

Bab 6

GGL INDUKSI dan INDUKTANSI

Pada bab-bab terdahulu kita sudah pelajari bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet di sekitarnya. Fenomena ini memiliki makna bahwa kemagnetan dapat dihasilkan oleh peristiwa kelistrikan. Pertanyaan menarik berikutnya adalah apakah fenomena sebaliknya dapat terjadi? Apakah kelistrikan dapat dihasilkan oleh peristiwa kemagnetan? Topik ini yang akan kita bahas pada bab ini. Dan ternyata kelistrikan dapat dihasilkan oleh peristiwa kemagnetan.

6.1 Fluks magnetik

Sebelum kita masuk ke topik inti bagaimana peristiwa kemagnetan dapat menghasilkan kelistrikan, mari kita bahas terlebih dahulu besaran yang terkait dengan proses produksi kelistrikan dari kemagnetan. Kita mulai dengan definisi fluks magnetik. Jika dalam suatu ruang terdapat medan magnet maka jumlah garis gaya yang menembus permukaan dengan luas tertentu bisa berbeda-beda, tergantung pada kuat medan magnet dan sudut antara medan magnet dengan vektor luas permukaan. Fluks magnetik mengukur jumlah garis gaya yang menembus suatu permukaan secara tegak lurus. Dengan merujuk pada **Gambar 6.1**, fluks magnetik didefinisikan sebagai

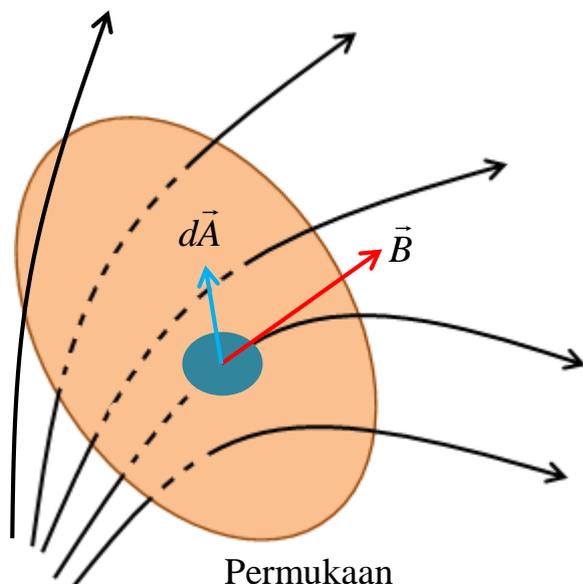
$$\begin{aligned}\phi &= \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \\ &= \int B dA \cos\theta\end{aligned}\tag{6.1}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

dengan

θ adalah sudut antara vektor \vec{B} dan $d\vec{A}$.

Dari definisi tersebut menjadi jelas bahwa integral dapat dilakukan jika sudut antara medan dan vector luas permukaan diketahui di semua titik di permukaan (diketahui sebagai fungsi koordinat pada permukaan). Secara umum, sudut tersebut bergantung pada posisi (tidak konstan).



Gambar 6.1 Fluks magnetik menyatakan jumlah garis gaya yang menembus permukaan dalam arah tegak lurus

Untuk kasus yang khusus di mana pada tiap titik di permukaan besarnya medan magnet konstan maka kita dapat menyederhakan persamaan (6.1) menjadi

$$\phi = B \int dA \cos \theta \quad (6.2)$$

Untuk kasus lebih khusus lagi, yaitu jika pada permukaan sudut antara \vec{B} dan $d\vec{A}$ selalu konstan maka $\cos \theta$ dapat dikeluarkan dari integral dan persamaan (6.2) menjadi

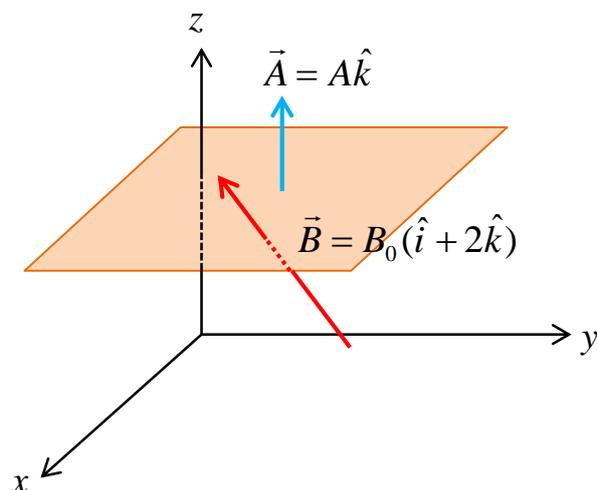
$$\begin{aligned} \phi &= B \cos \theta \int dA = B \cos \theta A \\ &= \vec{B} \cdot \vec{A} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Jelas dari pembahasan di atas bahwa perhitungan fluks magnetic tidak selalu mudah. Perhitungan akan cukup sulit jika baik medan magnet maupun sudut antara medan dan vector permukaan bergantung pada koordinat posisi pada permukaan. Kadang integral langsung tidak dapat dilakukan. Proses integral secara numeric merupakan langkah yang harus dilakukan.

Contoh 6.1

Medan magnet $\vec{B} = B_0(\hat{i} + 2\hat{k})$ menembus bidang seluas A yang diletakkan sejajar bidang x - y seperti diilustrasikan pada **Gambar 6.2**. Berapa fluks magnetik yang menembus bidang tersebut?



Gambar 6.2 Gambar untuk Contoh 6.1

Jawab

Diberikan $\vec{B} = B_0(\hat{i} + 2\hat{k})$. Karena permukaan sejajar bidang x - y maka $\vec{A} = A\hat{k}$ (ingat, arah vektor permukaan tegak lurus permukaan tersebut). Karena baik \vec{B} dan \vec{A} semuanya konstan maka kita dapat langsung menulis

$$\begin{aligned}\phi &= \vec{B} \cdot \vec{A} \\ &= B_0(\hat{i} + 2\hat{k}) \cdot A\hat{k}\end{aligned}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\begin{aligned} &= B_o A \hat{i} \cdot \hat{k} + 2B_o A \hat{k} \cdot \hat{k} \\ &= 0 + 2B_o A = 2B_o A \end{aligned}$$

Contoh 6.2

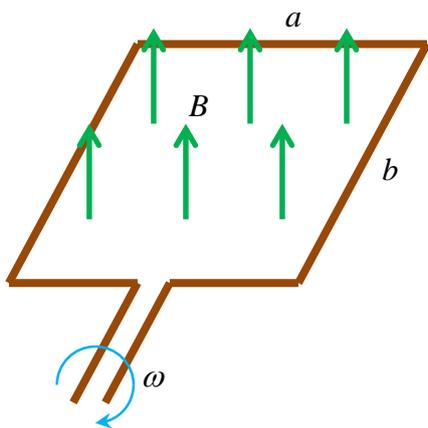
Lilitan kawat berbentuk persegi panjang dengan sisi-sisi a dan b diputar dalam medan magnet konstan yang arahnya vertikal. Sumbu rotasi lilitan tegak lurus medan magnet. Lilitan tersebut berputar dengan kecepatan sudut ω . Berapa fluks magnetik yang menembus lilitan sebagai fungsi waktu?

Jawab

Gambar 6.3 adalah ilustrasi dari soal yang diberikan. Karena lilitan selalu berotasi maka luas penampang lilitan yang ditembus medan magnet selalu berubah-ubah (sebagai fungsi waktu). Fluks magnetik yang menembus lilitan dapat juga ditulis

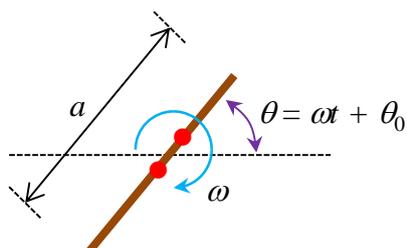
$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B A_{\perp}$$

dengan A_{\perp} adalah luas permukaan yang tegak lurus medan magnet.



Gambar 6.3 Lilitan berbentuk persegi panjang yang diputar dalam medan magnet yang diberikan dalam Contoh 6.2

Mari kita lihat suatu saat ketika sudut yang dibentuk bidang lilitan dengan medan magnetik adalah θ seperti diilustrasikan pada **Gambar 6.4**.



Gambar 6.4 Sudut yang dibentuk lilitan dengan medan magnet tiap saat selalu berubah-ubah

Panjang sisi lilitan ke arah belakang yang tegak lurus medan magnet tetap b , sedangkan panjang ke arah kiri-kanan yang tegak lurus medan magnet adalah $a' = a \cos \theta = a \cos(\omega t + \theta_0)$. Dengan demikian, luas penampang lilitan yang tegak lurus medan magnet adalah

$$\begin{aligned} A_{\perp} &= a'b \\ &= ab \cos(\omega t + \theta_0) \end{aligned}$$

di mana θ_0 adalah sudut awal (sudut yang dibentuk saat $t = 0$). Fluks magnetik sebagai fungsi waktu menjadi

$$\begin{aligned} \phi &= B A_{\perp} \\ &= B ab \cos(\omega t + \theta_0) \end{aligned}$$

Fluks magnetic pada permukaan tertutup

Pertanyaan menarik adalah, berapa fluks magnetic jika permukaan yang ditembus merupakan permukaan tertutup? Dengan menggunakan persamaan (6.1) maka fluks pada satu permukaan tertutup dapat ditulis menjadi

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Bandingkan persamaan di atas dengan hukum Gauss yang dipelajari pada Bab 3, yaitu

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

Hukum Gauss ini menyatakan bahwa integral perkalian medan dan elemen luas permukaan pada satu permukaan tertutup berbanding lurus dengan jumlah muatan listrik yang dikandung permukaan tersebut. Dengan argumen yang sama kita dapat menyatakan bahwa integral perkalian medan magnet dengan elemen luas pada suatu permukaan tertutup berbanding lurus dengan muatan magnet yang dilingkupi permukaan tersebut. Namun, karena muatan magnet tidak ada (tidak ada monopol magnet) maka jumlah muatan magnet yang dikandung permukaan tertutup apa pun selalu nol. Dengan demikian kita simpulkan

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Jadi, fluks magnet pada satu permukaan tertutup selalu nol.

Hipotesis muatan magnet. Karena keinginan menyetarakan sifat magnetic dengan sifat kelistrikan, ahli fisika Paul Dirac menghipotesiskan adanya muatan magnet atau (kutub magnet monopol) tahun 1931. Dengan hipotesis ini maka persamaan kelistrikan dan kemagnetan menjadi benar-benar mirip, yaitu

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{\sum q_e}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = \frac{\sum q_m}{(1/\mu_0)}$$

dengan

q_e adalah muatan listrik dan

q_m adalah muatan magnet.

Namun, hingga saat ini keberadaan muatan magnet atau kutub magnet terisolasi belum dideteksi. Memang ada sejumlah usaha para ahli fisika untuk menemukan monopol magnetic. Tahun 1975, sebuah tim yang dipimpin oleh Buford Price menumumkan hasil

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

deteksi keberadaan monopol magnetik yang merambat bersama sinar kosmik. Namun, pengumuman tersebut akhirnya ditarik kembali. Ahli astofisika Rusia, Igor Novikov, mengklaim bahwa medan yang dihasilkan oleh black hole besar kemungkinan dihasilkan oleh monopol magnet.

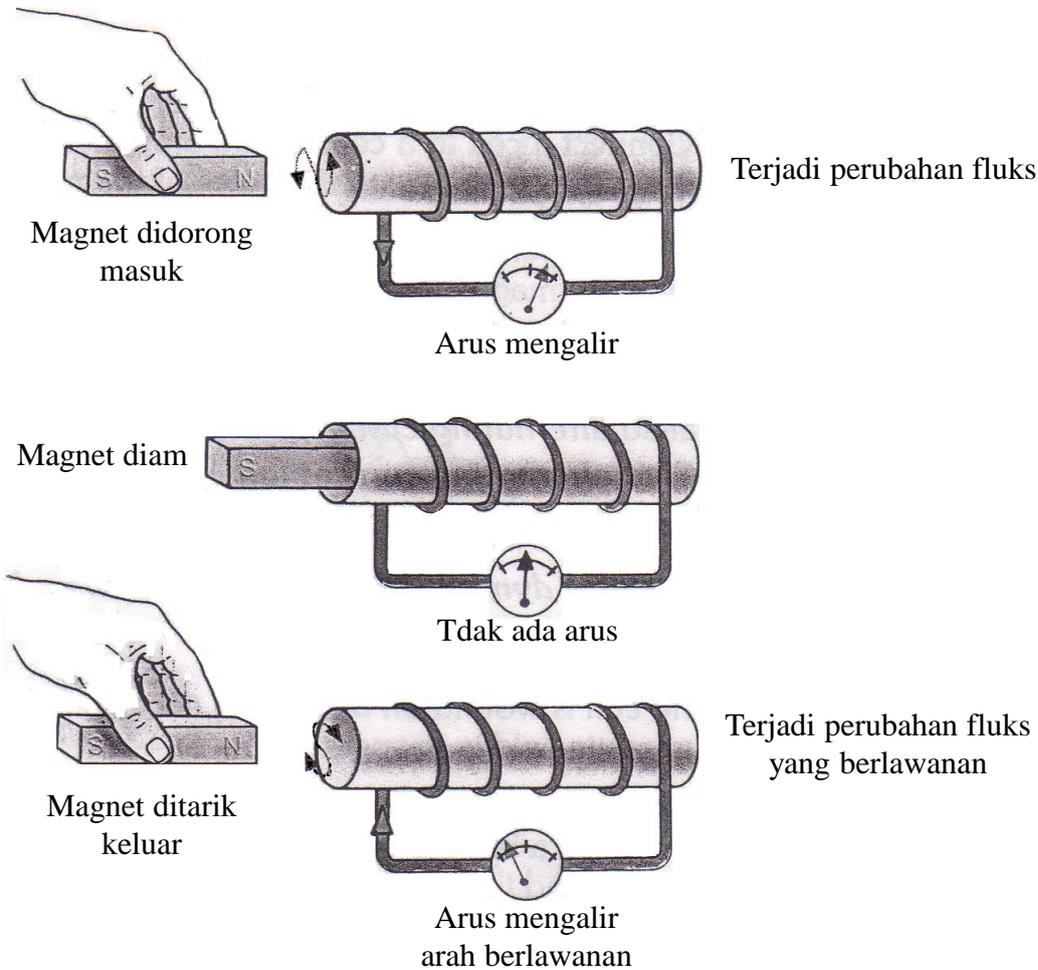
6.2 Hukum Faraday

Fenomena memproduksi kelistrikan dari peristiwa kemagnetan diterangkan oleh hukum Faraday. Hukum ini menyatakan bahwa apabila terjadi perubahan fluks dalam suatu kumparan konduktor (loop) maka dihasilkan gaya gerak listrik (tegangan listrik) induksi yang berbanding lurus dengan laju perubahan fluks.

Gambar 6.5 mengilustrasikan proses munculnya gaya gerak listrik akibat perubahan fluks magnetik. Sebuah batang magnet didorong/ditarik maju/mundur ke/dari suatu kumparan. Berdasarkan **Gambar 6.5** kita dapatkan informasi berikut ini

- a) Ketika batang magnet didorong mendekati kumparan maka kuat medan magnet yang ada dalam rongga kumparan bertambah. Akibatnya fluks magnetik yang dikandung kumparan bertambah yang mengakibatkan muncul ggl induksi. Ini direpresentasikan oleh adanya arus yang diukur oleh amperemeter.
- b) Ketika batang magnet dидiamkan maka tidak ada perubahan kuat medan dalam rongga kumparan, walaupun medan itu sendiri ada di dalam kumparan. Akibatnya fluks magnetik yang dikandung kumparan tidak berubah sehingga tidak ada ggl induksi yang muncul. Tidak ada arus yang diukur amperemeter.
- c) Ketika batang magnet ditarik keluar dari kumparan maka kuat medan magnet yang ada dalam rongga kumparan berkurang. Akibatnya fluks magnetik yang dikandung kumparan berkurang sehingga muncul ggl induksi. Ini direpresentasikan oleh adanya arus yang diukur oleh amperemeter.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.5 Fluks magnetik dalam kumparan diubah-ubah dengan mendekatkan atau menjauhkan magnet ke kumparan tersebut

Secara matematik, hukum Faraday dapat ditulis sebagai berikut

$$\Sigma = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (6.4)$$

dengan

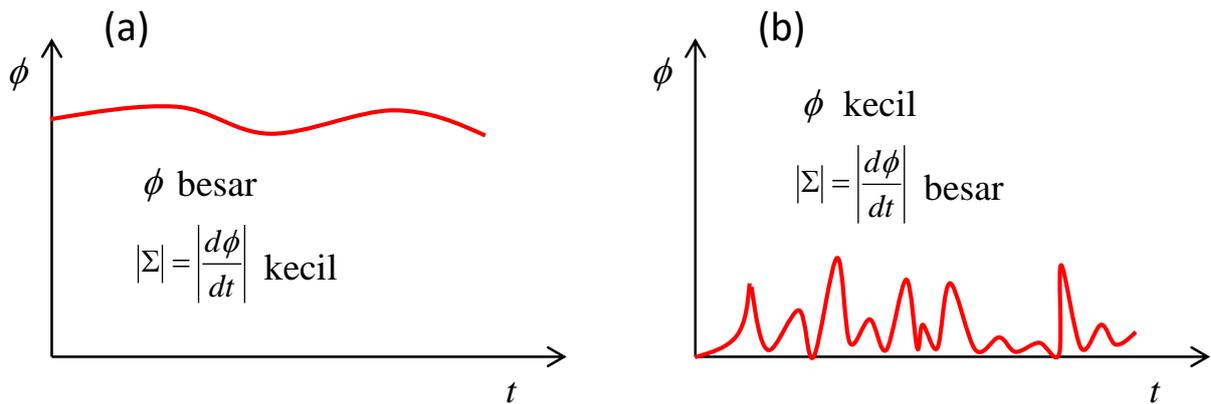
Σ sering disebut gaya gerak listrik (ggl) induksi (dalam bahasa Inggris disebut *electromotive force*)

N jumlah lilitan kumparan.

