapat didemonstrasikan dengan menempatkan sebuah komaps kecil pada pesawat yang tegaklurus terhadap kawat. Jarum kompas yang arah mata anginnya pada arah medan magnet dimana berlokasi, selau ditemukan tegaklurus pada radius r yang digambarkan dari kwat ke jarum, yang mengindikasikan bahwa bentuk medan sebuah lingkaran pada kawat. Hubungan antara arah medan dan arah arus diberikan pada *kaidah tangan kanan* : *Ketika sebuah kawat digenggam dengan tangan kanan dengan cara bahwa ibu jari menandakan arah arus, gambar kawat melingkar dalam pengertian yang sama sebagai medan magnet.*

Magnitudo B pada medan magnet di titik dekat kawat arus pembawa yang sangat panjang sepadan dengan dengan arus I dan sebaliknya berbandingan tegaklurus dengan jarak r dari titik ke kawat. Simbol hubungan ini adalah

$$B = k \frac{I}{r} \quad 18.1$$

Dimana k adalah konstanta perbandingan, pada system satuan mks, dimana satuan arus adalah ampere dan satuan jarak adalah meter, satuan kuat medan magnet adalah *tesla* (T)

Hal itu didefinisikan dengan mengambil k dengan tetapan $2 \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$. Karena itu, dengan definisi magnitudo medan magnet satu meter dari kawat panjang tersebut memiliki arus sebesar satu ampere

$$B = k \frac{I}{r} = 2 \times 10^{-7} \text{ T.m/A} \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ m}} = 2 \times 10^{-7} \text{ T}$$

Konstanta k selalu ditulis

$$k = \frac{\mu_0}{2\pi}$$

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

Disebut permeabilitas magnetic. Pada hubungan μ_0 Persamaan 18.1 menjadi

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad 18.2$$

Sebagai contoh, mari kita hitung medan pada titik 5 cm dari sebuah kawat yang arusnya 3 A. Dari persamaan 18.2 medan adalah

$$\begin{aligned} B &= \frac{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A})(3 \text{ A})}{2\pi \cdot 0,05 \text{ m}} \\ &= 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 0,12 \text{ G} \end{aligned}$$

Di tengah garis sejajar, magnitudo medan magnet bumi berkisar antara 0,1 dan 0,4 G, oleh karena itu, efek pada medan di kawat pada jarum compass kecil perbandingannya dibandingkan dengan efek medan bumi.

Medan magnet dihasilkan oleh kawat arus pembawa meningkat dengan pesat, jika kawat dibentuk ke dalam sebuah koil bundar dengan berbagai perubahan. Hal ini dapat dimengerti dengan mempertimbangkan koil dengan dua perubahan ditunjukkan pada 18.9. Tiap perubahan menghasilkan sebuah medan yang seimbang dengan arus I pada kawat, maka kedua perubahan tersebut bersama-sama menghasilkan sebuah medan yang seimbang menjadi $2I$. Kesamaannya, sebuah koil dengan perubahan n menghasilkan

sebuah medan seimbang menjadi nI . Sejak pusat koil dengan radius a merupakan jarak a dari kawat, kita barangkali berharap dari persamaan 18.2 bahwa medan di pusat adalah

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2\pi a}$$

Ini tidak sepenuhnya benar, bagaimanapun, karena persamaan 18.2 hanya berlaku untuk kawat lurus yang sangat panjang, padahal inilah persetujuan dengan sebuah kawat bundar. Ungkapan yang benar bagi sebuah kawat bundar adalah

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2a} \quad 18.3$$

Yang berbeda dari ungkapan sebelumnya hanya dari sebuah factor π , berdasarkan keapda perbedaan geometri anatar sebuah kawat lurus dan sebuah kawat bundar. Medan di pusat koil tegaklurus terhadap dataran koil.

Sebagai contoh, pertimbangkan sebuah koil berjari-jari 5 cm yang kawatnya telah berubah 100kali. Ketika arus pada kawat adalah 3A, medan magnet pada pusat koil adalah

$$B = \frac{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m / A})(100)(3A)}{2 \cdot 0,05m}$$

$$= 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ T} = 37,7G$$

Yang 100 kali medan magnet bumi

Gambar 18.10 menunjukkan sebuah kompas pada pusat koil mengalami9 banyak perubahan. Ketika pemutar S ditutup, komaps mengarah pararel sendiri ke medan magnet yang dihasilkan arus. Ketika pemutar dibuka, medan hilang dan jarum mengayun kembali kea rah utara-selatan. Maka arah jarum mengindikasikan dimana ada arus di kawat.

18.3 FERROMAGNETIK

Luasnya pemakaian membuat listrik di dunia modern ini tidak mungkin terjadi apabila bukan untuk sebuah keistimewaan alat-alat dari besi, yang disebut *ferromagnetic*. Unsur peralihan lainnya, seperti nikel dan kobalt, juga mempertunjukkan alat-alat ini, tetapi besi hanyalah materi ferromagnetic yang melimpah.