Tampak dari persamaan (6.4), besarnya ggl yang dihasilkan bergantung pada berapa cepat perubahan fluks berlangsung, bukan bergantung pada berapa nilai fluks saat itu. Walaupun fluks dalam suatu kumparan sangat

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

besar, namun jika tidak terjadi perubahan (nilai fluks tetap) maka tidak ada ggl induksi yang dihasilkan. Sebaliknya, walupun nilai fluks dalam suatu kumparan kecil, namun jika perubahannya mendadak (gradien fluks terhadap waktu sangat besar) maka ggl yang dihasilkan juga besar. Sebagai ilustrasi, perhatikan **Gambar 6.6**. Pada gambar (a) fluks memiliki nilai yang besar tetapi ggl yang dihasilkan kecil. Sebaliknya, pada gambar (b) fluks memiliki nilai yang kecil tetapi ggl yang dihasilkan besar.



Gambar 6.6 (a) fluks besar tetapi ggl kecil (karena fluks berubah lambat atau gradient kecil) dan (b) fluks kecil tetapi ggl besar (karena fluks berubah cepat atau gradient besar).

6.3 Contoh aplikasi hukum Faraday

Supaya lebih paham dengan hukum Faraday, mari kita lihat beberapa contoh aplikasi berikut ini. Pertama kita akan menentukan ggl induksi yang dihasilkan oleh kumparan yang berputar pada **Gambar 6.3** jika jumlah lilitan adalah N . Kita sudah menghitung bahwa jumlah fluks yang menembus kumparan adalah

$$\phi = Babc \cos(\omega t + \theta_0)$$

Dengan demikian, ggl induksi yang dihasilkan adalah

$$\begin{aligned} \Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N \frac{d[Babc \cos(\omega t + \theta_0)]}{dt} \end{aligned}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$= NBab\omega \sin(\omega t + \theta_0)$$

Berikutnya kita tinjau kasus sebuah kumparan berbentuk lingkaran dengan jari-jari a yang diletakkan pada bidang horizontal (bidang x - y). Medan magnet yang memiliki fungsi $\vec{B} = (B_0 + ct)\hat{k}$ menembus kumparan tersebut. Jumlah lilitan pada kumparan adalah N . Pada kasus ini luas permukaan $A = \pi a^2$. Karena kumparan diletakkan pada bidang x - y maka vector luas penampang kumparan mengarah ke sumbu z sehingga kita dapat menulis $\vec{A} = \pi a^2 \hat{k}$. Dengan demikian, fluks magnetik yang menembus kumparan adalah

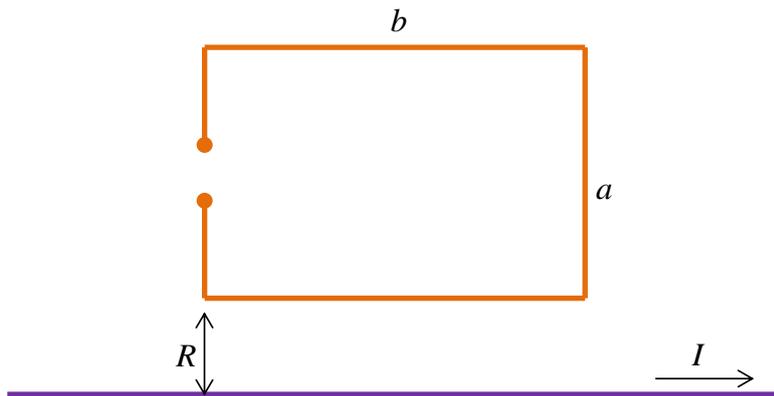
$$\begin{aligned}\phi &= \vec{B} \cdot \vec{A} \\ &= (B_0 + ct)\hat{k} \cdot \pi a^2 \hat{k} \\ &= \pi a^2 (B_0 + ct) \hat{k} \cdot \hat{k} \\ &= \pi a^2 (B_0 + ct)\end{aligned}$$

Ggl induksi yang dihasilkan adalah

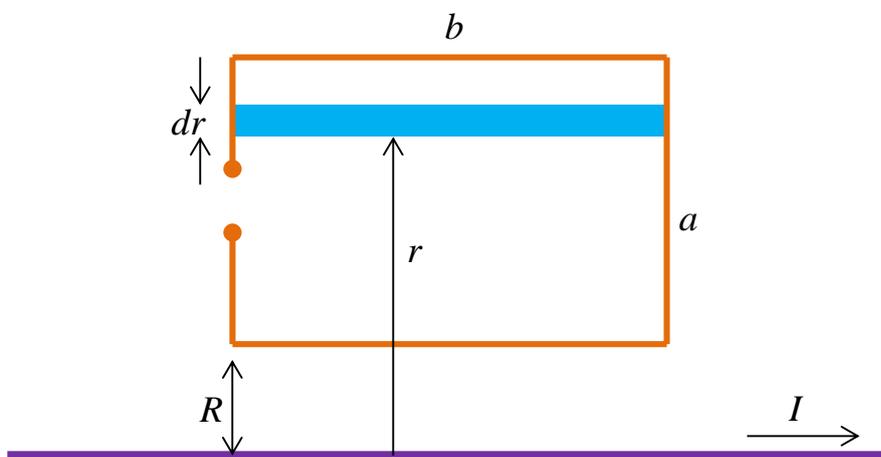
$$\begin{aligned}\Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N \frac{d[\pi a^2 (B_0 + ct)]}{dt} \\ &= -N\pi a^2 c\end{aligned}$$

Sebagai contoh ketika mari kita bahas sebuah kawat lurus panjang dilalui arus yang berubah-ubah terhadap waktu menurut fungsi $I = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$. Di sekitar kawat terdapat kumparan berbentuk segiempat dengan sisi-sisi a dan b seperti pada **Gambar 6.7**. Jumlah lilitan kumparan tersebut adalah N . Jarak dari sisi terdekat kumparan ke kawat adalah R .

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.7 Kumparan berbentuk segiempat yang berada di sisi kawat lurus panjang yang dialiri arus listrik.



Gambar 6.8 Menentukan fluks magnet yang dilingkupi kawat. Perhitungan harus dilakukan dengan cara integral.

Medan magnet di sekitar arus yang mengalir pada kawat lurus panjang adalah

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

Kuat medan magnet di dalam kumparan berubah-ubah bergantung pada jaraknya dari kawat. Dengan demikian fluks magnetik tidak dapat dicari dengan mengali langsung kuat medan dengan luas. Kita harus menggunakan metode integral untuk mencari fluks. Lihat elemen luas yang diarsir pada **Gambar. 6.8**. Luas elemen tersebut adalah

$$dA = b dr$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Dengan demikian, fluks magnetik pada elemen luas tersebut adalah

$$\begin{aligned}d\phi &= BdA \\ &= \frac{\mu_o}{2\pi} Ib \frac{dr}{r}\end{aligned}$$

Fluks magnetik total yang menembus kumparan dapat dicari dengan mengintegrasikan $d\phi$. Batas bawah integral adalah R dan batas atas adalah $R+a$. Jadi, fluks magnetik total adalah

$$\begin{aligned}\phi &= \int_R^{R+a} \frac{\mu_o}{2\pi} Ib \frac{dr}{r} \\ &= \frac{\mu_o}{2\pi} Ib \int_R^{R+a} \frac{dr}{r} \\ &= \frac{\mu_o}{2\pi} Ib [\ln r]_R^{R+a} \\ &= \frac{\mu_o}{2\pi} Ib [\ln(R+a) - \ln R] \\ &= \frac{\mu_o}{2\pi} Ib \ln \left[\frac{R+a}{R} \right]\end{aligned}$$

Akhirnya, ggl induksi yang dihasilkan kumparan adalah

$$\begin{aligned}\Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N \frac{\mu_o}{2\pi} b \ln \left[\frac{R+a}{R} \right] \frac{dI}{dt}\end{aligned}$$

Tetapi

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d[I_o \cos(\omega t + \varphi_o)]}{dt}$$

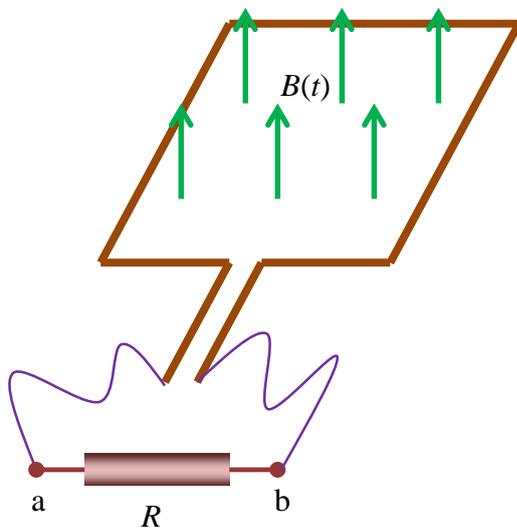
$$= -\omega I_o \sin(\omega t + \varphi_o)$$

sehingga kita dapatkan

$$\Sigma = N \frac{\mu_o}{2\pi} b \omega I_o \ln \left[\frac{R+a}{R} \right] \sin(\omega t + \varphi_o)$$

6.4 Hukum Lentz

Gambar 6.9 memperlihatkan medan magnet yang berubah-ubah besarnya menembus kumparan. Dengan demikian terjadi perubahan fluks dalam kumparan. Berdasarkan hukum Faraday dihasilkan ggl induksi Σ . Pertanyaan selanjutnya adalah ke manakah arah aliran arus dalam kumparan tersebut? Apakah arus melewati hambatan dari a ke b atau dari b ke a?



Gambar 6.9 Medan magnet yang berubah-ubah menembus sebuah kumparan. Ke manakah arah arus induksi yang dihasilkan?

Hukum Faraday hanya mengungkapkan besarnya ggl induksi yang dihasilkan ketika terjadi perubahan fluks magnetik dalam suatu loop. Tetapi ke mana arah arus induksi dalam loop tersebut tidak terungkap lebih detail dalam hukum tersebut. Arah arus induksi yang dihasilkan diungkapkan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

oleh hukum Lenz yang bunyinya sebagai berikut

Arah arus induksi dalam suatu kumparan adalah sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkan arus tersebut melawan perubahan fluks penyebabnya.

Apa makna pernyataan hukum ini?

- a) Jika fluks yang menyebabkan ggl makin lama makin membesar maka arah arus induksi harus sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkan arus induksi tersebut memperkecil fluks tersebut. Ini hanya mungkin jika arah medan magnet yang dihasilkan arus induksi berlawanan dengan arah medan yang diterapkan pada loop.
- b) Jika fluks yang menyebabkan ggl makin lama makin kecil maka arah arus induksi harus sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkan arus induksi tersebut memperbesar fluks tersebut. Ini hanya mungkin jika arah medan magnet yang dihasilkan arus induksi searah dengan arah medan yang diterapkan pada loop.

Untuk lebih jelas, mari kita kembali melihat persamaan (6.9).

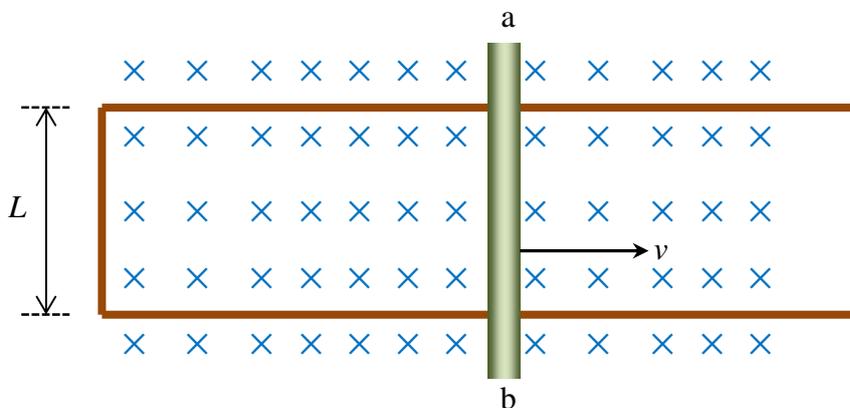
- a) Jika medan magnet yang menembus fluks nilainya sedang berubah dari kecil ke besar maka fluks dalam loop makin besar. Berdasarkan hukum Lenz, arah arus induksi harus memperkecil fluks ini. Ini terjadi jika arus induksi menghasilkan medan arah ke bawah. Agar dihasilkan medan ke arah bawah maka dengan menggunakan aturan tangan kanan, arah arus induksi harus searah putaran jarum jam. Atau pada hambatan, arus mengalir dari b ke a.
- b) Jika medan magnet yang menembus fluks nilainya sedang berubah dari besar ke kecil maka fluks dalam loop makin kecil. Berdasarkan hukum Lenz, arah arus induksi harus memperbesar fluks ini. Ini terjadi jika arus induksi menghasilkan medan arah ke atas (sama dengan arah medan yang diterapkan). Agar dihasilkan medan ke arah atas maka dengan menggunakan aturan tangan kanan, arah arus induksi harus berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Atau pada hambatan, arus mengalir dari a ke b.

Contoh 6.3

Pada **Gambar 6.10**, sebuah kawat berbentuk hutuf U diletakkan dalam medan magnet konstan dengan bidang kawat tegak lurus medan magnet B yang konstan. Sebuah batang ab diletakkan di atas kawat U

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

sehingga terjadi kontak listrik dengan dua kaki kawat U. Batang *ab* digerakkan ke kanan dengan laju tetap v . Jika hambatan total loop adalah R , berapa arus yang mengalir dalam loop dan ke manakah arah arus tersebut?



Gambar 6.10 Gambar untuk Contoh 6.3

Jawab

Untuk menentukan ggl yang dihasilkan, kita harus menentukan fluks terlebih dahulu. Misalkan suatu saat jarak batang **ab** ke ujung kiri kawat U adalah x . Maka luas loop adalah $A = Lx$. Karena arah medan magnet tegak lurus bidang loop maka fluks magnetik yang dilingkupi loop dapat langsung ditulis

$$\phi = BA$$

$$= BLx$$

Berdasarkan hukum Faraday, ggl yang dihasilkan adalah

$$\Sigma = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$= -N \frac{d(BLx)}{dt}$$

$$= -NBL \frac{dx}{dt}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Karena batang ab hanya satu, maka jumlah lilitan loop hanya satu, atau $N = 1$. Besaran dx/dt tidak lain daripada laju gerakan batang ab , atau $dx/dt = v$. Jadi, ggl yang dihasilkan adalah

$$\Sigma = -BLv$$

Arus induksi yang dihasilkan

$$\begin{aligned} I &= \frac{\Sigma}{R} \\ &= -\frac{BLv}{R} \end{aligned}$$

Ke mana arah arus induksi? Ketika batang **ab** digerakkan ke kanan maka luas loop makin besar. Akibatnya, fluks magnetik yang dihasilkan makin besar. Berdasarkan hukum Lenz, arah arus induksi yang dihasilkan harus melawan perubahan fluks tersebut. Jadi, arah arus induksi yang dihasilkan harus memperkecil fluks tersebut. Ini terjadi jika arah medan magnet yang dihasilkan arus induksi berlawanan dengan arah medan magnet yang ada. Atau arah medan magnet yang dihasilkan arus induksi harus dari belakang ke depan bidang kertas. Dengan aturan tangan kanan, maka agar medan yang dihasilkan berarah dari belakang ke depan bidang kertas, arah arus induksi harus berlawanan dengan arah perputaran jarum jam.

Contoh 6.4

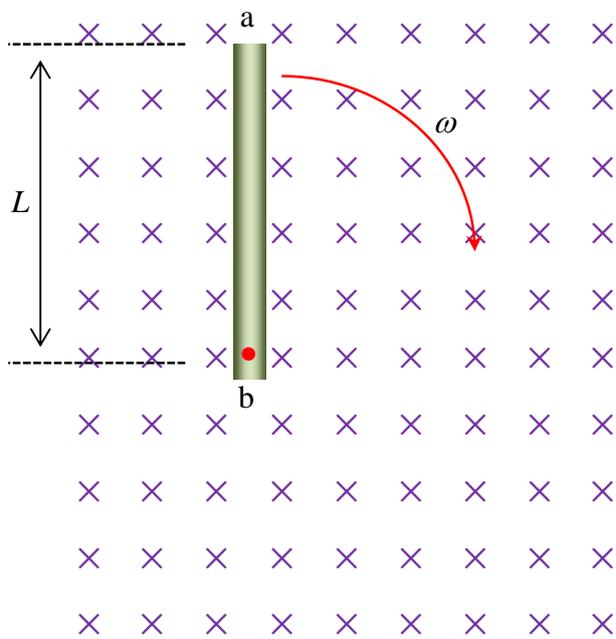
Sebuah batang **ab** yang panjangnya L berputar dalam medan magnet konstan B dengan kecepatan sudut tetap ω . Sumbu putar adalah salah satu ujung batang dan bidang putar tegak lurus medan magnet (**Gambar 6.11**). Berapakah tegangan antara ujung **a** dan **b** yang dihasilkan dan ujung manakah yang memiliki tegangan lebih tinggi?

Jawab

Untuk mencari ggl yang dihasilkan kita harus terlebih dahulu menentukan fluks. Ini tampak sulit karena kita hanya memiliki satu batang, bukan lintasan tertutup. Namun kita dapat mengakali dengan cara menghubungkan batang tersebut dengan sebuah lintasan yang hambatannya tak berhingga sehingga antara batang dan lintasan tambahan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

ini membentuk lintasan tertutup. Seperti pada Gambar 6.12, lintasan **acb** yang kita buat memiliki hambatan tak berhingga sehingga ada atau tidak adanya lintasan tersebut tidak berpengaruh pada arus yang dihasilkan (arus tetap nol).



Gambar 6.11 Gambar untuk Contoh 6.4

Kita tinjau suatu saat ketika batang **ab** telah berputar sejauh sudut θ . Luas loop saat ini adalah

$$A = \frac{\pi/2 - \theta}{2\pi} \times \pi L^2$$

$$= \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \frac{L^2}{2}$$

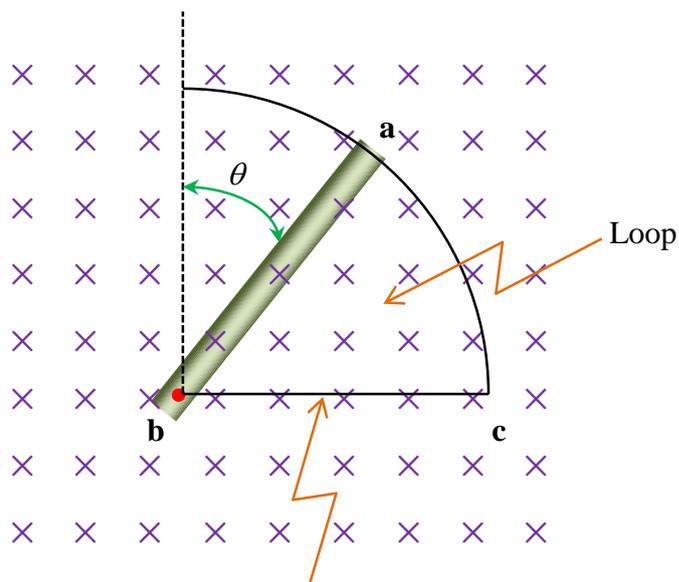
Fluks magnetik yang dilingkupi fluks suatu saat adalah

$$\phi = BA$$

$$= \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \frac{BL^2}{2}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$= \frac{\pi BL^2}{4} - \frac{BL^2}{2} \theta$$



Kawat dengan hambatan tak berhingga sebagai pelengkap loop tertutup

Gambar 6.12 Lintasan acb adalah lintasan virtual yang dibuat sehingga loop yang dihasilkan menjadi tertutup. Lintasan virtual tersebut dapat dianggap sebagai jalur dengan hambatan menuju tak berhingga sehingga tidak dialiri arus listrik.

Dengan menggunakan hukum Faraday maka ggl induksi yang dihasilkan adalah

$$\begin{aligned} \Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ &= -1 \times \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi BL^2}{4} - \frac{BL^2}{2} \theta \right) \\ &= -0 + \frac{BL^2}{2} \frac{d\theta}{dt} \end{aligned}$$

Tetapi, $d\theta/dt$ adalah kecepatan sudut putaran batang **ab**, yaitu ω . Jadi kita peroleh

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\Sigma = \frac{BL^2}{2} \omega$$

Ke mana arah arus induksi? Mari kita memisalkan lintasan **acb** yang kita tambahkan memiliki hambatan yang berhingga sehingga ada arus induksi dalam loop. Putaran batang **ab** menyebabkan luas loop berkurang sehingga fluks berkurang. Akibatnya, arus induksi harus memperbesar fluks dengan cara menghasilkan medan magnet yang searah dengan medan magnet yang telah ada. Ini hanya mungkin jika arah arus induksi searah dengan putaran jarum jam. Agar arus induksi searah dengan putaran jarum jam, maka batang **ab** harus memiliki kutub positif di **a** dan kutub negatif di **b**. Dengan demikian, jika lintasan tambahan **acb** tidak ada maka tidak ada arus yang mengalir, tetapi batang **ab** memiliki tegangan yang berbeda. Titik **a** memiliki tegangan yang lebih tinggi daripada titik **b**.

6.5 Dinamo

Kita sering menjumpai dinamo pada sepeda. Dinamo digunakan untuk mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Pada sepeda, energi listrik yang dihasilkan digunakan untuk menyalakan lampu sepeda. Dinamo terdiri dari sebuah kumparan yang bergerak dalam medan magnet tetap. Di bagian luar dinamo ada bagian yang dapat disentuh atau dilepaskan dari roda sepeda. Bagian tersebut berhubungan dengan kumparan di dalam dinamo. Ketika bagian ini disentuh ke roda sepeda maka bagian tersebut berputar mengikuti putaran roda sepeda sehingga kumparan di dalam dinamo berputar. Akibatnya, fluks yang dikandung kumparan berubah-ubah. Perubahan fluks tersebut menghasilkan ggl induksi yang pada akhirnya mengalirkan arus ke lampu. Dan lampu akhirnya menyala. Di siang hari kita melepaskan kontak dinamo dengan roda sepeda sehingga lampu tidak menyala pada siang hari.

Gambar 6.13(a) adalah contoh dynamo yang terpasang pada roda sepeda dan skema bagian dalam dynamo (b). Bagian utama dalam dynamo adalah sebuah kumparan pada posisi tetap dan sebuah magnet yang berputar bersama dengan berputarnya bagian yang menyentuh roda.

Bagaimana prinsip kerja dinamo? Lihat **Gambar 6.14**. Kumparan XYWX dapat berputar dalam medan magnet tetap. Panjang sisi-sisi kumparan adalah a dan b . Akibat perputaran maka luas penampang kumparan yang tegak lurus medan magnet berubah-ubah sehingga terjadi

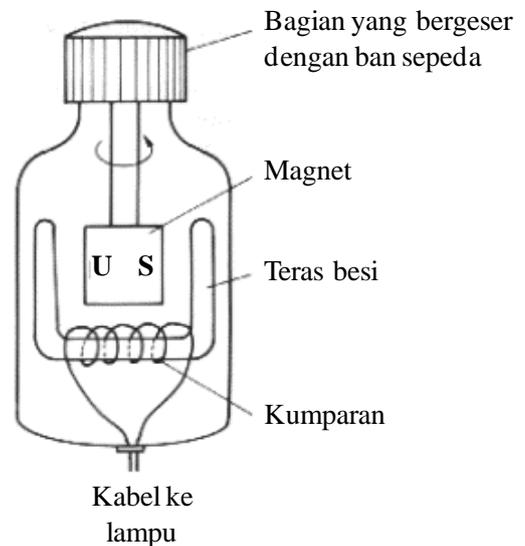
Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

perubahan fluks yang dikandung kumparan tersebut.

(a)



(b)



Gambar 6.13 (a) Contoh dynamo yang terpasang pada roda sepeda (amazon.com) dan (b) skema bagian dalam dynamo.

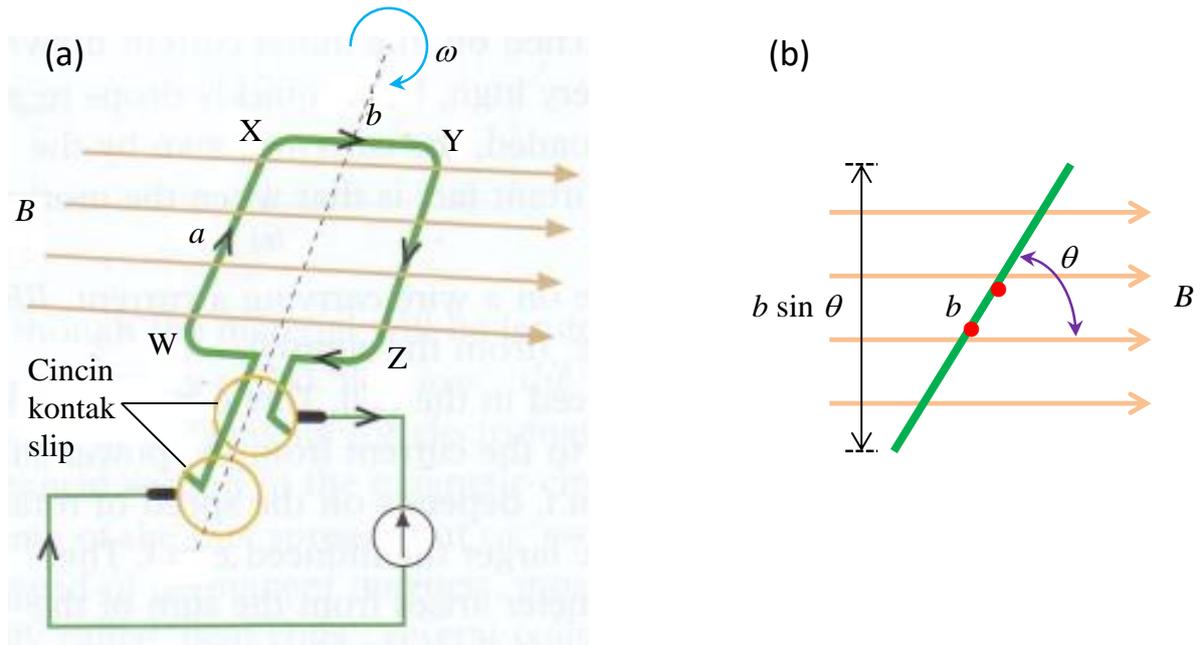
Luas kumparan adalah $A = ab$. Akibat perputaran kumparan, maka proyeksi luas kumparan dalam arah tegak lurus medan magnet hanya $A_{\perp} = ab \sin \theta$. Dengan demikian, fluks magnetik yang dikandung kumparan tiap saat adalah

$$\begin{aligned}\phi &= BA_{\perp} \\ &= Babsin \theta\end{aligned}$$

Andaikan kumparan berputar dengan kecepatan sudut tetap. Maka hubungan antara sudut dan kecepatan sudut memenuhi $\theta = \omega t$. Dengan demikian kita dapat menulis

$$\phi = Babsin \omega t$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.14 (a) Skema bagian dalam dynamo dan (b) kumparan dipandang dari arah depan saat membentuk sudut θ terhadap arah medan magnet. Akibat orientasi demikian maka luas penampang kumparan yang tegak lurus medan magnet berubah.

Jika jumlah lilitan pada kumparan dynamo adalah N maka ggl induksi yang dihasilkan kumparan dynamo menjadi

$$\begin{aligned}
 \Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\
 &= -N \frac{d(Bab \sin \omega t)}{dt} \\
 &= -NBab \frac{d(\sin \omega t)}{dt} \\
 &= -NBab(\omega \cos \omega t) \\
 &= -NBab\omega \cos \omega t \\
 &= -\Sigma_{maks} \cos \omega t
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

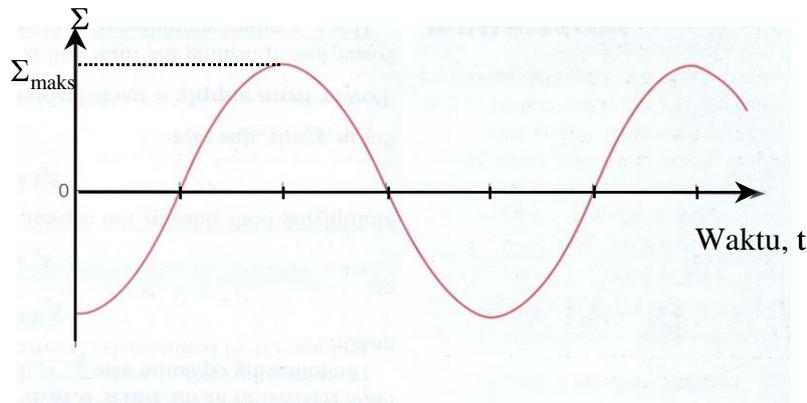
dengan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\Sigma_{maks} = NBab\omega \quad (6.6)$$

yang merupakan amplitudo ggl yang dihasilkan.

Tampak bahwa ggl yang dihasilkan dinamo berubah secara sinusoidal (merupakan fungsi sinus atau kosinus). **Gambar 6.15** adalah plot ggl yang dihasilkan dinamo.



Gambar 6.15 Bentuk tegangan keluaran sebuah dinamo

Mengapa lampu sepeda kadang berkedip-kedip? Ketika sepeda dijalankan maka kecepatannya tidak selalu konstan. Kadang cepat dan kadang lambat. Karena putaran dinamo sepeda bergantung pada putaran ban sepeda maka kecepatan sudut dynamo sangat bergantung pada kecepatan sepeda saat itu. Berdasarkan persamaan (6.6) amplitudo tegangan yang dihasilkan dynamo berbanding lurus dengan kecepatan sudut dynamo. Karena kecepatan sudut dynamo berubah-ubah karena perubahan kecepatan sepeda maka tegangan keluaran dynamo berubah-ubah. Akibatnya lampu sepeda berkedip-kedip.

Contoh 6.5

Berapa tegangan maksimum yang dapat diperoleh dari sebuah kumparan yang mengandung 100 lilitan yang sedang berotasi dalam medan magnet 0,2T dengan laju 20 r.p.m? Luas kumparan adalah 2,5 cm²

Jawab

Diberikan $N = 100$, $B = 0,2 \text{ T}$, $\omega = 20 \text{ r.p.m} = 20 \times (2\pi)/60 \text{ rad/s} = 2,1$

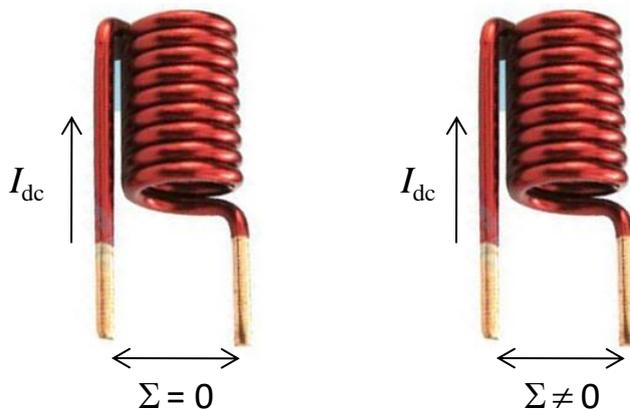
Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

rad/s, dan $A = 2,5 \text{ cm}^2 = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Pada persamaan (7.11), perkalian ab tidak lain daripada luas kumparan sehingga kita dapat menulis

$$\begin{aligned}\Sigma_{maks} &= NBA\omega \\ &= 100 \times 0,2 \times (2,5 \times 10^{-4}) \times 2,1 \\ &= 0,11 \text{ volt}\end{aligned}$$

6.6 Induktansi

Sekarang bayangkan kita memiliki sebuah solenoid. Jika solenoid tersebut dialiri arus searah maka beda potensial antara dua ujung solenoid hampir nol karena beda tegangan sama dengan perkalian arus dan hambatan solenoid. Solenoid hanya berupa kawat konduktor sehingga hambatan listrik antara dua ujung solenoid hampir nol. Tetapi jika solenoid dilalui arus yang berubah-ubah terhadap waktu, maka sifat solenoid akan berubah.



Gambar 6.16 (kiri) jika solenoid dialiri arus dc, tidak muncul tegangan antara dua ujung solenoid. (kanan) jika solenoid dialiri arus ac maka muncul tegangan antara dua ujung solenoid.

Karena arus berubah-ubah terhadap waktu maka kuat medan magnet dalam solenoid berubah-ubah. Karena luas penampang solenoid tetap maka fluks magnetik yang dikandung solenoid berubah terhadap waktu. Berdasarkan hukum Faraday maka solenoid menghasilkan ggl induksi. Dengan demikian, ketika dialiri arus bolak-balik maka muncul tegangan antara dua ujung solenoid. Tegangan ini tidak muncul ketika solenoid dialiri arus searah. **Gambar 6.16** adalah ilustrasi solenoid yang

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

dialiri arus searah dan arus bolak-balik. Berapa besar ggl induksi antara dua ujung solenoid tersebut? Mari kita analisis.

6.6.1 Ggl antara dua ujung solenoid

Sekarang kita akan menentukan ggl yang dihasilkan antara dua rongga solenoid atau kumparan secara umum. Dalam Bab 5 sudah kita turunkan bahwa kuat medan magnet dalam rongga solenoid ideal adalah

$$B = \mu_0 nI$$

Kita asumsikan bahwa kumparan yang kita tinjau merupakan solenoid ideal. Jika luas penampang solenoid adalah A maka fluks magnetik yang dilingkupi solenoid adalah

$$\phi = BA$$

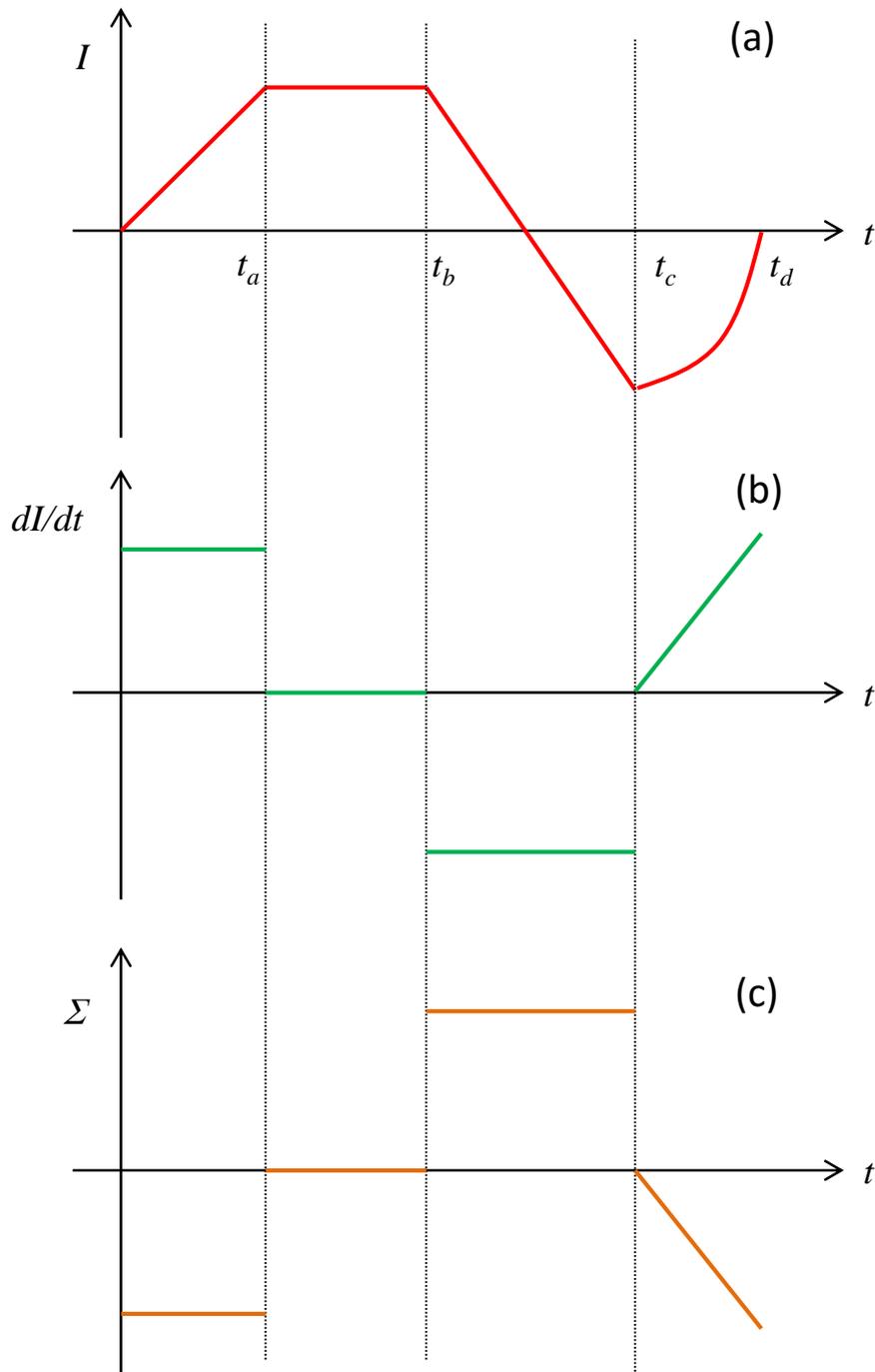
$$= \mu_0 nIA$$

Oleh karena itu, berdasarkan hukum Faraday, ggl induksi yang dihasilkan solenoid jika fluks mengalami perubahan terhadap waktu adalah

$$\begin{aligned}\Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N \frac{d(\mu_0 nIA)}{dt} \\ &= -N\mu_0 nA \frac{dI}{dt}\end{aligned}\tag{6.7}$$

Tampak bahwa ggl induksi yang dihasilkan berbanding lurus dengan laju perubahan arus. Untuk arus yang konstant (arus dc) maka $dI/dt = 0$ sehingga ggl induksi yang dihasilkannya nol. Untuk solenoid yang memiliki geometri tetap (luas penampang tetap, lilitan per satuan panjang tetap, atau jumlah kumpatan tetap), maka ggl induksi hanya ada jika arus yang mengalir berubah-ubah terhadap waktu sehingga dI/dt tidak nol.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.17 (a) arus yang diberikan pada solenoid, (d) gradient arus dan (c) ggl induksi yang dihasilkan.