Ferromagnetik adalah kecenderungan dipole-dipol magnet electron terluar pada sebuah atom untuk lurus paralel sendiri terhadap dipole magnet electron bersesuaian pada atom tetangga. Pada magnet permanent, dipole electron terluar semua atom pada volume materi besar terluruskan, maka medan magnetnya dijumlahkan bersama untuk menghasilkan medan magnet di luar magnet. Pada besi nonmagnet, dipole-dipolnya lurus dengan volume kecil, atau daerah miliknya, arah pelurusannya berbeda pada daerah yang berbeda pula. Sebagai akibat, medan magnet pada daerah tersebut menarik kembali satu sama lain sehingga tidak ada medan magnet di luar logam.

Tiap daerah, yang ditandai dengan sebuah pecahan millimeter pada tebalnya, bertingkah sebagaimana magnet permanent kecil, oleh karena itu besi nonmagnet dapat dilalui sebagaimana berjuta-juta penyesuaian acak magnet tersebut.

Ketika logam nonmagnet ditempatkan di luar medan magnet, daerahnya lurus paralel terhadap medan yang meningkat luasnya ketika ekspansi daerah lainnya. Gambar 18.12 menunjukkan hal ini untuk sepotong besi dekat salah satu kutub magnet. Karena meningkatnya luas daerah besi paralel terhadap medan luar, besi mengembangkan magnetisasi pada arah medan. Sebagaimana terlihat dari gambar 18.12, ujung pada besi terdekat dengan kutub utara magnet mengembangkan kutub selatan, oleh karena itu besi ditarik oleh magnet. Keadaan yang analog terhadap hal itu pada sepotong gabus dekat dengan tangkai listrik.

Sebuah magnet listrik terdiri dari sebuah gulungan kawat melilit di sekeliling sebuah silinder besi. (gambar 18.13). Medan magnet dihasilkan oleh sebuah arus pada lilitanyang meningkatkan luas daerahnya pada besi yang termagnetisasi pada arah medan magnet. Demikian besi mengembangkan medan magnetnya dengan menjumlahkan medan pada arus. Medan pada besi dapat dengan mudah menjadi 100 kali lebih luas daripada medan pada arus tunggal, oleh karena itu besi memperbesar efek medan magnet pada arus. Selanjutnya, bila arusnya tidak begitu besar, daerahnya dengan segera kembali ke ukuran sebenarnya ketika arusnya berhenti dan juga medan magnetnya hilang sama sekali. Itulah medan magnet pada magnet listrik yang tetap ada hanya sepanjang ada arus di lilitan.

Banyak aplikasi penting kelistrikan yang dasarnya pada kemampuan mengubah medan magnet luas tak tetap dengan magnet listrik. Kita mengilustrasikan hal ini dengan mengingat perangkat berikut.

Telegraf Morse

Telegraf penerima morse (gambar 18.14) terdiri atas sebuah magnet listrik yang tersusun di bawah sebatang besi yang disebut *clapper*. Clapper berkedudukan di atas salah satu kutub pada magnet listrik dari sumber. Rangkaian yang menghubungkan magnet listrik ke baterai tertutup sewaktu-waktu ketika kunci pembawa garis akhir ditekan. Hal ini disebabkan oleh sebuah arus sekejap pada gulungan magnet listrik, yang kemudian menarik clapper. Ketika kunci dilepas, arus berhenti dan sumber mengubah kedudukan clapper ke posisi sandar. Demikian sebuah pesan kode yang tersedia di atas kunci akhir garis yang menyebabkan clapper membuat urutan yang sesuai pada bunyi ceklek di garis akhir lainnya.

Bell Listrik

Sebuah bell listrik (gambar 18.15) sama dengan telegraf penerima dalam memiliki clapper dan sebuah magnet listrik yang menarik clapper ketika rangkaian ditutup. Setiap waktu clapper bergerak menghadap magnet, menabrak sebuah bell logam, yang membuat suara berdering. Selain itu, clapper dibuat sebagai bagian dari rangkaian yang caranya seperti gerakan clapper yang menghadap magnet membuka rangkaian. Demikian, sebagaimana clapper mengenai bell, rangkaian dibuka dan clapper menarik magnet lagi. Oleh karena itu, selama switch utama *S* ditutup, clapper akan berpindah ke belakang seterusnya, dengan berkali-kali menabrak bell. Pengaturan ini merupakan salah satu mekanisme paling sederhana untuk terus menghasilkan gerakan mesin dari kelistrikan.