Tampak dari persamaan (6.7) bahwa ggl yang dihasilkan berbanding lurus dengan negative gradient arus. Jika arus sedang bertambah atau gradiennya positif, maka ggl yang dihasilkan memiliki tanda negative (polarisasinya berlawanan dengan arah aliran arus). Sebaliknya, jika arus sedang melemah (gradien negative) maka ggl yang dihasilkan memiliki tanda positif (polarisasinya sama dengan arah arus). **Gambar 6.17** adalah contoh

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

arah arus yang mengalir dalam solenoid dan arah arus induksi yang dihasilkan. Berdasarkan gambar tersebut maka

- Pada saat antara 0 sampai t_a , arus yang mengalir pada solenoid makin besar sehingga dI/dt positif. Akibatnya ggl induksi yang dihasilkan berharga negatif.
- Antara t_a sampai t_b , arus yang diberikan pada solenoid konstan sehingga gradient arus nol. Akibatnya, ggl induksi yang dihasilkan non.
- Antara t_b sampai t_c , arus yang diberikan pada solenoid makin berkurang sehingga dI/dt negatif. Akibatnya ggl induksi yang dihasilkan positif.
- Dan pada saat $t > t_c$, arus yang diberikan pada solenoid naik secara kuadratik yang menyebabkan dI/dt positif dan bertambah secara linier. Akibatnya ggl yang dihasilkan negative dan berkurang secara linier.

6.6.2 Induktansi Diri

Perubahan arus pada suatu kumparan menyebabkan munculnya ggl induksi. Besarnya ggl yang dihasilkan sebanding dengan laju perubahan arus namun memiliki tanda yang berbeda. Dengan demikian, hubungan ggl induksi dengan perubahan arus dapat ditulis sebagai

$$\Sigma = -L \frac{dI}{dt} \quad (6.8)$$

di mana

L kita namanya sebagai induktansi diri.

Dengan membandingkan persamaan (6.7) dan (6.8) kita peroleh bentuk persamaan induktansi diri sebuah solenoid adalah

$$L = N\mu_o nA \quad (6.9)$$

Jika ℓ adalah panjang solenoid maka kita dapat menulis $n = N/\ell$. Dengan demikian, kita peroleh bentuk lain ungkapan induktansi diri sebagai

$$L = \frac{N^2 \mu_o A}{\ell} \quad (6.10)$$

Satuan induktansi adalah Henry dan disingkat H.

Induktansi diri mengukur kemampuan sebuah kumparan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

menghasilkan ggl induksi jika kumparan tersebut mengalami perubahan arus. Makin besar induktansi diri maka makin besar ggl induksi yang dihasilkan untuk perubahan arus yang besarnya tertentu. Induktansi diri dapat diperbesar dengan memperbanyak jumlah lilitan, memperbesar luas penampang dan mengurangi panjang solenoid. Jumlah lilitan memiliki pengaruh paling besar karena induktansi diri bergantung secara kuadratik terhadap jumlah lilitan.

Contoh 6.6

Sebuah solenoid yang panjangnya 5,0 cm dan luas penampang 0,3 cm² memiliki 100 lilitan. Di rongga solenoid hanya berisi udara. Berapa induktansi diri solenoid tersebut.

Jawab

Diberikan di soal $N = 100$, $\ell = 5,0 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$, dan $A = 0,3 \text{ cm}^2 = 0,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Dengan menggunakan persamaan (7.17) maka induktansi diri solenoid adalah

$$\begin{aligned} L &= \frac{N^2 \mu_0 A}{\ell} \\ &= \frac{100^2 \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (3 \times 10^{-5})}{0,05} \text{ H} \\ &= 7,5 \times 10^{-6} \text{ H} \end{aligned}$$

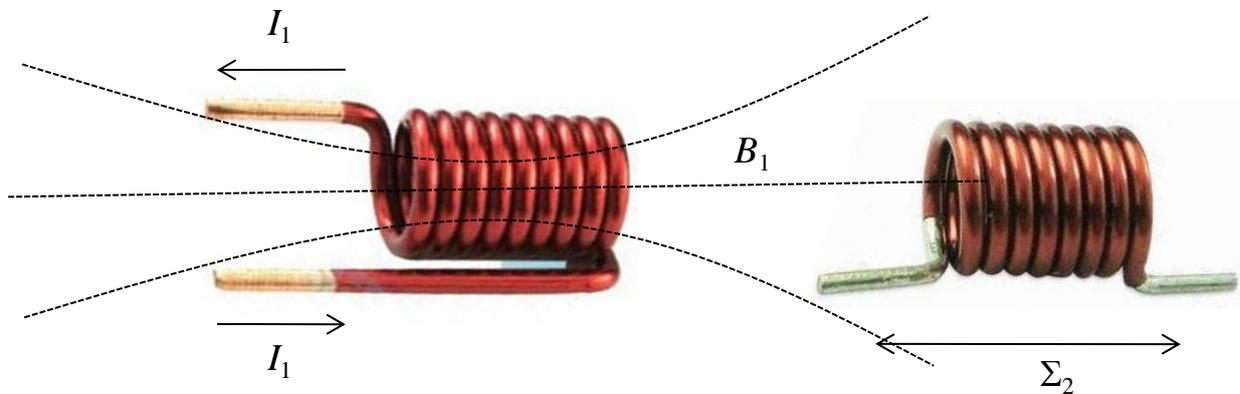
6.6.3 Induktansi bersama

Di samping induktansi diri, kita juga mendefinisikan induktansi bersama. Induktansi bersama memerlukan kehadiran dua solenoid atau lebih. Induktansi bersama memperhitungkan efek satu solenoid terhadap solenoid lainnya. Misalkan kita memiliki dua solenoid yang didekatkan seperti pada **Gambar 6.18**.

Solenoid pertama dialiri arus I_1 yang berubah-ubah terhadap waktu. Akibatnya, medan magnet yang dihasilkan solenoid tersebut berubah-ubah. Sebagian medan magnet ini masuk ke dalam rongga solenoid kedua sehingga menghasilkan fluks pada solenoid kedua. Karena medan magnet berubah-ubah maka fluks magnetik pada solenoid kedua juga

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

berubah-ubah. Akibatnya, pada solenoid kedua muncul ggl induksi. Berapa besar ggl induksi tersebut?



Gambar 6.18 Dua buah kumparan yang berada pada jarak cukup dekat

Misalkan medan magnet yang dihasilkan solenoid pertama adalah B_1 . Maka medan magnet yang menembus solenoid kedua berbanding lurus dengan B_1 , atau

$$B_2 \propto B_1$$

Tentu saja medan magnet yang dihasilkan di rongga medan magnet kedua lebih kecil daripada medan magnet di rongga solenoid pertama karena ada sebagian medan yang dihasilkan solenoid pertama tidak masuk ke dalam rongga solenoid kedua. Dengan demikian dapat kita tulis

$$B_2 = \xi B_1$$

dengan ξ adalah konstanta yang nilainya kurang dari satu. Jika luas penampang solenoid kedua adalah A_2 maka fluks magnetik pada solenoid kedua adalah

$$\begin{aligned}\phi_2 &= B_2 A_2 \\ &= \xi B_1 A_2\end{aligned}$$

Dengan menganggap bahwa solenoid bersifat ideal, maka medan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

magnet yang dihasilkan solenoid pertama memenuhi

$$B_1 = \mu_o n_1 I_1$$

Sehingga fluks pada solenoid kedua menjadi

$$\phi_2 = \xi \mu_o n_1 A_2 I_1$$

Ggl induksi yang dihasilkan oleh solenoid kedua menjadi

$$\begin{aligned} \Sigma_2 &= -N_2 \frac{d\phi_2}{dt} \\ &= -\xi \mu_o N_2 n_1 A_2 \frac{dI_1}{dt} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Kita mendefinisikan besaran yang bernama induktansi bersama menurut persamaan berikut

$$\Sigma_2 = L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (6.12)$$

Dengan membandingkan persamaan (6.11) dan (6.12) kita peroleh bentuk induktansi bersama

$$L_{21} = \xi \mu_o N_2 n_1 A_2 \quad (6.13)$$

Jika ℓ_1 adalah panjang solenoid pertama maka $n_1 = N_1 / \ell_1$. Akhirnya kita dapatkan bentuk lain induktansi bersama sebagai berikut

$$L_{21} = \frac{\xi \mu_o N_1 N_2 A_2}{\ell_1} \quad (6.14)$$

Nilai parameter ξ bergantung pada jarak antara dua solenoid, dan orientasi satu solenoid terhadap solenoid lainnya. Makin jauh jarak antara dua solenoid maka makin kecil harga ξ . Jika jarak antar dua solenoid sangat besar (mendekati tak berhingga) maka $\xi = 0$. Ini berarti tidak ada medan magnet yang dihasilkan solenoid pertama yang masuk ke solenoid kedua.

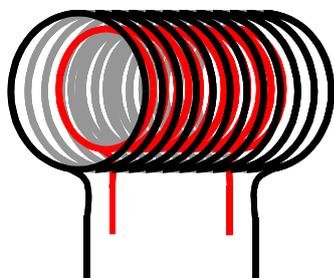
Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Sebaliknya, jika dua solenoid berimpitan dan konsentris maka $\xi = 1$. Ini terjadi karena rongga solenoid pertama juga merupakan rongga solenoid kedua.

Contoh 6.7

Dua buah solenoid disusun secara konsentris. Jumlah lilitan, panjang, dan jari-jari masing-masing solenoid adalah N_1 , ℓ_1 , dan a_1 untuk solenoid pertama dan N_2 , ℓ_2 , dan a_2 untuk solenoid kedua. Tentukan induktansi diri masing-masing solenoid dan induktansi bersama L_{21} dan L_{12} .

Jawab



Gambar 6.19 Dua buah solenoid konsentris

Skema dua solenoid tampak pada **Gambar 6.19**. Misalkan solenoid kecil memiliki jari-jari a_1 dan solenoid besar memiliki jari-jari a_2 . Induktansi diri solenoid kecil adalah

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{N_1^2 \mu_o A_1}{\ell_1} \\ &= \frac{N_1^2 \mu_o (\pi a_1^2)}{\ell_1} \\ &= N_1^2 \pi \mu_o \frac{a_1^2}{\ell_1} \end{aligned}$$

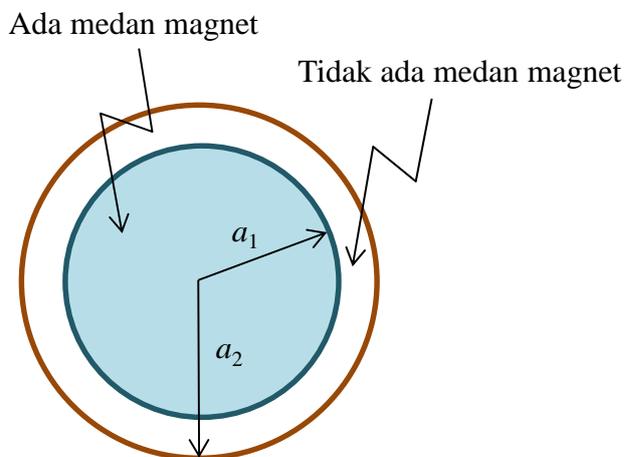
Induktansi diri solenoid besar adalah

$$L_2 = \frac{N_2^2 \mu_o A_2}{\ell_2}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\begin{aligned} &= \frac{N_2^2 \mu_o (\pi a_2^2)}{\ell_2} \\ &= N_2^2 \pi \mu_o \frac{a_2^2}{\ell_2} \end{aligned}$$

Jika solenoid kecil yang diberi arus maka medan magnet hanya ada dalam rongga solenoid kecil. Di ruang antara dua solenoid, medan magnet nol seperti diilustrasikan pada **Gambar 6.20**.



Gambar 6.20 Medan magnet hanya ada dalam rongga solenoid kecil

Jadi, fluks magnetik yang dikandung solenoid besar hanya

$$\begin{aligned} \phi_2 &= B_1 A_1 \\ &= \mu_o n_1 I_1 A_1 \\ &= \mu_o \frac{N_1}{\ell_1} A_1 I_1 \end{aligned}$$

Jika diperhatikan dengan seksama tampak bahwa fluks yang dikandung solenoid besar sama dengan fluks yang dikandung solenoid kecil. Ggl induksi pada solenoid besar menjadi

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\begin{aligned}\Sigma_2 &= -N_2 \frac{d\phi_2}{dt} \\ &= -N_2 \mu_o \frac{N_1}{\ell_1} A_1 \frac{dI_1}{dt}\end{aligned}\quad (\text{i})$$

Ggl tersebut dapat ditulis pula dalam bentuk

$$\Sigma_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (\text{ii})$$

Dengan membandingkan persamaan (i) dan (ii) kita dapatkan bentuk ungkapan induktansi bersama

$$\begin{aligned}L_{21} &= N_1 N_2 \mu_o \frac{A_1}{\ell_1} \\ &= N_1 N_2 \mu_o \frac{\pi a_1^2}{\ell_1}\end{aligned}$$

Jika solenoid besar yang dialiri arus maka seluruh ruang dalam rongga solenoid besar diisi medan magnet yang besarnya

$$B_2 = \mu_o n_2 I_2$$

Medan yang besarnya sama menembus ruang dalam rongga solenoid kecil seperti tampak pada **Gambar 6.21**. Fluks magnetik pada rongga solenoid kecil menjadi

$$\begin{aligned}\phi_1 &= B_2 A_1 \\ &= \mu_o n_2 I_2 A_1 \\ &= \mu_o \frac{N_2}{\ell_2} A_1 I_2\end{aligned}$$

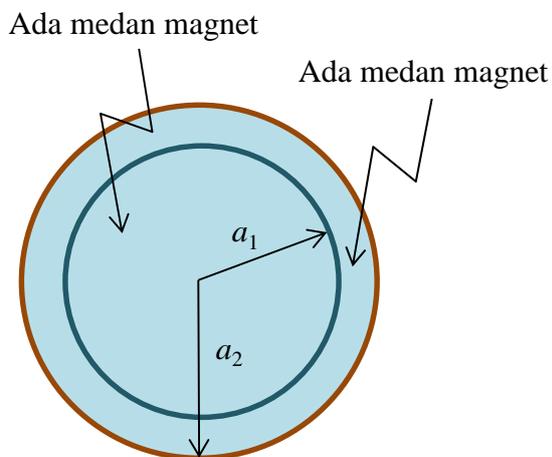
Ggl induksi pada solenoid kecil menjadi

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\begin{aligned}\Sigma_1 &= -N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \\ &= -N_1 \mu_o \frac{N_2}{\ell_2} A_1 \frac{dI_2}{dt}\end{aligned}\quad (\text{iii})$$

Ggl tersebut dapat ditulis pula dalam bentuk

$$\Sigma_1 = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (\text{iv})$$



Gambar 6.21 Medan magnet ada dalam rongga solenoid besar dan kecil

Dengan membandingkan persamaan (iii) dan (iv) kita dapatkan bentuk ungkapan induktansi bersama

$$\begin{aligned}L_{12} &= N_1 N_2 \mu_o \frac{A_1}{\ell_2} \\ &= N_1 N_2 \mu_o \frac{\pi a_1^2}{\ell_2}\end{aligned}$$

6.7 Rangkaian induktor

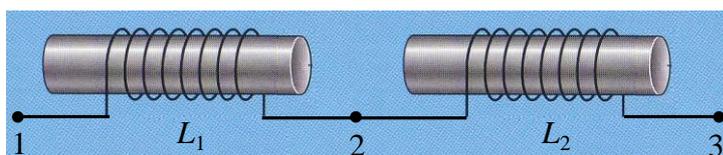
Sekarang kita mengkaji bagaimana jika sejumlah inductor dihubungkan secara seri dan secara parallel. Kita sudah membahas hubungan serupa untuk hambatan dan kapasitor. Misalkan dua buah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

induktor L_1 dan L_2 dihubungkan secara seri dan dipisahkan cukup jauh (**Gambar 6.22**). Kita akan hitung induktansi pengganti (efektif dua inductor tersebut). Dua inductor harus dipisahkan cukup jauh agar tidak saling mempengaruhi (kopling). Jika jarak inductor sangat dekat maka medan magnet yang dihasilkan satu inductor dapat menembus masuk ke inductor lain. Ggl yang muncul pada satu inductor bukan lagi ggl yang diakibatkan oleh induktansi diri tetapi juga oleh induktansi bersama.

6.7.1 Rangkaian Seri

Pertama kita kaji rangkaian seri inductor seperti ditunjukkan pada **Gambar 6.22**. Misalkan arus yang mengalir pada inductor I . Arus yang mengalir sama pada inductor pertama dan kedua.



Gambar 6.22 Dua buah inductor yang dipasang secara seri.

Tegangan pada masing-masing inductor pada **Gambar 6.22** adalah

$$\Sigma_{12} = -L_1 \frac{dI}{dt}$$

$$\Sigma_{23} = -L_2 \frac{dI}{dt}$$

Dengan demikian, tegangan total antara dua ujung terluar rangkaian inductor adalah

$$\Sigma_{13} = \Sigma_{12} + \Sigma_{23}$$

$$= -L_1 \frac{dI}{dt} - L_2 \frac{dI}{dt}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$= -(L_1 + L_2) \frac{dI}{dt}$$

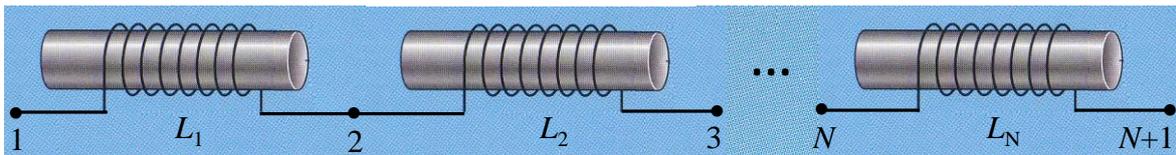
$$= -L_{ef} \frac{dI}{dt}$$

dengan

$$L_{ef} = L_1 + L_2$$

Dari sini dapat kita simpulkan bahwa hambatan efektif atau hambatan pengganti dua inductor yang disusun secara seri sama dengan jumlah hambatan masing-masing inductor.

Kita dapat mengeneraliasi penusunan di atas untuk susunan seri N buah inductor yang tidak saling mempengaruhi seperti pada **Gambar 6.23**



Gambar 6.23 Susunan seri sebanyak N buah inductor.

Ggl induksi yang dihasilkan masing-masing inductor adalah

$$\Sigma_{12} = -L_1 \frac{dI}{dt}$$

$$\Sigma_{23} = -L_2 \frac{dI}{dt}$$

...

$$\Sigma_{N,N+1} = -L_N \frac{dI}{dt}$$

Dengan demikian, tegangan total antara dua ujung terluar rangkaian inductor adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\begin{aligned}\Sigma_{1,N+1} &= \Sigma_{12} + \Sigma_{23} + \dots + \Sigma_{N,N+1} = -L_1 \frac{dI}{dt} - L_2 \frac{dI}{dt} - \dots - L_N \frac{dI}{dt} \\ &= -(L_1 + L_2 + \dots + L_N) \frac{dI}{dt} \\ &= -L_{ef} \frac{dI}{dt}\end{aligned}$$

dengan

$$L_{ef} = L_1 + L_2 + \dots + L_N \quad (6.15)$$

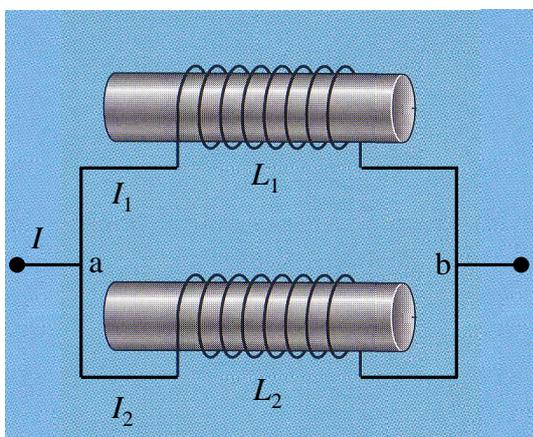
6.7.2 Rangkaian Paralel

Berikutnya kita mencari induktor ekuivalen jika ada dua inductor yang disusun secara paralel seperti ditunjukkan pada **Gambar 6.24**. Tegangan antara titik a dan b dapat diungkapkan dalam sejumlah persamaan

$$\begin{aligned}\Sigma_{ab} &= -L_1 \frac{dI_1}{dt} && \text{atau} && \frac{dI_1}{dt} = -\frac{\Sigma_{ab}}{L_1} \\ \Sigma_{ab} &= -L_2 \frac{dI_2}{dt} && \text{atau} && \frac{dI_2}{dt} = -\frac{\Sigma_{ab}}{L_2}\end{aligned}$$

Induktansi efektif sendiri memenuhi persamaan

$$\Sigma_{ab} = -L_{ef} \frac{dI}{dt} \quad \text{atau} \quad \frac{dI}{dt} = -\frac{\Sigma_{ab}}{L_{ef}}$$



Gambar 6.24 Dua inductor disusun secara paralel.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Dengan menggunakan hukum Kirchoff I maka

$$I = I_1 + I_2$$

Diferensiasikan dua ruas terhadap waktu

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt}$$

$$-\frac{\Sigma_{ab}}{L_{ef}} = -\frac{\Sigma_{ab}}{L_1} - \frac{\Sigma_{ab}}{L_2}$$

atau

$$\frac{1}{L_{ef}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Persamaan ini dapat digeneralisasi untuk N buah induktor yang disusun secara paralel. Dengan mudah kita dapatkan persamaan

$$\frac{1}{L_{ef}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_N} \quad (6.16)$$

6.8 Memperbesar induktansi

Jika hanya ruang kosong dalam rongga solenoid maka induktansi yang dimiliki solenoid tersebut sangat kecil. Untuk memperbesar induktansi suatu solenoid, kita masukkan bahan magnetik ke dalam rongga solenoid tersebut. Hal ini serupa dengan memasukkan bahan dielektrik antara dua pelat kapasitor dengan maksud memperbesar kapasitansi. **Gambar 6.25** adalah contoh inductor yang mengandung teras di dalam rongganya.

Medan magnet yang mula-mula B saat solenoid kosong berubah menjadi

$$B' = \mu B \quad (6.17)$$

ketika di dalam rongga solenoid dimasukkan bahan magnetik dengan permeabilitas μ . Dengan demikian, fluks magnetik dalam solenoid ketika solenoid tersebut dilewati arus adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\phi = \mu\mu_0 nIA$$

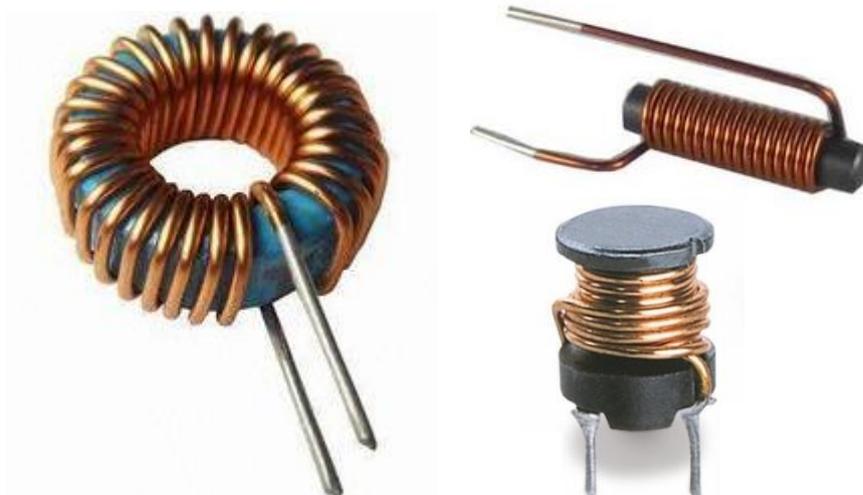
Ggl induksi yang dihasilkan arus adalah

$$\begin{aligned}\Sigma &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N\mu\mu_0 nA \frac{dI}{dt}\end{aligned}$$

Maka induktansi diri solenoid tersebut adalah

$$\begin{aligned}L &= N\mu\mu_0 nA \\ &= N\mu\mu_0 \left(\frac{N}{\ell}\right)A \\ &= N^2 \mu\mu_0 \frac{A}{\ell}\end{aligned}$$

Tampak bahwa induktansi menjadi μ kali lebih besar dibandingkan dengan induktansi saat solenoid kosong.



Gambar 6.25 Contoh inductor yang mengandung teras di dalam rongganya

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Contoh 6.8

Sebuah solenoid dengan panjangnya 4,0 cm dan luas penampang 0,5 cm² memiliki 200 lilitan. (a) Jika di rongga solenoid hanya berisi udara, berapa induktansi diri solenoid tersebut? (b) Berapa induktansi solenoid jika rongga solenoid berisi teras besi dengan $\mu = 4000$?

Jawab

Diberikan $N = 200$, $\ell = 4,0 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$, $A = 0,5 \text{ cm}^2 = 0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.

a) Jika rongga solenoid kosong maka

$$\begin{aligned} L &= \frac{N^2 \mu_0 A}{\ell} \\ &= \frac{200^2 \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (5 \times 10^{-5})}{0,04} = 6,3 \times 10^{-5} \text{ H} \end{aligned}$$

b) Jika rongga solenoid berisi teras besi maka

$$\begin{aligned} L &= \frac{N^2 \mu \mu_0 A}{\ell} \\ &= \frac{200^2 \times 4000 \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (5 \times 10^{-5})}{0,04} = 0,25 \text{ H} \end{aligned}$$

6.9 Energi medan magnet

Sudah kita bahas pada bab tentang medan listrik bahwa medan listrik menyimpan energy. Jika ada medan listrik maka ada energy yang tersimpan dalam medan tersebut. Apakah fenomena serupa dijumpai pada medan magnet? Apakah medan magnet juga menyimpan energy? Mari kita jawab.

Misalkan sebuah solenoid dialiri arus I . Maka pada dua ujung solenoid muncul ggl induksi sebesar

$$\Sigma = -L \frac{dI}{dt}$$

Jika tambahan muatan sebesar dq dialirkan menuju solenoid tersebut maka energi yang diperlukan untuk melawan beda potensial solenoid adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$dW = -\Sigma \times dq$$

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

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

Tetapi $dq/dt = I$ sehingga persamaan di atas dapat ditulis ulang sebagai

$$dW = LI dI$$

Kerja total yang dilakukan untuk melewati arus pada solenoid dari nol hingga arus I adalah

$$W = \int_0^I dW$$

$$= \int_0^I LI dI$$

$$= L \int_0^I I dI$$

$$= L \left[\frac{1}{2} I^2 \right]_0^I$$

$$= \frac{1}{2} LI^2$$

Kerja yang diberikan tersimpan sebagai energi dalam solenoid. Jadi, energi yang tersimpan dalam solenoid yang sedang dialiri arus I adalah

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \tag{6.18}$$

Kuat medan magnet dalam rongga solenoid (dengan anggapan solenoid ideal) adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$B = \mu_o n I$$

$$= \mu_o \frac{N}{\ell} I$$

atau

$$I = \frac{B \ell}{\mu_o N}$$

Substitusi persamaan induktansi diri dan persamaan arus di atas ke dalam persamaan (6.24) diperoleh

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \left(\frac{N^2 \mu_o A}{\ell} \right) \left(\frac{B \ell}{\mu_o N} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{N^2 \mu_o A}{\ell} \right) \left(\frac{B^2 \ell^2}{\mu_o^2 N^2} \right) \\ &= \frac{1}{2 \mu_o} B^2 (A \ell) \end{aligned}$$

Bagian dalam tanda kurung pada persamaan di atas tidak lain daripada volum rongga solenoid. Kita definisikan rapat energi medan magnetik per satuan volum sebagai

$$\begin{aligned} u &= \frac{U}{(A \ell)} \\ &= \frac{1}{2 \mu_o} B^2 \end{aligned} \tag{6.19}$$

Jadi, jika di suatu tempat terdapat medan magnet B maka di tempat tersebut terdapat energi medan magnet dengan kerapatan per satuan volum diberikan oleh persamaan (6.19). Bentuk persamaan (6.19) sangat mirip dengan ungkapan rapat energi medan listrik $(\epsilon_o / 2) E^2$ yang telah kita bahas sebelumnya.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Contoh 6.9

Medan magnet di dalam sebuah solenoid yang berisi udara dengan panjang 36 cm dan diameter 2,0 cm adalah 0,80 T. Perkirakan berapa energi yang tersimpan dalam rongga solenoid tersebut.

Jawab

Luas penampang solenoid $A = \pi a^2 = 3,14 \times (0,01)^2 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.
Volum rongga solenoid adalah $V = A\ell = (3,14 \times 10^{-4}) \times 0,36 = 1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.
Kerapatan energi medan magnet dalam rongga solenoid

$$u = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$
$$= \frac{1}{2 \times (4\pi \times 10^{-7})} (0,8)^2 = 10^6 \text{ J/m}^3$$

Dengan demikian, perkiraan jumlah energi medan magnet yang tersimpan dalam solenoid adalah

$$U = uV$$
$$= 10^6 \times (1,13 \times 10^{-4}) = 113 \text{ J}$$

Contoh 6.10

Sebuah kawat lurus panjang dengan jari-jari a dialiri arus I . Tentukan energy medan magnetik yang disimpan dalam ruang per satuan panjang l sepanjang kawat.

Jawab

Kita buat kulit tipis silinder sepanjang kawat dengan jari-jari dalam r dan jari-jari luar $r+dr$ (**Gambar 6.26**). Panjang kulit silinder adalah l . Kuat medan magnet dalam kulit tersebut (berjaran r dari kawat) adalah

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

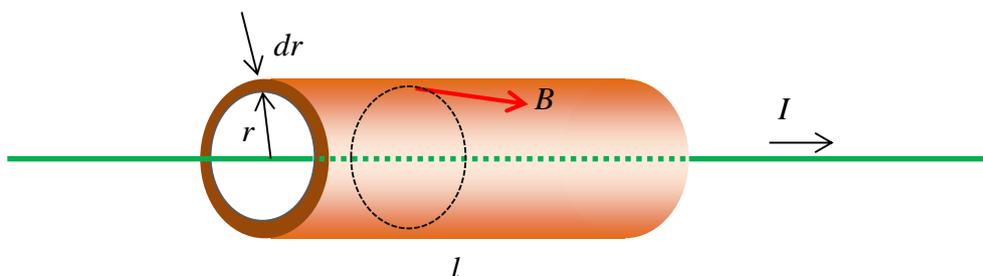
Volum kulit silinder adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$dV = (2\pi r dr)l$$

Dengan demikian, energy medan magnet yang tersimpan dalam kulit silinder adalah

$$\begin{aligned} dU &= \frac{1}{2\mu_0} B^2 dV \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \right)^2 (2\pi r dr)l \\ &= \frac{\mu_0 I^2 l}{4\pi} \frac{dr}{r} \end{aligned}$$



Gambar 6.26 Elemen kulit silinder yang menyimpan medan magnet B .

Energi magnet total yang disimpan oleh bagian kawat sepanjang l diperoleh dengan mengintegrasikan dU dari $r = a$ sampai $r = \infty$, yaitu

$$\begin{aligned} U &= \frac{\mu_0 I^2 l}{4\pi} \int_a^\infty \frac{dr}{r} \\ &= \frac{\mu_0 I^2 l}{4\pi} [\ln r]_a^\infty \\ &= \frac{\mu_0 I^2 l}{4\pi} [\ln \infty - \ln a] = \infty \end{aligned}$$

Jadi, secara teori energy yang disimpan dalam ruang sepanjang kawat tak berhingga besarnya. Namun, realitasnya energy yang tersimpan tidak mungkin tak berhingga. Energi yang tersimpan pasti berhingga.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Medan magnet yang dihitung dengan persamaan Biot-Savart memperhitungkan kondisi ideal di mana hingga jarak tak berhingga medan magnet tetap ada dan turun menurut kebalikan jarak. Pada kenyataannya, pada jarak yang cukup jauh medan magnet mungkin tidak lagi ada atau medan magnet turun lebih cepat dari $1/r$. Jika kondisi ini tercapai maka integral akan menjadi berhingga. Sebagai contoh, misalnya pada jarak yang cukup jauh medan magnet turun menurut $1/r^{1+\delta}$ dengan δ adalah bilangan positif kecil. Dalam kondisi ini maka integral dalam menghitung energy

menjadi $\int_a^{\infty} dr / r^{1+\delta} = 1/(\delta a^{\delta})$ yang nilainya berhingga.

6.10 Transformator

Transformator yang sering disingkat trafo adalah alat listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan listrik yang bukan dc menjadi lebih besar atau lebih kecil dari tegangan semula. Tengan yang dapat diubah oleh trafo hanya tegangan yang berubah-ubah terhadap waktu, misalknya tegangan bolak-balik. Bagaimana proses ini bisa terjadi? **Gambar 6.27** adalah contoh tranformator yang sering kita jumpai sehari-hari: (a) Transformator pada jaringan listrik PLN, (b) transformator yang banyak dijual di toko komponen elektronik dan sering digunakan untuk membuat adaptor, dan (c) transformator yang terpasang pada rangkaian.

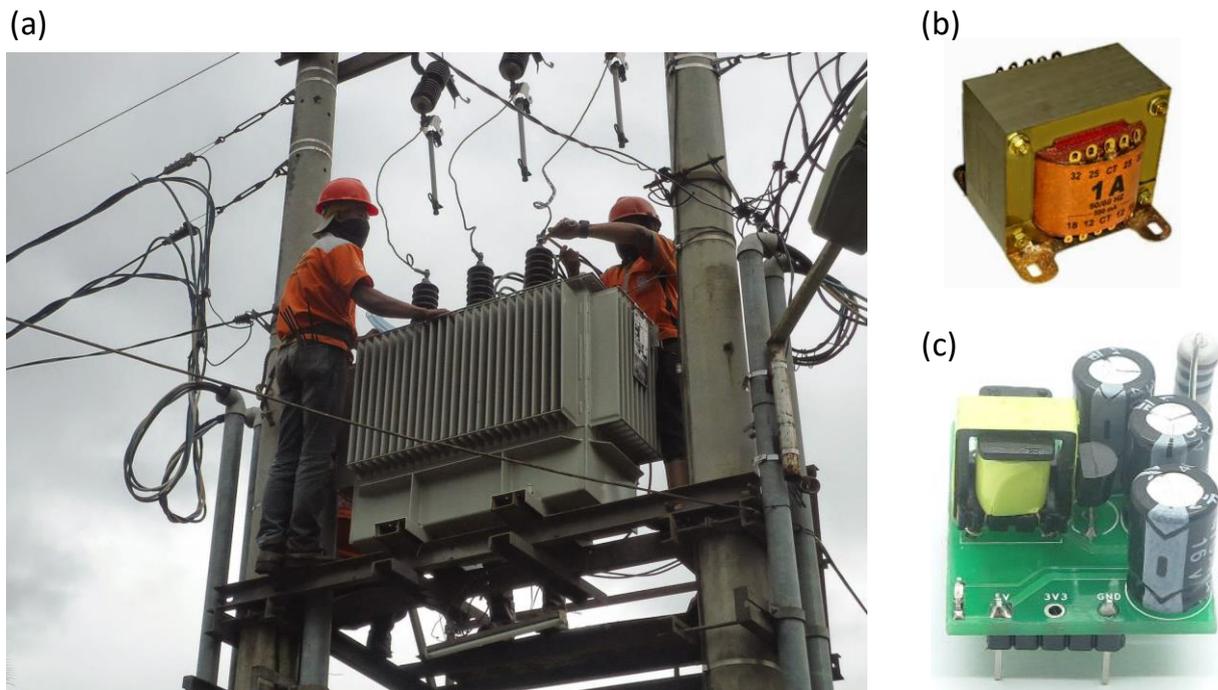
a) Trafo memiliki dua kumparan.