Motor Listrik

Sebuah motor *direct-current* (*dc*) sederhana, seperti yang digunakan pada mesin mainan, terdiri atas magnet listrik di atas sebuah batang (angker dynamo) yang berputar diantara kutub magnet C (Gambar 18.16). Ujung kawat listrik magnet menyambung dengan dua buah logam kontak (komutator) di atas batang. Rangkaian menjadi lengkap tatkala komutator menyentuh kontak luar (kol) yang menyambunfg ke baterai. Sebagaimana angker dynamo berputar, komutator berkali-kali membalikkan koneksi antara listrik magnet dan batera, maka arah arus pada listrik magnet berulang kali dibalikkan.

Ketika angker dynamo berada di posisis yang ditunjukkan (gambar 18.16.a), arusnya mengarah sesuai dengan kutub A pada listrik magnet adalah utara dan kutub B selatan. Maka dari itu, tarik-menarik di magnet C menyebabkan angker dynamo memutar berlawanan arah jarum jam. Ketika angker dynamo mencapai posisi yang ditunjukkan (gambar 18.18.b), kol tidak lama membuat hubungan dengan komutator, maka listrik magnet mati sebentar dan setelah itu dapat berputar melewati kutub magnet C. Ketika angker dynamo mencapai posisi yang ditunjukkan (gambar 18.16.c), kol mengontak lagi komutator, namun dengan hubungan ke baterai kebalikannya. Kemudian kutub A pada listrik magnet adalah kutub utara yang sekarang, dan kutub B adalah kutub selatan. Maka dari itu, tarik-menarik pada magnet C terus memutar angker dynamo dengan arah berlawanan jarum jam.

Motor listrik kecil paling banyak digunakan pada jam dan aplikasi perabotan kecil rumah lainnya adalah *sybchronous alternating-current* (*ac*) *motors* (gambar 18.17). Ada kesamaan pada motor dc kecuali bahwa itu adalah arus biasa gonta-ganti, dan bukan komutator,ysng memnalikkan polaritas pada listrik magnet. Gambar 18.17 menunjukkan bahwa perbedaan antara motor selaras dan motor dc merupakan bentuk komutator. Semenjak angker dynamo pada motor selaras membuat satu perubahan cepat secara menyeluruh berdasarkan salah satu arus gonta-ganti, kecepatan motor selaras ditentukan oleh frekuensi arus semata-mata.

18.4. Gaya Magnetik

Gaya pada sebuah arus

Penemuan Oersted menunjukkan bahwa sebuah arus listrik menggunakan sebuah gaya yang melewati medan magnet pada sebuah magnet. Oleh karena itu, sesuai dengan hukum III Newton, sebuah magnet harus menggunakan sebuah gaya, melewati medan magnetnya pada sebuah arus. Biasanya, medan magnet luar menggunakan sebuah gaya pada sebuah arus.

Anggaplah sebagai contoh, satu bagian dari kawat yang panjangnya l dimana arusnya I (gambar 18.18). (Bagian kabel ini merupakan bagian dari rangkaian besar yang tidak ditunjukkan). Bila kabel membentuk sebuah sudut θ dengan medan magnet B seragam, besarnya gaya magnetic F_m pada kawat adalah

$$F_m = BIl \sin \theta \quad 18.4$$

Ketika medannya sejajar dengan kawat, gayanya nol karena $\sin \theta^\circ = 0$. Ketika medannya tegak lurus dengan kawat, besarnya gaya adalah

$$F_m = BIl \quad 18.5$$

Karena $\sin 90^\circ = 1$. Ini hanyalah kasus yang akan kita ingat.

Arah gaya magnet pada sebuah arus adalah tegak lurus baik terhadap medan magnet maupun terhadap arus; Hal itu didapat dengan menggunakan kaidah tangan kanan sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 18.18. Jari telunjuk di tangan kanan sebagai penunjuk arah arus, sementara jari tengah sebagai penunjuk arah medan. Kemudian ibu jari sebagai penunjuk arah gaya.

Tentunya sebuah arus pembawa pada sepotong kawat tidak dapat bertahan lama dengan sendirinya;Harusnya merupakan bagian dari rangkaian besar.Mari kita ingat, oleh karena itu, gaya pada rangkaian lengkap yang ditunjukkan pada gambar 18.19. Bagian dari rangkaian terdiri dar sebuah loop empat persegi panjang pada kawat yang panjangnya l dan tebalnya d yang ditempatkan antara kutub-kutub di magnet C. Loop dihubungkan dengan sebuah sumber emf melewati kawat yang membentang di luar magnet. Sebagai akibat, tidak ada gaya magnetic di kawat luar dan hanya gaya pada loop harus benar-benar dipertimbangkan.

Selanjutnya, dua dari empat bagian lurus dari loop sejajar dengan medan magnet sehingga gaya magnetiknya juga nol. Dua bagian lainnya tegak lurus terhadap medan, maka besar gaya magnetic tiap bagian adalah BIl . Gaya-gaya pada bagian-bagian tersebut besarnya sama, namun arahnya berlawanan sehingga gaya total pada loop adalah nol.

Bagaimanapun torka total pada loop, yang cenderung memutarkannya di sekeliling poros. Besarnya torka ini berbagai titik pada sebuah poros adalah

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{1}{2}dF_m + \frac{1}{2}dF_m = dBll \\ &= BIA\end{aligned}$$

Dimana $A = ld$ merupakan luas loop. Bila loop terdiri dari lilitan n pada kawat, torkanya adalah

$$\tau_m = nBIA \quad 18.7$$

Sebagai contoh, andai sebuah loop tingginya 6 cm dan lebarnya 2 cm yang ditempatkan pada medan magnet 0,02 T. Bila loop terdiri dari 200 lilitan dan membawa arus 50 mA, torkanya adalah

$$\begin{aligned}\tau_m &= nBIA \\ &= (200)(0,02T)(50 \cdot 10^{-3} A)(12 \cdot 10^{-4} m^2) \\ &= 2,4 \cdot 10^{-4} T \cdot A \cdot m^2 \\ &= 2,4 \cdot 10^{-4} N \cdot m\end{aligned}$$

Dimana persamaan akhir diperoleh dengan menggunakan persamaan 18.6 untuk mengkonversi dari satuan listrik ke satuan mekanika.

Meskipun torka magnet pada sebuah gulungan lebih kecil, cukup untuk memutar gulungan halus tertutup. Bukti ini digunakan dalam sejumlah alat ukur arus dan beda potensial.

Sebuah *galvanometer*, yang merupakan alat ukur arus yang sangat kecil, terdiri dari banyak lilitan gulungan tertutup diantara kutub-kutub magnet C dari kawat yang baik. Penutupannya diatur dengan cara ketika tidak ada arus di gulungan, gulungan berada pada posisi yang ditunjukkan gambar 18.19. Ketika arus kecil di gulungan, torka

magnetic τ_m pada gulungan menyebabkan gulungan berputar, lalu memelintir kawat tertutup. Sebagai kawat yang dipelintir menggunakan torka yang berlawanan τ_w sesuai dengan sudut rotasi θ . Torka ini dapat ditulis

$$\tau_w = k\theta$$

Dimana k adalah konstanta karakteristik dari kawat. Pada kesetimbangan, gulungan bersandar pada sudut dimana τ_w sama dengan τ_m . Selanjutnya, dari persamaan 18.7 kondisi dari kesetimbangan tersebut adalah

$$k\theta = nBIA$$

atau

$$I = \frac{k\theta}{nBA}$$

Lalu arus di dalam galvanometer ditentukan dengan mengukur sudut rotasi pada gulungan. dengan menggunakan kawat tertutup yang sangat baik, seperti sebuah alat yang akan memberikan pembelokan yang dapat diukur dengan sebuah arus $10^{-6} A$.

Sebuah *ammeter* merupakan perangkat yang mudah dibawa untuk mengukur arus. Perangkat tersebut mengoperasikan dengan prinsip yang sama dengan galvanometer dengan pengecualian gulungannya dinaikkan di atas sebuah pasak yang berputar dan torka pembaliknya digunakan ke gulungan dengan pengertian adalah sumber spiral, seperti yang ditunjukkan pada gambar 18.20. Ketika ada sebuah arus di gulungan, gulungan tersebut berputar sampai torka magnetic sama dengan torka pembalik yang dihasilkan oleh sumber. Sebuah jarum dipasang ke gulungan menunjukkan derajat rotasi..

Arus pada rangkaian diukur dengan menghubungkan sebuah ammeter secara seri dengan rangkaian (gambar 18.21). Untuk mencegah berubahnya rangkaian, hambatan pada ammeter harus kecil.

Sebuah *voltmeter* merupakan perangkat untuk mengukur beda potensial antara dua buah titik. Perangkat tersebut terdiri dari sebuah ammeter yang dirangkai seri dengan hambatan besar R_v , yang ditunjukkan pada gambar 18.21. Potensial V berseberangan dengan hambatan R_1 pada gambar 18.21 yang diukur dengan menghubungkan voltmeter paralel dengan R_1 . Bila R_v lebih besar daripada R_1 , voltmeter tidak akan berarti banyak untuk mengubah arus di R_1 . Adapun bila menjadi arus kecil

$$I' = \frac{V}{R_v}$$

Melalui voltmeter, yang menyebabkan meteran dibelokkan. Semenjak I' sebanding dengan V , pembelokkan meteran sesuai dengan V .