Secara umum trafo memiliki dua kumparan.

- Kumparan primer berada di bagian input, tempat tegangan listrik masuk ke dalam trafo.
- Kumparan sekunder berada di bagian output trafo, tempat tegangan listrik hasil perubahan keluar dari trafo.

Di dalam rongga kumparan primer dan kumparan sekuner diisi dengan teras besi sebagai jembatan perambatan medan magnet. Tanpa adanya teras maka medan magnet yang dihasilkan kumparan primer akan menyebar ke mana-mana (**Gambar 6.28a**). Dengan adanya teras maka sebagian besar medan yang dihasilkan berada dalam tetas. Jika teras yang sama digunakan oleh kumparan sekunder maka semua medan yang dihasilkan kumparan primer masuk ke dalam kumparan sekunder (**Gambar 6.28b**).

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.27 Contoh transformator yang kita jumpai sehari-hari. (a) Transformator pada jaringan listrik PLN, (b) transformator yang banyak dijual di toko komponen elektronik dan sering digunakan untuk membuat adaptor, dan (c) transformator yang terpasang pada rangkaian.

Jika arus masuk ke dalam kumparan primer maka dihasilkan medan magnet. Medan magnet yang dihasilkan kumparan primer diarahkan ke kumparan sekunder. Agar pengarahannya tersebut berlangsung efektif maka di dalam rongga trafo umumnya diisi teras besi atau bahan lain yang dapat bersifat magnetik. Dengan penggunaan bahan tersebut maka seolah-olah medan magnet yang dihasilkan kumparan primer mengalir ke dalam bahan tersebut dan seluruhnya mencapai kumparan sekunder. **Gambar 6.29** adalah skema trafo di mana kumparan primer dan sekunder sama-sama melingkupi teras besi yang sama.

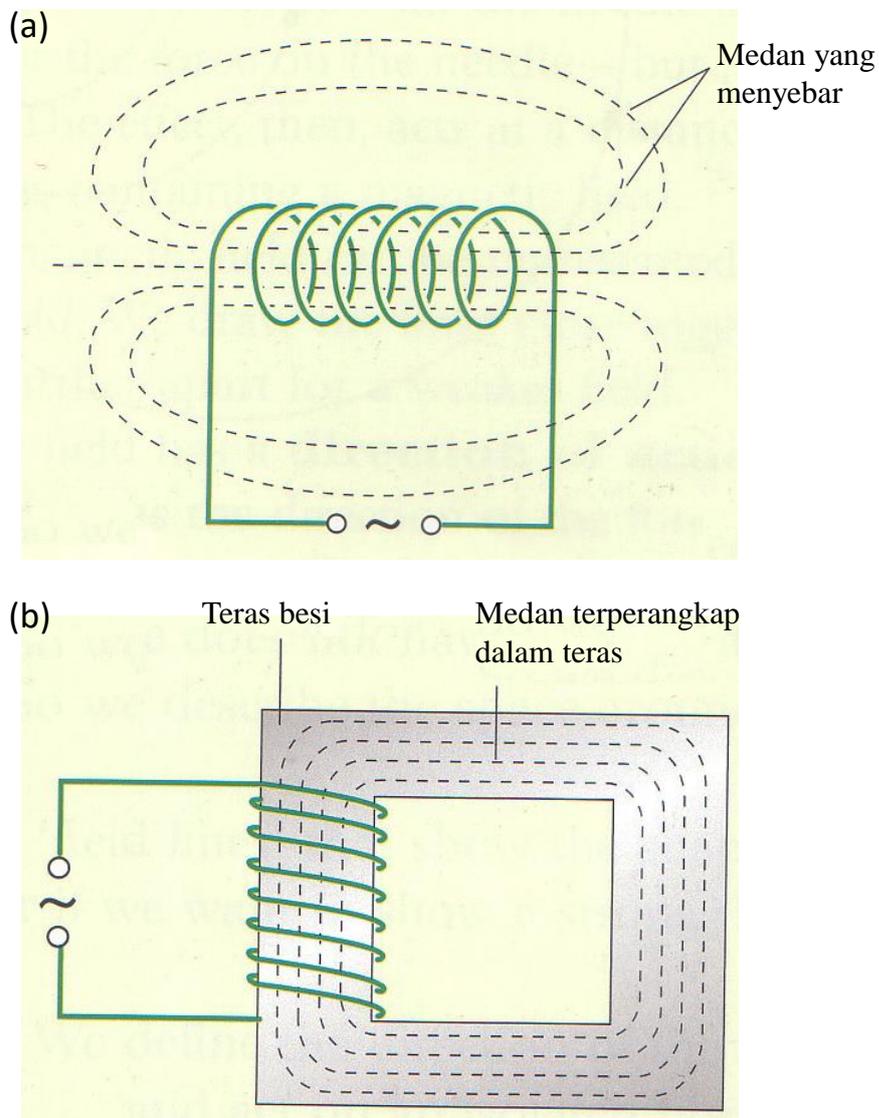
Karena semua medan yang dihasilkan kumparan primer dianggap merambat ke kumparan sekunder maka kita peroleh

$$B_s = B_p$$

dengan

B_s medan magnet yang ada di kumparan sekunder

B_p medan magnet yang ada dalam kumparan primer.



Gambar 6.28 (a) Jika tidak digunakan teras maka medan magnet yang dihasilkan kumparan meyebar ke luar. (b) medan magnet yang dihasilkan kumparan terperangkap dalam teras jika di dalam rongga kumparan dipasang teras besi.

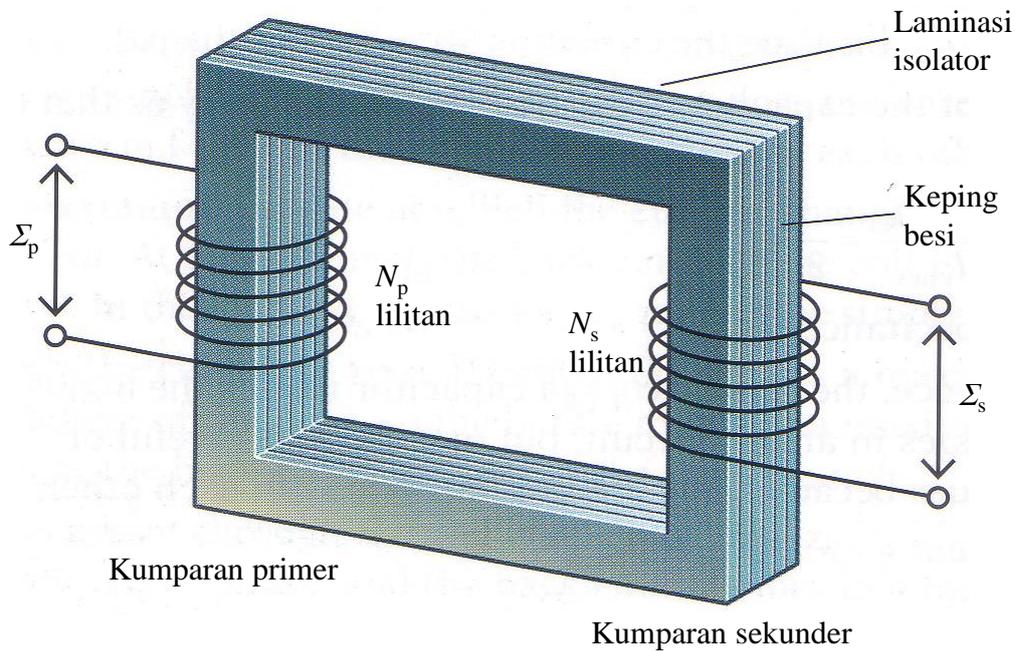
Dengan asumsi bahwa kumparan primer berperilaku sebagai solenoid ideal maka

$$B_p = \mu\mu_o n_p I_p$$

dengan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

μ permeabilitas bahan teras.



Gambar 6.29 Skema trafo. Kumparan primer dan sekunder dililitkan pada teras besi yang sama sehingga medan magnet yang dihasilkan kumparan primer mengalir semua ke kumparan sekunder.

Fluks magnetik pada kumparan primer adalah

$$\begin{aligned}\phi_p &= B_p A_p \\ &= \mu \mu_0 n_p I_p A_p\end{aligned}$$

Fluks magnetik pada kumparan sekunder adalah

$$\begin{aligned}\phi_s &= B_s A_s \\ &= B_p A_s \\ &= \mu \mu_0 n_p I_p A_s\end{aligned}$$

Ggl induksi yang dihasilkan pada kumparan primer adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$\begin{aligned}\Sigma_p &= -N_p \frac{d\phi_p}{dt} \\ &= -N_p \mu \mu_o n_p A_p \frac{dI_p}{dt}\end{aligned}$$

Ggl induksi yang dihasilkan pada kumparan sekunder adalah

$$\begin{aligned}\Sigma_s &= -N_s \frac{d\phi_s}{dt} \\ &= -N_s \mu \mu_o n_p A_s \frac{dI_p}{dt}\end{aligned}$$

Dengan demikian

$$\frac{\Sigma_s}{\Sigma_p} = \frac{N_s A_s}{N_p A_p}$$

Jika dianggap bahwa luas penampang kumparan primer dan sekunder sama maka diperoleh

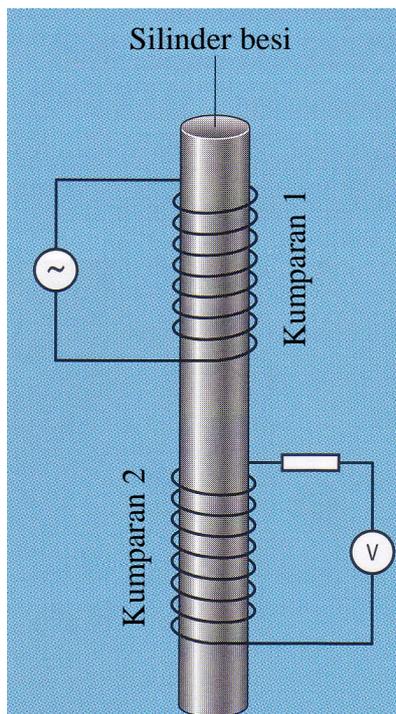
$$\frac{\Sigma_s}{\Sigma_p} = \frac{N_s}{N_p} \tag{6.20}$$

Tampak dari persamaan di (6.20) bahwa

- Jika $N_s > N_p$ maka tegangan keluaran lebih besar daripada tegangan masukan. Trafo semacam ini disebut trafo step-up
- Jika $N_s < N_p$ maka tegangan keluaran lebih kecil daripada tegangan masukan. Trafo semacam ini disebut trafo step-down

Contoh 6.11

Pada **Gambar 6.30** kumparan pertama dengan jumlah lilitan N_1 dan panjang ℓ_1 berada di dekat kumparan kedua dengan jumlah lilitan N_2 dan panjang ℓ_2 . Jari-jari kedua kumparan sama-sama a . Medan magnet dari kumparan pertama yang menembus kumparan kedua hanya 80%. Jika arus yang mengalir pada kumparan pertama adalah $I = I_o \sin \omega t$, berapa ggl yang dihasilkan pada kumparan kedua?



Gambar 6.30 Dua kumparan yang dililirkan pada silinder besi yang sama.

Jawab

Dengan anggapan kumparan ideal maka medan magnet yang dihasilkan kumparan pertama adalah

$$B_1 = \mu_0 n_1 I = \mu_0 \frac{N_1}{\ell_1} I$$

Medan magnet yang masuk ke kumparan kedua adalah

$$B_2 = 0,8B_1 = 0,8\mu_0 \frac{N_1}{\ell_1} I$$

Fluks magnetik pada kumparan kedua

$$\phi_2 = B_2 A_2 = 0,8\mu_0 \frac{N_1}{\ell_1} I (\pi a^2) = 0,8\mu_0 \pi a^2 \frac{N_1}{\ell_1} I$$

Ggl induksi pada kumparan kedua

$$\Sigma_2 = -N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -N_2 \times 0,8 \mu_o \pi a^2 \frac{N_1}{\ell_1} \frac{dI}{dt}$$

Tetapi,

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d(I_o \sin \omega t)}{dt} = \omega I_o \cos \omega t$$

sehingga diperoleh

$$\Sigma_2 = -0,8 \frac{N_1 N_2 \mu_o \pi a^2 \omega I_o}{\ell_1} \cos \omega t$$

6.11 Daya trafo

Pada transformator arus dimasukkan pada kumparan primer. Hasilnya pada kumparan sekunder diperoleh arus. Karena adanya arus listrik menandakan adanya energi, maka energi yang dimasukkan ke kumparan primer dapat dideteksi pada kumparan sekunder. Dengan demikian, trafo juga berperan sebagai pemindah energi dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Dari sifat pemindahan energi ini kita dapat menentukan hubungan antara arus pada kumparan primer dan pada kumparan sekunder. Hubungan ini dapat ditentukan sebagai berikut.

Daya pada kumparan primer adalah

$$P_p = I_p \Sigma_p$$

dengan P_p daya yang masuk ke kumparan primer dan I_p arus pada kumparan primer. Daya pada kumparan sekunder adalah

$$P_s = I_s \Sigma_s$$

dengan P_s daya yang masuk ke kumparan sekunder I_s arus pada kumparan sekunder. Tidak semua daya pada kumparan primer dapat dipindahkan ke kumparan sekunder. Hanya trafo idel yang sanggup memindahkan seluruh daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Jika η adalah efisiensi trafo maka dipenuhi

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$P_s = \eta P_p$$

atau

$$I_s \Sigma_s = \eta I_p \Sigma_p$$

atau

$$I_s = \eta \frac{\Sigma_p}{\Sigma_s} I_p \quad (6.21)$$

Dengan memasukkan persamaan (6.20) ke dalam persamaan (6.21) diperoleh

$$I_s = \eta \left(\frac{N_p}{N_s} \right) I_p$$

atau

$$\frac{I_s}{I_p} = \eta \frac{N_p}{N_s} \quad (6.22)$$

Contoh 6.12

Sebuah trafo step-up mengubah tegangan 25 volt menjadi 250 volt. Jika efisiensi trafo itu 80% dan kumparan sekundernya dihubungkan dengan lampu 250 volt 50 watt, tentukan arus dalam kumparan primer

Jawab

Perbandingan jumlah lilitan sekunder dan primer adalah

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{250}{25} = 10$$

Efisiensi trafo $\eta = 80\% = 0,8$. Hubungan antara arus pada kumparan sekunder dan primer memenuhi persamaan (7.51). Dari persamaan tersebut kita dapat menulis

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$I_p = \frac{1}{\eta} \frac{N_s}{N_p} I_s = \frac{1}{0,8} \times 10 \times I_s = 12,5 I_s$$

Sebelum menentukan I_p kita tentukan dahulu I_s . Tegangan pada kumparan sekunder adalah 250 V. Tegangan ini melewati sebuah lampu yang tertulis 250 volt 50 watt. Besar hambatan lampu

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{250^2}{50} = 1250 \text{ Ohm}$$

Dengan demikian arus sekunder yang dihasilkan adalah

$$I_s = \frac{250}{1250} = 0,2 \text{ A}$$

dan arus primer yang mengalir adalah

$$I_p = 12,5 I_s = 12,5 \times 0,2 = 2,5 \text{ A}$$

Contoh 6.13

Rata-rata sebesar 120 kW daya listrik dikirim ke kota kecil dari suatu pembangkit yang jaraknya 10 km. Jalur kawat transmisi memiliki hambatan total 0,40 Ω . Hitunglah daya yang hilang jika transmisi dilakukan pada tegangan (a) 220 V, dan (b) 24.000 V

Jawab

a) Jika ditransmisi pada tegangan 220 V maka arus yang mengalir pada kawat transmisi adalah

$$I = \frac{P}{V} = \frac{120000}{220} = 545 \text{ A}$$

Daya yang hilang pada kabel transmisi adalah

$$P_{\text{hilang}} = I^2 R = (545)^2 \times 0,4 = 118810 \text{ Watt}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

b) Jika dirnasmisi pada tegangan 24 000 V maka arus yang mengalir pada kawat transmisi adalah

$$I = \frac{P}{V} = \frac{120000}{24000} = 5 \text{ A}$$

Daya yang hilang pada kabel transmisi adalah

$$P_{\text{hilang}} = I^2 R = 5^2 \times 0,4 = 10 \text{ Watt}$$

Berapa Jumlah Lilitan Trafo? Dari persamaan (6.20) tampak bahwa perbandingan tegangan sekunder dan primer pada trafo semata-mata bergantung pada perbandingan jumlah lilitan. Jika menginginkan tegangan sekunder dua kali tegangan primer maka jumlah lilitan sekunder dua kali lebih banyak daripada gulungan primer? Tetapi berapa banyak? Apakah mungkin sekunder sebanyak 10 kali dan primer sebanyak 5 kali? Atau lilitan sekunder 50 kali dan lilitan primer sebanyak 25 kali? Keduanya menghasilkan perbandingan jumlah lilitan 2:1. Tetapi jika itu yang digunakan apakah trafo bisa operasional? Kalau kita buka lilitan yang ada pada trafo kita akan melihat bahwa jumlah lilitan sangat banyak. Bukan puluhan lilitan, namun ratusan lilitan, atau bahkan ribuan lilitan. Bisa saja untuk menaikkan tegangan menjadi dua kali maka jumlah lilitan primer 500 dan jumlah lilitan sekunder 1000, bukan 5 dan 10. Mengapa harus sebanyak itu?

Jawabannya adalah tergantung pada daya yang akan dialirkan trafo. Ketika kumparan primer trafo dihubungkan ke tegangan listrik maka muncul arus listrik dalam kumparan tersebut. Besarnya arus listrik bergantung pada tahanan yang dimiliki kumparan. Misalkan tahanan kumparan adalah R maka arus listrik yang mengalir adalah

$$I = \frac{\Sigma_p}{R}$$

Dengan demikian, daya yang dimasukkan dalam kumparan primer adalah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

$$P = I \Sigma_p$$

$$= \frac{\Sigma_p^2}{R}$$

Berapakah hambatan kumparan trafo? Hambatan tersebut bergantung pada hambatan jenis kawat yang digunakan, panjang kawat, dan luas penampang kawat yang memenuhi persamaan

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

Dengan demikian, daya yang dimasukkan ke dalam kumparan primer dikaitkan dengan ukuran kawat kumparan adalah

$$P = \frac{\Sigma_p^2 A}{\rho L}$$

Dari sini kita dapatkan panjang kawat yang digunakan untuk membuat satu kumparan adalah

$$L = \frac{\Sigma_p^2 A}{\rho P}$$

Sebagai ilustrasi, misalkan kita membuat kumparan menggunakan kawat dengan hambatan jenis $10^{-5} \Omega\text{m}$ dan jari-jari 1 mm. Trafo tersebut menghasilkan daya 100 watt ketika dihubungkan dengan tegangan PLN 220 volt. Berapa panjang kawat lilitan primer yang digunakan? Luas penampang kawat, $A = \pi r^2 = \pi \times (0,001)^2 = 3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Dengan demikian

$$L = \frac{(220)^2 \times 3,14 \times 10^{-6}}{10^{-5} \times 100}$$

$$= 152 \text{ meter}$$

Jika ingin menghasilkan tegangan sekunder dua kali lebih

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

besar maka panjang kawat pada lilitan sekunder sekitar 304 meter. Total panjang kawat yang digunakan untuk membuat trafo sekitar 456 meter!