Gaya pada sebuah muatan bergerak

Sebuah gaya magnetic digunakan oleh partikel bermuatan yang ebrgerak di medan magnet. Buktinya, gaya magnetic pada kawat arus pembawa benar-benar merupakan jumlah gaya-gaya magnetic pada muatan-muatan yang berjejal di kawat. Gaya magnetic pada partikel bermuatan tunggal dapat ditemukan dari persamaan 18.5 dengan mengingat arus rata-rata pada sebuah partikel yang muatannya q bergerak dengan kecepatan v sudut yang tepat terhadap sebuah medan magnet seragam (gambar 18.22). Partikel menempuh jarak l dari titik A ke titik B dalam waktu

$$t = \frac{l}{v}$$

Maka arus rata-rata antara A dan B adalah berdasarkan waktu ini adalah

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q}{l/v} = \frac{qv}{l}$$

Namun dari persamaan 18.5 gaya magnetic pada arus ini berdasarkan waktu ini adalah

$$F_m = BIl = B \frac{qv}{l} l$$

Maka gaya pada medan magnet yang menggunakan sebuah muatan bergerak adalah

$$F_m = Bqv \quad 18.8$$

Seperti gaya magnet pada sebuah arusgaya ini tegak lurus terhadap baik medan magnet maupun arh pergerakan partikel.

Hal itu dijumpai pada bagian 5.1 bahwa kerja dilakukan oleh gaya \mathbf{F} pada sebuah objek yang bergerak adalah $F_x d$, dimana F_x adalah besar komponen \mathbf{F} yang sejajar dengan arah pergerakan objek dan d adalah jarak tempuh objek bergerak. Semenjak medan magnet selalu tegak lurus terhadap arah pergerakan partikel bermuatan,

komponennya yang sejajar dengan arah geraknya adalah nol dan sebagai akibat gaya magnetic tidak bekerja pada partikel. Selanjutnya sesuai dengan teorema kerja-energi (bagian 5.2), medan magnet tidak bias mengubah kecepatan partikel, walaupun bias mengubah arah gerak partikel.

Medan magnet digunakan dalam berbagai peralatan untuk mengubah dan mengendalikan arah sorotan partikel bermuatan. Sebagai contoh, sorotan electron pada lampu pesawat TV dipindahkan sepanjang layar oleh medan magnet. Sebuah pesawat TV berbeda dalam mengenai hal ini dari lampu sinar katoda, yang menggunakan medan listrik untuk membelokkan electron. (bagian 16.5). Dengan kesamaan, electron dihamburkan oleh bahan percobaan pada mikroskop electron yang fokusnya dari medan magnet di atas layar berpijar. Penglihatan pada mikroskop electron sama dengan lampu mikroskop kecuali lensa magnetiknya, dalam bentuk gulungan arus pembawa, yang malahan digunakan lensa kaca.

Spektrometer massa merupakan perangkat yang mengukur massa individual atom dan molekul, juga menggunakan medan magnet untuk membelokkan sorotan partikel bermuatan. Sebuah sample dari material yang dianalisis ditempatkan pada sebuah bilik C pada spectrometer (gambar 18.23), Dimana sebuah arus listrik membentuk ion-ionnya dengan mengosongkan electron keluar dari beberapa atom sample. Hal ini ion-ion muatan nyata-nyata kemudian di percepat ke plat P , yang dipertahankan pada sebuah potensial besar negative $-V = V_p - V_c$ dengan acuan C. Seandainya tiap-tiap atom tersebut hanya kehilangan satu electron, maka muatan pada sebuah adalah $q = + e$. Lalu, apabila energi kinetic K_c sebuah ion mendekati nol ketika meninggalkan bilik, Energi kinetiknya K_p ketika tiba di P adalah

$$\begin{aligned} K_p &= K_c + e(V_c - V_p) \\ &= eV \end{aligned}$$

Namun, dengan definisi, $K_p = \frac{1}{2}mv^2$, maka kita memiliki

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

Dimana m adalah adalah massa ion dan v adalah kecepatan ion ketika mencapai P adalah

$$v^2 = \frac{2eV}{m} \quad 18.9$$

Beberapa ion mencapai P melewati sebuah celah ke dalam daerah yang ada sebuah medan magnet konstan B yang tegak lurus terhadap arah pergerakan ion. Medan ini, yang arahnya keluar dari bidang pada diagram di gambar 18.23 menggunakan gaya magnet yang besarnya

$$F_m = Bqv = Bev \quad 18.10$$

Pada tiap ion. Semenjak gaya ini selalu tegak lurus terhadap arah gerak ion, ion bergerak dalam sebuah lintasan melingkar berjari-jari r dengan sebuah kecepatan konstan v . Sebagai akibatnya, ion memiliki sebuah percepatan sentripetal

$$a = \frac{v^2}{r} \quad 18.11$$

Dari hukum II Newton (Properti 7, bagian 4.3)

$$F = ma$$

Kita melihat bahwa persamaan 18.10 dan 18.11 dihubungkan dengan

$$Bev = m \frac{v^2}{r}$$

Selanjutnya massa ion dihubungkan dengan kecepatan dan jari-jari dengan

$$m = \frac{Ber}{v}$$

Kuadratkan kedua ruas ungkapan ini memberikan

$$m^2 = \frac{B^2 e^2 r^2}{v^2}$$

Kemudian gunakan persamaan 18.9 untuk menempatkan kembali v^2 dengan , kita memperoleh

$$m^2 = \frac{B^2 e^2 r^2}{2eV/m} = \frac{B^2 r^2 em}{2V}$$

Atau

$$m = \frac{B^2 e r^2}{2V} \quad 18.12$$

Persamaan 18.12 memberikan massa m pada sebuah ion dalam pengakhiran potensial V , medan magnet B , dan jari-jari r pada orbit ion. Jari—jari dapat diperoleh dengan mengukur posisi bintik-bintik yang dibuat oleh ion ketika menumbuk sebuah plat fotografis. Walaupun V dan B tidak diketahui, persamaan 18.12 memperkenankan massa satu ion diukur relative dengan yang lainnya.