6.12 Topik Khusus

6.12.1 Pabrik Aluminium

Sejumlah industri menggantungkan operasionalnya pada sumber tenaga listrik. Listrik yang dibutuhkan industri umumnya sangat besar. Sebagai contoh, pabrik pembuatan aluminium yang menggunakan metode elektrolisis cairan aluminium oksida memerlukan arus listrik puluhan ribu ampere. Agar proses ini dapat berlangsung, dibutuhkan tegangan listrik kira-kira 1000 V dan arus listrik hingga 70.000 A. Bagaimana mendapatkan arus yang luar biasa besar ini? Jawabannya adalah menggunakan transformator.

Misalkan pabrik tersebut mendapat listrik dari jaringan PLN bertegangan 33.000 volt. Untuk mendapatkan tegangan kerja 1.000 volt, maka tegangan dari jaringan tersebut harus diturunkan dengan menggunakan trafo step down. Dengan asumsi efisiensi trafo 100% maka perbandingan jumlah lilitan sekunder dan primer adalah

$$\frac{N_s}{N_o} = \frac{1000}{33000} = \frac{1}{33}$$

Karena trafo dianggap memiliki efisiensi 100% maka $\eta = 100\% = 1$. Dengan demikian, perbandingan arus primer dan sekunder adalah

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_o} = \frac{1}{33}$$

Jika $I_s = 70.000$ ampere maka besar arus primer adalah

$$I_p = \frac{I_s}{33} = \frac{70000}{33} = 2121 \text{ A}$$

Nilai arus primer ini cukup besar. Tetapi jauh lebih kecil daripada 70.000 ampere yang diperlukan untuk mengelektrolisis aluminium oksida.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.31 (atas) Pabrik aluminium PT Inalum di Kuala Tanjung, Kabupaten Batubara, Sumut (thejakartatimes.com) dan (bawah) PLTA Siguragura yang menyuplai listrik ke pabrik tersebut yang berlokasi di Kabupaten Toba Samosir, Sumut (iesr.or.id)

Di Indonesia terdapat satu pabrik aluminium, yaitu PT Inalum (Indonesia Asahan Aluminium) di Sumatera Utara. Pabrik ini menggunakan hampir semua daya listrik yang dihasilkan PLTA Siguragura dengan daya sekitar 650 MW (**Gambar 6.31**). Dengan daya sebesar itu, setahun PT Inalum dapat memproduksi sekitar 275.000 ton aluminium. Jadi, berapa kira-kira energy yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 ton aluminium?

Misalkan 1 tahun pabrik beroretasi selama 335 hari (dengan asumsi

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

sekitar 1 bulan tidak beroperasi untuk keperluan pemeriksaan, istirahat, penggantian komponen). Jadi, lama waktu pabrik beroperasi selama setahun adalah $335 \times 24 \text{ jam} = 8040 \text{ jam}$. Energi listrik yang dikonsumsi selama setahun adalah $650 \text{ MW} \times 8040 \text{ jam} = 5.226.000 \text{ MWh}$. Dengan demikian, energy yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu ton aluminium sekitar $5.226.000 \text{ MWh}/275.000 \text{ ton} = 17,5 \text{ MWh/ton}$. Ini adalah energy yang sangat besar. Sebagai ilustrasi, satu rumah tangga misalnya memasang listrik dengan daya $1.300 \text{ Watt} = 1,3 \text{ kW}$. Dalam 1 jam energi yang dikonsumsi adalah $1,3 \text{ kW} \times 1 \text{ jam} = 1,3 \text{ kWh}$. Untuk menghasilkan 1 ton aluminium maka listrik di rumah tersebut harus beroperasi selama $17,4 \text{ MWh}/1,3 \text{ kWh} = 17400 \text{ kWh}/1,3 \text{ kWh} = 13.384 \text{ jam} = 558 \text{ hari} = 1 \text{ setengah tahun}$.

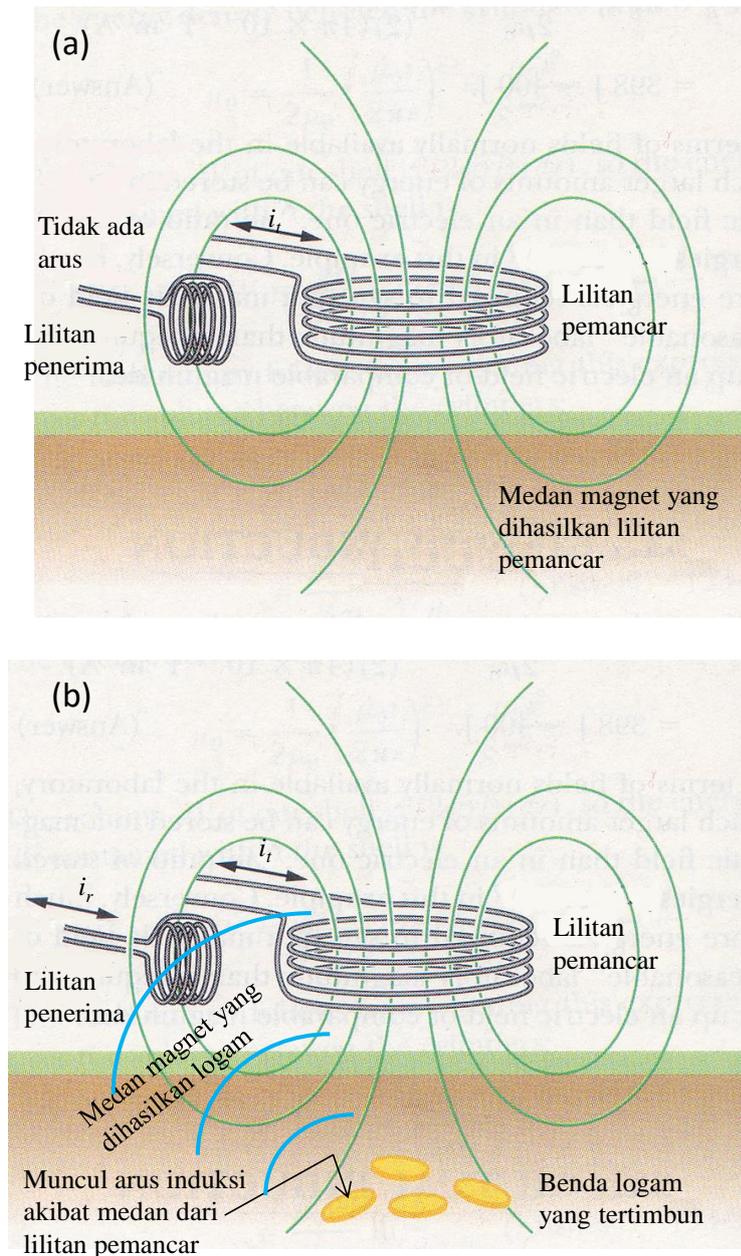
6.12.2 Detektor Logam

Ketika melakukan *check-in* di bandara, petugas bandara sering mengarahkan semacam tongkat ke arah tubuh kita. Apabila kita membawa benda yang terbuat dari logam, langsung terdengar bunyi. Hal yang sama ketika kita *check-in* di hotel, kita harus melewati pintu khusus. Dan jika kita membawa benda yang mengandung logam, langsung terdengar bunyi. Alat-lat tersebut adalah detektor logam.

Detektor logam sangat vital digunakan di bandara untuk menghindari pembajak yang membawa senjata tajam dan senjata api yang umumnya terbuat dari logam. Bagaimana sih prinsip kerja detektor logam?

Detektor logam secara prinsip terdiri dari dua buah lilitan yang tegak lurus dan lokasinya berdekatan (**Gambar 6.32**). Arus bolak-balik dialirkan ke lilitan besar sehingga dihasilkan medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu di sekitar lilitan tersebut. Tetapi, karena arah medan magnet yang dihasilkan kumparan besar masuk ke kumparan kecil dalam arah yang sejajar bidang kumparan kecil maka tidak ada fluks magnetik dalam kumparan kecil. Dengan demikian, tidak ada arus yang dihasilkan di kumparan kecil.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



Gambar 6.32 Skema detektor logam. Terdapat dua buah lilitan yang diposisikan tegak lurus. Lilitan pemancar dialiri arus bolak-balik sehingga muncul medan magnet. Karena dua lilitan tegak lurus maka medan yang masuk ke lilitan penerima memiliki arah tegak lurus permukaan lilitan tersebut sehingga fluks pada lilitan penerima akibat medan dari lilitan pemancar selalu nol, meskipun medan magnet tersebut berubah-ubah (karena arus bolak balik). (a) Jika benda di sekitar dua lilitan tidak mengganggu medan magnet maka fluks magnet pada lilitan penerima tetap nol berubah sehingga tidak muncul ggl dan tidak ada arus yang muncul di lilitan penerima. (b) Jika sensor tersebut berada di sekitar logam maka medan magnet yang berubah-ubah yang dihasilkan lilitan pemancar menginduksi munculnya arus listrik pada logam. Arus listrik yang dihasilkan juga berubah-ubah terhadap waktu. Arus listrik tersebut kemudian menghasilkan medan magnet yang arahnya tidak lagi tegak lurus penampang lilitan penerima. Lilitan penerima akhirnya memiliki fluks yang berubah-ubah terhadap waktu sehingga menghasilkan ggl induksi. Akibatnya muncul arus di lilitan penerima. Arus yang dihasilkan tersebut

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

yang digunakan untuk mengaktifkan alarm.

Jika di sekitar tempat itu terdapat logam, maka perubahan medan magnet pada kumparan besar mengimbas munculnya arus pada logam di dekatnya. Arus yang dihasilkan dalam logam menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah di sekitarnya. Medan magnet ini ada sebagian yang menembus kumparan kecil dalam arah yang tidak sejajar kumparan kecil. Akibatnya muncul fluks magnetik dalam kumparan kecil yang menyebabkan munculnya arus pada kumparan kecil. Akhirnya, arus yang dihasilkan kumparan kecil dikuatkan dan digunakan untuk membunyikan alarm.

6.12.3 PLTA di Sungai yang Tenang (Landai)

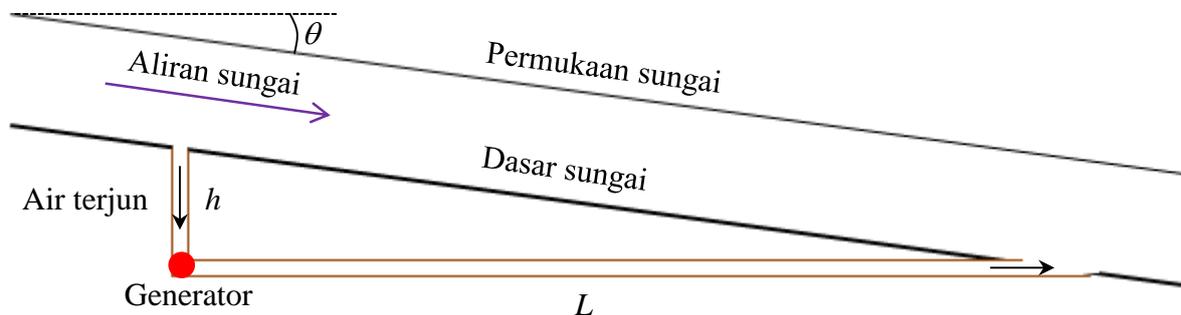
Hampir semua PLTA dibangun di sungai yang melewati gunung atau perbukitan. Hal tersebut disebabkan karena PLTA membutuhkan air dengan beda ketinggian permukaan dangat besar antara dua posisi berdekatan. Ketika sungai melewati bukit atau gunung, maka sungai dapat dibendung membentuk dam dan dari dam tersebut dibuat terowongan menuju ke generator yang dipasang di sisi sebelah dam. Karena perbedaan ketinggian permukaan yang besar maka air yang mengalir pada terowongan memiliki kecepatan sangat tinggi saat mencapai generator. Energi yang dimiliki sangat besar sehingga energy yang diserahkan ke generator juga sangat besar. Akibatnya, listrik yang dihasilkan sangat besar.

Indonesia memiliki beberapa PLTA yang memanfaatkan sungai yang melewati lokasi perbukitan. Salah satu yang terkenal adalah sungai Citarum di Jawa Barat. Di sungai ini telah dibangun tiga PLTA besar yang menyuplai listrik pada jaringan transmisi pulau Jawa-Bali, yaitu PLTA Saguling, PLTA Cirata, dan PLTA Jatiluhur. Permasalahan yang dihadapi Indonesia adalah tidak banyak sungai yang memungkinkan pembangunan PLTA karena tidak melewati perbukitan. Indonesia memiliki banyak sungai besar di pulau Sumatera dan Kalimantan, namun aliran air sangat tenang. Kita memiliki sungai Musi, Batanghari, dan Siak di pulau Sumatera serta sungai Kapuas, Barito, Kahayang di pulau Kalimantan. Sungai-sungai tersebut sangat besar, namun sungai-sungai tersebut sangat tenang dan hamper tidak mungkin membuat PLTA. Adakah cara lain membangun PLTA pada sungai yang landau? Ini adalah tantangan yang sangat menarik. Jika hal ini dapat direalisasikan maka kita dapat mengatasi persoalan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

kekurangan energy listrik di Indonesia, khususnya di pulau Sumatera dan Kalimantan yang memiliki banyak sungai besar.

Saya memiliki ide sederhana untuk membuat PLTA di sungai yang tenang. Mungkin ide ini sulit direalisasikan saat ini. Namun, mungkin dalam beberapa puluh tahun ke depan, ada teknologi yang memungkinkan cara tersebut dapat direalisasikan dengan biaya yang ekonomis. Caranya adalah membuat terowongan di dasar sungai. **Gambar 6.33** adalah ilustrasi singkat ide tersebut. Caranya adalah menggali terowongan arah vertikal di suatu lokasi di sekitar tepi sungai hingga kedalaman beberapa puluh meter dan melanjutkan dengan terowongan arah horizontal menuju ke arah hulu sungai hingga keluar dari dasar sungai sebelah hulu. Terowongan arah horizontal memang cukup panjang. Di dasar terowongan vertikal diletakkan generator. Air jatuh melalui terowongan vertikal dan memutar generator. Kemudian air yang telah memutar generator mengalir melalui terowongan horizontal dan keluar di ujung terowongan ke arah hulu. Energi air yang digunakan untuk memutar generator bergantung pada ukuran terowongan dan kedalaman terowongan.



Gambar 6.33 Ide pembuatan pembangkit listrik tenaga air di sungai yang landai. Bagian utama yang dibuat adalah terowongan vertikal dan terowongan horizontal. Generator ditempatkan di dasar terowongan vertikal.

Misalkan sungai tersebut memiliki sudut landai θ di mana sudut tersebut sangat kecil. Misalkan kedalaman terowongan vertikal adalah h . Dengan menggunakan persamaan segitiga standar maka panjang terowongan bagian horizontal adalah

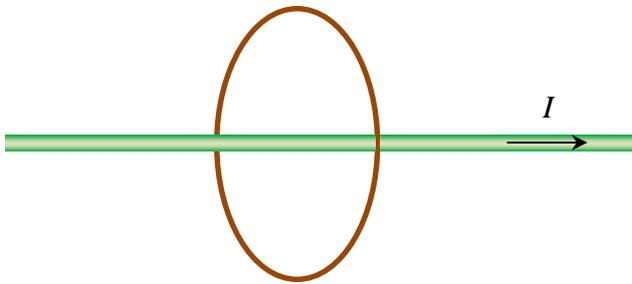
$$L = \frac{h}{\tan \theta}$$

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Sebagai contoh, kita misalkan tinggi air terjun (tinggi terowongan vertikal) adalah 75 meter dan sudut kemiringan permukaan air sungai adalah 1° maka panjang terowongan bagian vertikal adalah $L = 75/\tan 1^\circ = 4,3$ km.

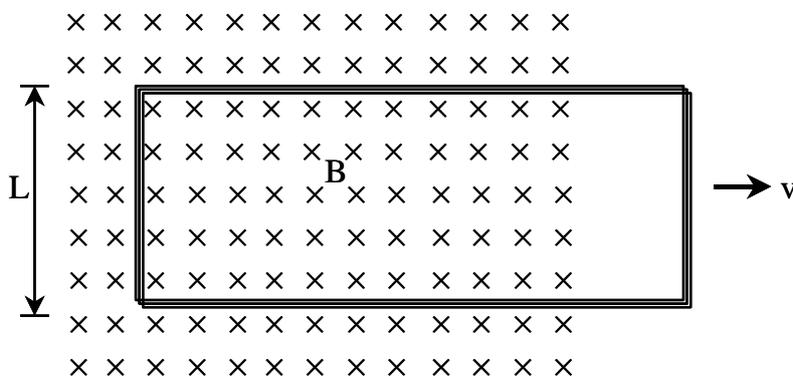
Soal-Soal

Gambar 6.34 memperlihatkan sebuah kawat lurus panjang yang dilalui arus I . Sebuah cincin ditempatkan secara konsentris di sekitar kawat tersebut. Jika arus berubah terhadap waktu, berapa ggl yang dihasilkan pada kumparan?