Sebagai contoh, anggap bahwa massa pada spectrometer ion karbon bergerak dalam sebuah lingkaran berjari-jari $r_c = 9,0\text{cm}$, dan ion oksigen bergerak di dalam lingkaran berjari-jari $r_o = 10,4\text{cm}$. Lalu bila V dan B adalah sama di kedua kasus, kita memiliki

$$\frac{m_o}{m_c} = \frac{r_o^2}{r_c^2} = \frac{10,4^2}{9,0^2} = 1,33$$

Maka massa sebuah ion oksigen adalah 1,33 kali massa sebuah ion karbon. Semenjak massa karbon disebutkan menjadi tepat 12 u, massa oksigen adalah

$$m_o = 1,33m_c = 1,33 \cdot 12u$$

$$m_o = 16u$$

Diketuainya V dan B hanya dibutuhkan bila kita ingin menghubungkan satuan massa atomic ke dalam kilogram.

Massa semua atom sudah ditentukan dengan akurasi tinggi dengan spectrometer. Dalam penjumlahan, perangkat digunakan untuk mendeteksi kuantitas menitan sebuah zat pada materi sample. Spektrometer menghasilkan sebuah rentetan bintik-bintik pada sebuah plat fotografis, tiap-tiap yang berkesesuaian terhadap sebuah atom atau molekul dari massa spesifik. Semenjak hanya sedikit atom yang dibutuhkan untuk menghasilkan bintik yang dapat dideteksi, kehadiran jumlah jejak sebuah zat yang massanya diketahui siap dideteksi.

18.5. Induksi Magnetik

Penemuan Oersted mengenai kelistrikmagnetan tidak hanya menginisiatifkan praktikum pertama yang menggunakan kelistrikan (telegarfi) tetapi juga membangkitkan sebuah hubungan besar penelitian ilmu pengetahuan ke dalam gejala listrik dan magnetic. Michael Faraday (1791 – 1867), satu dari ilmuwan besar di abad ke-19, memulai penyelidikan

listrikmagnetnya segera setelah mempelajari kerja Oersted. Faraday beralasan jikalau sebuah arus listrik menghasilkan sebuah medan magnet, lalu medan magnet itu entah bagaimana bisa menghasilkan arus listrik. Ia memasang suatu percobaan satu susunan kawat dan magnet secara sistematis setelah yang lainnya sampai, pada 1831, ia menemukan efek untuk yang telah dia selidik.

Faraday menemukan *induksi magnet*, kreasi sebuah medan listrik oleh sebuah medan magnet. Induksi magnetic berkedudukan dengan kelistrikmagnetan sebagai salah satu prinsip penting dari dasar teknologi kita. Sebaliknya kelistrikmagnetan memberikan maksud dengan jalan mana energi listrik dapat dikonversi ke dalam usaha mekanik, induksi magnetic memberikan maksud dengan jalan mana usaha mekanik dikonversi ke dalam energi listrik. Semua kekuatan listrik kita datang dari generator yang beroperasi pada prinsip induksi magnetic.

Induksi magnetic dapat dimengerti dengan baik oleh sebuah peragaan salah satu percobaan Faraday yang pertama dengan induksi. Sebuah gulungan kawat dihubungkan dengan galvanometer sensitive, seperti yang ditunjukkan gambar 18.24. Sebagai magnet yang bergerak menjauhi gulungan, galvanometer dibelokkan, yang menandakan kehadiran sebuah arus di gulungan. Besarnya arus bergantung dengan kecepatan magnet itu bergerak, dan arus berhenti sewaktu-waktu magnet beristirahat. Itulah, magnet yang beristirahat di dekat gulungan tidak membangkitkan sebuah arus. Sebagai magnet yang bergerak menjauhi gulungan, galvanometer dibelokkan dalam arah yang berlawanan, yang menandakan bahwa arah arus dibalikkan.

Arus pada koil merupakan akibat dari medan listrik yang dihasilkan oleh medan magnet berpindah pada magnet. Sebuah arus juga dihasilkan ketika gulungan bergerak menghadap magnet, daripada magnet yang bergerak menghadap gulungan, semenjak merupakan gerak relative dengan salah satu acuan terhadap yang lainnya sebagai tanggungan untuk medan listrik. Sebuah medan listrik selalu dihasilkan oleh medan magnet berpindah, jikalau tidak ada gulungan yang hadir dimana dapat memproduksi arus.

Sebuah perhitungan terperinci teori induksi magnetic diluar jangkauan buku ini, tetapi kita akan membicarakan beberapa dampak terpentingnya.

Generator Listrik

Pada bagian 17.1 kita membicarakan bagaimana arus listrik dapat dibangkitkan dengan cara induksi listrik (bagian 16.2). Semua kelistrikan komersial, bagaimanapun, dibangkitkan dengan cara induksi magnet. Sebuah pembangkit induksi magnet, atau pembangkit *listrik*, identik dengan motor ac yang ditunjukkan pada gambar 18.17. Ketika alat ini digunakan sebagai motor, sumber arus bolak-balik luar dihubungkan ke gulungan oleh kol. Pergonta-gantian arus menyebabkan pengkutuban pada listrik magnet untuk membalikkan dengan cara bahwa gaya-gaya digunakan pada listrikmagnet dengan magnet C menjaga angker magnet berputar pada kecepatan konstan.

Ketika alat pada gambar 18.17 digunakan sebagai pembangkit, angker magnet digunakan oleh sumber daya luar, biasanya turbin uap. Gerakan gulungan di luar maupun di dalam medan magnet pada magnet C membangkitkan sebuah arus di luar rangkaian. Setiap saat angker magnet membuat setengah perubahan, gulungan membalikkan tujuannya mengacu ke medan magnet. Pembalikan arah arus ini, dengan begitu sebagaimana angker magnet diputar, sebuah arus bolak-balik dibangkitkan. Selanjutnya, bila angker magnet diputar pada kecepatan konstan, arus akan beragam secara liku-liku dengan waktu (gambar 17.11).

Sebagai sumber daya listrik yang terdiri dari sebuah pembangkit uap, sebuah turbin uap, dan sebuah pembangkit listrik (gambar 20.6). Uap dihasilkan dari salah satu bahan bakar fosil (batubara atau minyak bumi) atau dari sebuah reactor nuklir (bagian 20.3). Uap dimaksudkan yang karenanya energi bahan bakar, apakah fosil atau nuklir yang dikonversikan ke dalam energi mekanik turbin. Turbin mengendalikan angker magnet pembangkit listrik, yang mengkonversikan energi mekanik turbin ke dalam energi listrik. Demikian, kecuali untuk bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan uap, konvensional dan sumber daya nuklir identik dengan caranya membangkitkan kelistrikan.

Gelombang elektromagnetik

Konsep medan listrik dan medan magnet telah dikembangkan oleh Faraday sebagai penggambaran cara melihat gejala elektromagnetik. Konsep medan tidak biasanya digunakan oleh ahli fisika lainnya, bagaimanapun, sampai Maxwell menunjukkan

bagaimana semua dasar hukum kelistrikan dan kemagnetan dapat digambarkan oleh empat persamaan yang mencakup medan listrik dan medan magnet. Diketahui sebagai *persamaan Maxwell*, itu adalah titik permulaan untuk semua pembicaraan kelistrikmagnetan modern.

Sebagai rumus asal, tiap persamaan Maxwell merupakan banyaknya gambaran satu dari empat hukum berikut:

1. Muatan listrik menghasilkan medan magnet (Hukum Coulomb, bagian 16.2).
2. Kutub-kutub magnet yang terisolasi tidak akan bertahan (bagian 18.1).
3. Arus menghasilkan medan magnet (kelistrikmagnetan, bagian 18.3).
4. Sebuah perubahan medan magnet menghasilkan sebuah medan listrik (induksi magnet, bagian 16.2).

Maxwell segera menyadari bagaimanapun, bahwa persamaan ini tidak tetap dengan asas hukum lainnya:

- 5 Muatan total pada suatu system yang terisolasi tidak dapat diubah (kekekalan muatan, bagian 16.2).

Maxwell dapat mengatasi ketidaktetapan ini hanya dengan masih beranggapan dengan hukum yang lainnya:

- 6 Sebuah perubahan medan listrik menghasilkan sebuah medan magnet.

Hukum ini, yang merupakan penyeimbang induksi magnet, memodifikasi salah satu persamaan Maxwell dengan cara bahwa itu telah tetap dengan kekekalan muatan.

Meskipun efek dari perubahan medan listrik terlalu kecil diamati secara langsung, dampaknya sangat besar. Jikalau perubahan medan listrik sebuah medan magnet dan sebuah perubahan medan magnet menghasilkan sebuah medan listrik, lalu dengan kemungkinan ada bahwa gangguan kekalnya pada medan listrik dan medan magnet mungkin dihasilkan. Maxwell menunjukkan bahwa gangguan elektromagnetik seperti itu akan bertingkah sebagai gelombang yang menyebar melalui ruang dengan kecepatan

$$v = \sqrt{\frac{4\pi k}{\mu_0}}$$

Dimana $K = 9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ = listrik konstan

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N.s}^2/\text{C}^2$ = permeabilitas magnetic

Dengan harga konstanta tersebut, kecepatan

$$\begin{aligned}v &= \sqrt{\frac{4\pi(9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2 / \text{C}^2}} \\ &= \sqrt{9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 / \text{s}^2} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Yang identik dengan kecepatan cahaya

Pada sebuah gelombang elektromagnetik, merupakan medannya sendiri, lebih daripada beratnya sebuah medium, yang menyebar melalui ruang. Gambar 18.25 menunjukkan bahwa medan magnet dan medan listrik bervariasi dalam gelombang elektromagnetik. Kedua medan tegak lurus terhadap arah penyebaran, maka gelombangnya transversal

Sebagai hasil dari kerja Maxwell, segera menjadi pendirian bahwa cahaya benar-benar merupakan bentuk radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu. Kemudian abad penelitian ke dalam gejala listrik dan magnet memimpin secara tak terduga pada penemuan sifat cahaya sebenarnya. Penemuan ini merupakan satu dari keberhasilan fisika abad ke-19.

Biomagnetisasi

Kita telah melihat jauh buku ini bahwa beberapa hewan dapat mendeteksi sebuah ragam rangsangan fisik tak lazim, contohnya, bunyi ultrasonic, arus electron, dan pengkutuban cahaya. Hal itu kelihatannya pantas untuk diperkirakan, oleh karena itu, bahwa beberapa hewan dapat mendetek sebuah medan magnet. Hal ini menjadi lebih sama kemungkinan bear ketika kita mengingat bahwa medan magnet bumi telah ada sepanjang sejarah evolusinya dan memberi sebuah kepercayaan yang dimaksudkan dengan arah yang ditentukan. Demikianlah akan menjadi keuntungan besar terhadap migrasi burung supaya dapat mendetek medan ini.

Beberapa percobaan pada burung kelihatannya berindikasi bahwa mereka memiliki kemampuan untuk menentukan sendiri tujuan mereka dengan mengacu pada medan magnet. Pada satu percobaan dari percobaan ini [Wiltschko (1972)], burung yang bermigrasi dapat ditangkap dan dikurung dalam sangkar. Di sangkar burung-burung rata-rata masih berkecenderungan untuk mengarahkan mereka sendiri pada arah terbang migrasinya, namun ketika gulungan besar ditempatkan pada salah satu sisi sangkar untuk

mengubah arah medan magnet di sangkar, burung-burung tersebut mengubah arah tujuan rata-ratanya.

Mengilhami percobaan seperti ini, bagaimanapun, keberadaan pengindera magnetic tidak dapat ditentukan sampai dasar fisiologis untuk indera ditemukan. Sejauh yang kita ketahui, pada burung tidak terdapat materi ferromagnetic yang dapat dipengaruhi oleh medan magnet bumi. Oleh karena induksi magnet kelihatannya menjadi mekanisme yang pantas saja untuk sebuah penginderaan magnetic. Satu akibat dari induksi yang beda potensialnya V dibentuk pada banyak dua buah titik pada sebuah objek yang bergerak melalui medan magnet. Pada kasus khusus yang medannya \mathbf{B} , kelajuan objek \mathbf{v} , dan jarak l antara titik-titik yang semuanya saling tegak lurus satu sama lain (gambar 18.26), beda potensialnya adalah

$$V = Bvl$$

Sebagai contoh, anggap sebuah burung terbang dengan kecepatan 10 m/s tegak lurus terhadap sebuah medan magnet 0,4 G. Bila lebar kepala burung 2 cm, potensial yang melintasnya adalah

$$\begin{aligned} V &= (0,4 \cdot 10^{-4} T)(10 m/s)(2 \cdot 10^{-2} m) \\ &= 8 \cdot 10^{-6} V \end{aligned}$$

Meskipun hal ini merupakan sebuah beda potensial yang sangat kecil sekali, ikan listrik lemah (bagian 17.5) dapat mendeteksi segenap potensial kecil. Pada ikan ini, sel yang terspesialisasi untuk fungsi ini telah teridentifikasi, sedangkan tidak satupun sel yang sama dengan yang ditemukan pada burung.

Oleh karena itu, jikalau seekor burung yang terbang dapat mendeteksi sebuah medan magnet, tidak dapat menjelaskan percobaan dengan burung di sangkar, yang rupanya tidak bergerak cukup cepat untuk membangkitkan sebagaimana sebuah medan magnet besar.

Tiada gunanya mengatakansubjek biomagnetisme masih memiliki pertanyaan daripada jawaban. Banyak penelitian yang dibutuhkan sebelum sifat atau segenap keberadaan penginderaan magnetic tak dapat dipungkiri bisa dinyatakan ada.