Gambar 6.34 Gambar untuk soal ***

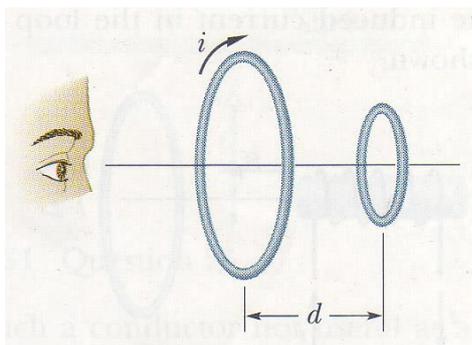
Anggap loop pada **Gambar 6.35** terbuat dari tembaga mengandung 85 lilitan. Misalkan $L = 13$ cm, $B = 1,5$ T, $R = 6,2$ Ω , dan $v = 18$ cm/s. a) Berapa ggl induksi yang muncul pada kumparan? b) berapa arus induksi? c) Berapa gaya yang kamu lakukan pada koil agar tetap bergerak ke kanan? d) Berapa daya yang dikeluarkan untuk menggerakkan loop?



Gambar 6.35 Gambar untuk soal ***

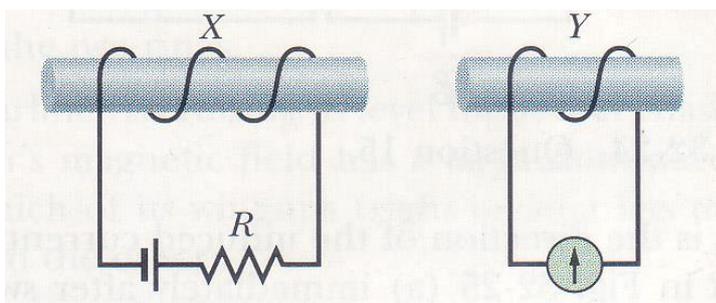
Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Dua cincin konduktor diletakkan koaksial pada jarak d (**Gambar 6.36**). Seorang pengamat melihat ke dua cincin tersebut melalui sumbunya dari sisi kiri cincin besar. Tiba-tiba arus dalam arah sesuai dengan putaran jarum jam muncul pada cincin pertama. (a) ke mana arah arus induksi pada cincin kedua? (b) ke mana arah gaya pada cincin kecil andaikata gaya tersebut ada?



Gambar 6.36 Gambar untuk soal ***

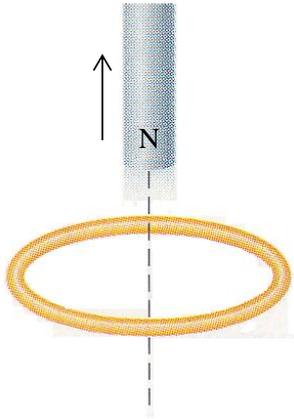
Ke mana arah arus induksi pada kumparan Y dalam **Gambar 6.37** jika (a) kumparan Y digerakkan mendekati kumparan X, (b) arus pada kumparan X dikecilkan dengan tetap mempertahankan jarak antara dua kumparan



Gambar 6.37 Gambar untuk soal **

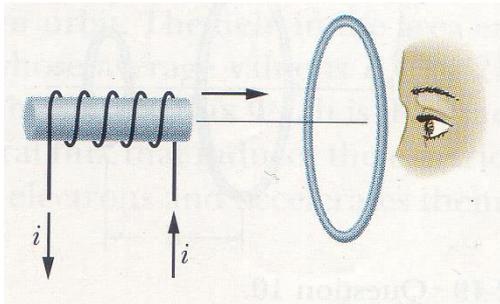
Kutub utara suatu magnet ditarik menjauhi sebuah cincin tembaga seperti pada **Gambar 6.38**. Ke manakah arah arus induksi yang mengalir dalam cincin?

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi



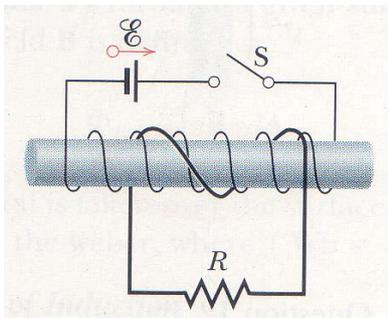
Gambar 6.38 Gambar untuk soal ***

Sebuah solenoid pendek yang sedang dialiri arus searah bergerak mendekati sebuah cincin tembaga seperti pada **Gambar 6.39**. Ke mana arah arus induksi pada cincin tembaga menurut pengamat?



Gambar 6.39 Gambar untuk soal **

Ke mana arah arus induksi pada hambatan R dalam **Gambar 6.40** (a) tepat setelah saklar S ditutup, (b) beberapa saat setelah saklar R ditutup, dan (c) tepat setelah saklar S dibuka kembali



Gambar 6.40 gambar untuk soal ***

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Sebuah loop kawat dengan diameter 9,2 cm mula-mula diorientasi tegak lurus medan magnet 1,5 T. Loop tersebut kemudian dirotasi sehingga sejajar dengan medan magnet dalam waktu 0,20 s. Berapakah emf rata-rata yang diinduksi dalam loop tersebut?

Medan magnet yang tegak lurus pada loop berbentuk lingkaran dengan diameter 13,2 cm berkurang secara teratur dari 0,750 T menjadi nol. Jika diameter kawat adalah 2,25 mm, berapa jumlah muatan yang mengalir pada loop selama perubahan medan tersebut? Hambat jenis kawat tembaga adalah $1,68 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

Sebuah generator mobil dalam keadaan idle berotasi dengan kecepatan 1000-rpm dan menghasilkan tegangan 12,4 V. Berapa tegangan yang dihasilkan jika generator berputar dengan kecepatan sudut 2500-rpm?

Jika arus di dalam kumparan 120 mH berubah dari 25,0 A menjadi 10,0 A dalam waktu 350 ms, ke mana arah arus induksi yang dihasilkan dan berapa besar ggl induksi yang dihasilkan

Berapa induktansi sebuah kumparan jika kumparan tersebut menghasilkan ggl 8,50 volt jika arus berubah dari $-28,0 \text{ mA}$ menjadi $+31,0 \text{ mA}$ dalam waktu 42,0 ms?

Sebuah kumparan memiliki hambatan $2,25 \Omega$ dan induktansi 400 mH. Jika arus 3,0 A mengalir dalam kumparan tersebut dan sedang bertambah nilainya dengan laju 3,5 A/s, berapa beda potensial antara dua ujung kumparan pada saat ini?

Pada suatu saat arus yang mengalir melalui induktor adalah 50,0 mA. Arus tersebut sedang mengalami pertambahan dengan laju 100 mA/s. Berapa energi mula-mula yang tersimpan dalam induktor jika induktansinya adalah 60,0 mH? Berapa lama waktu yang diperlukan agar energi meningkat sepuluh kali nilai awal?

Sebuah koil lingkaran memiliki jari-jari 10,0 cm dan mengandung 30 lilitan. Sebuah medan magnet eksternal dikenakan tegak lurus penampang koil sebesar 2,60 mT. (a) Jika tidak ada arus yang mengalir pada koil, berapakah

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

fluks magnetik yang dilingkupi koil? (b) Jika arus 3,80 A dialirkan pada koil dalam arah tertentu, fluks total yang dilingkupi koil nol. Berapakah induktansi koil?

Sebuah solenoid terdiri dari lilitan kawat tembaga (diameter 2,5 mm). Diameter solenoid adalah 4,0 cm dan panjangnya 2,0 m.

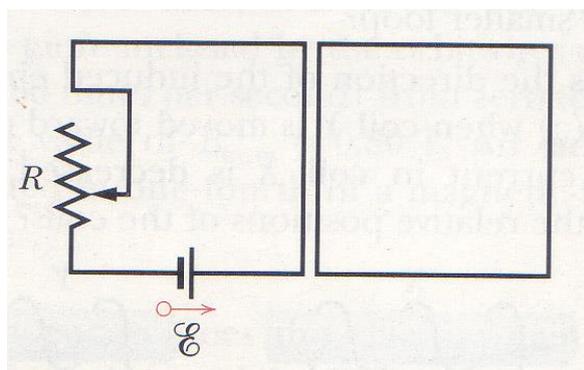
- Berapa jumlah lilitan solenoid tersebut?
- Berapa induktansi per meter solenoid tersebut? Anggap lilitan yang berdekatan bersentuhan dan hanya dipisahkan oleh bagian tipis isolator.

Energi medan magnet yang tersimpan di dalam suatu induktor adalah 25,0 mJ jika dialiri arus 60,0 mA. A) Hitunglah induktansi. B) Berapa arue yang mengalir agar energi yang tersimpan menjadi empat kali lebih besar?

Dapatkah sebuah partikel bermuatan yang berada dalam keadaan diam dijadikan bergerak dengan menggunakan medan magnet? Berikan alasan jika dapr dan berikan pula alsan jika tidak dapat.

Jika sebuah magnet batang bergerak dalam rongga solenoid yang sangat panjang, apakah dihasilkan ggl induksi pada solenoid? Jelaskan jawabanmu.

Hambatan R pada loop sebelah kiri seperti pada **Gambar 6.41** diperbesar. Ke mana arah arus induksi pada look sebelah kanan?

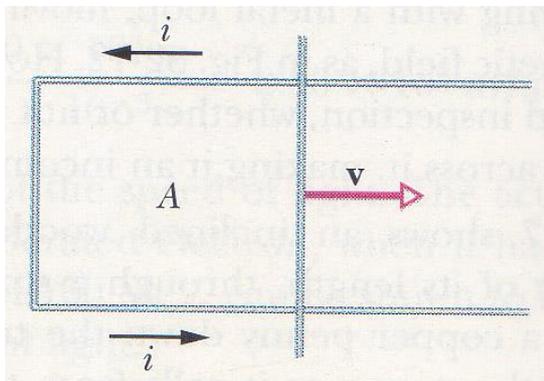


Gambar 6.41 Gambar untuk soal ***

Pada **Gambar 6.42**, batang digerakkan ke kanan dengan kecepatan konstan v . Arus induksi muncul dalam loop dalam arah seperti pada gambar.

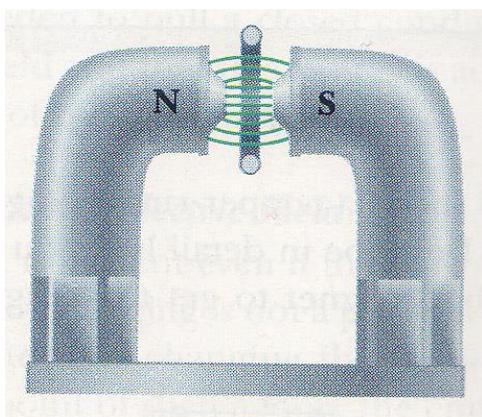
Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Ke manakah arah medan magnet di daerah A?



Gambar 6.42 Gambar untuk soal ***

Loop konduktor pada **Gambar 6.43** ditarik keluar dari medan magnet permanen secara vertikal. (a) Ke manakah arah arus induksi dalam loop? (b) apakah gaya diperlukan untuk menarik loop tersebut?



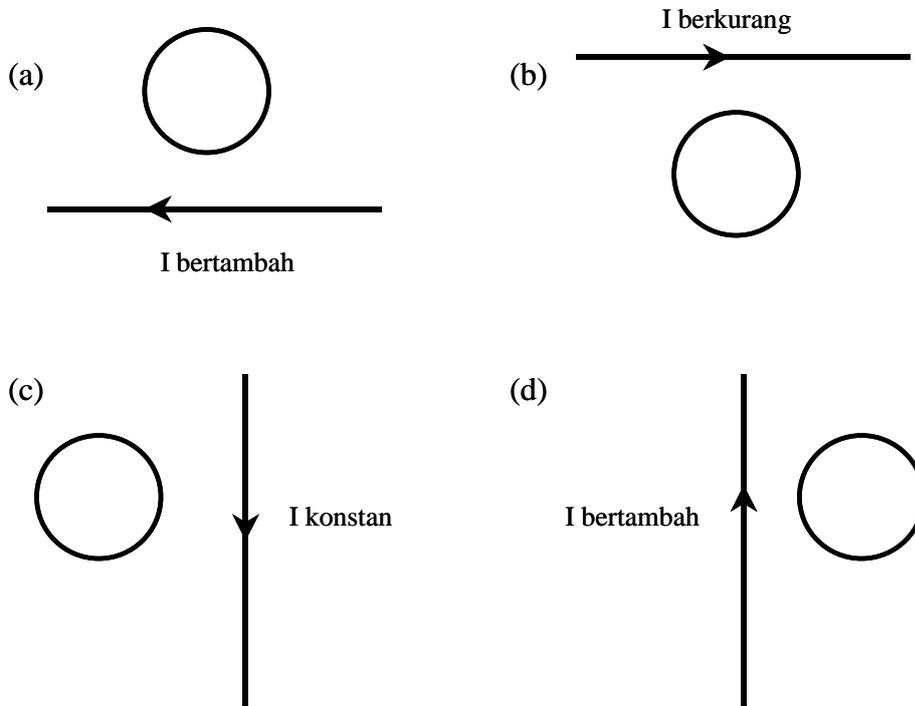
Gambar 6.43 Gambar untuk soal ***

Sebuah loop berbentuk lingkaran memiliki jari-jari 16 cm. Loop tersebut ditarik keluar dari medan magnet sebesar 1,10 T selama 0,15 s. Berapa ggl induksi rata-rata yang dihasilkan?

Sebuah kawat loop berbentuk lingkaran dengan jari-jari 7,2 cm diletakkan tegak lurus medan magnet yang besarnya 0,63 T dan berarah ke atas. Selama selang waktu 0,15 s berikutnya, medan magnet tersebut sudah berubah arah menjadi ke bawah dan besarnya 0,25 T. Berapa ggl yang dihasilkan dalam loop?

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Ke manakah arah arus induksi yang dihasilkan pada masing-masing loop lingkaran pada **Gambar 6.44**?



Gambar 6.44 Gambar untuk soal ***

Medan magnet yang tegak lurus loop lingkaran yang berjari-jari 20 cm berubah dari +0,52 T menjadi -0,52 T dalam waktu 180 ms. Tanda + menyatakan medan yang menjauhi pengamat dan tanda - menyatakan medan yang mengarah ke pengamat. (a) berapa tegangan induksi yang dihasilkan? (b) ke mana arah arus induksi yang dihasilkan?

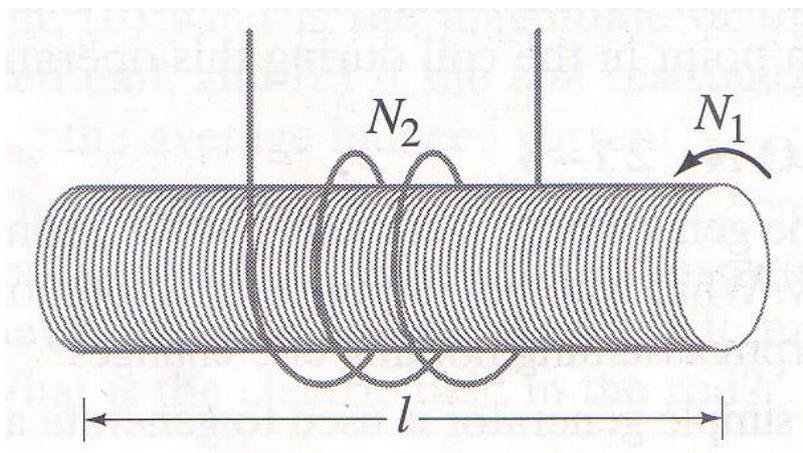
Sebuah loop lingkaran yang berada pada bidang kertas ditembusi medan magnet sebesar 0,75 T yang berarah dari depan ke belakang kertas. Jika diameter loop berubah dari 20,0 cm menjadi 6,0 cm dalam waktu 0,5 s, (a) ke mana arah arus induksi yang dihasilkan, dan (b) berapa ggl induksi yang dihasilkan?

Sebuah generator sederhana memiliki loop berbentuk persegi yang terdiri dari 720 lilitan. Panjang sisi lilitan adalah 21,0 cm. Berapa kecepatan sudut rotasi generator tersebut agar dihasilkan tegangan puncak 120 V jika kuat medan magnet dalam generator adalah 0,650 T?

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Sebuah solenoid panjang memiliki jari-jari 25 mm dan mengandung 100 lilitan per cm. Kawat loop tunggal dengan jari-jari 5,0 cm ditempatkan di keliling solenoid sehingga sumbu loop dan sumbu solenoid berimpit. Arus dalam solenoid diperkecil dari 1,0 A menjadi 0,5 A dalam waktu 10 ms. Berapa ggl induksi yang muncul pada loop?

Sebuah solenoid kecil memiliki panjang ℓ , luas penampang A dan jumlah lilitan N_1 . Di keliling solenoid tersebut dililitkan kawat lain sejumlah N_2 lilitan (lihat **Gambar 6.45**). Anggap semua fluks dari solenoid kecil masuk ke kumparan besar. Tentukan induktansi bersama.



Gambar 6.45 Gambar untuk soal ***

Kawat yang terlilit secara kuat dalam sebuah solenoid dilepas untuk membuat solenoid lain dengan diameter dua kali lebih besar daripada solenoid semula. Dengan factor berapakah induktansi berubah?

Anggap bahwa rata-rata kuat medan magnet di permukaan bumi adalah $0,50 \times 10^{-4}$ T. Perkirakan jumlah total energi magnetik yang tersimpan di daerah sekitar permukaan bumi hingga ketebalan 10 km.

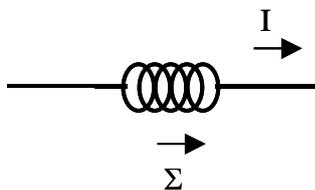
Berapa induktansi L sebuah kumparan yang panjangnya 0,6 m dan diameter 2,9 cm dan mengandung 10 000 lilitan jika rongga kumparan tersebut adalah udara?

Berapa jumlah lilitan kawat yang diperlukan untuk menghasilkan induktansi 100 mH jika panjang lilitan tersebut adalah 30,0 cm, diameternya 5,3 cm dan rongganya berisi udara.

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

Sebuah kumparan berbentuk silinder memiliki 3000 lilitan. Panjang kumparan tersebut adalah 28,2 cm dan diameternya 2,5 cm. Berapa induktansi dirinya? Berapa lilitan yang diperlukan untuk menghasilkan induktansi yang sama jika di dalam rongganya dimasukkan teras besi. Anggap permeabilitas teras besi adalah 1000 kali permeabilitas udara.

Pada suatu saat arus dan emf di dalam sebuah induktor ditunjukkan oleh **Gambar 6.46**.



Gambar 6.46 gambar untuk soal ***

- Apakah arus sedang bertambah atau berkurang?
- Jika emf adalah 17 V dan laju perubahan arus adalah 25 A/s, berapakah induktansi?

Sebuah solenoid panjang memiliki 100 lilitan/cm dan jari-jari 1,6 cm. Anggap medan magnet yang dihasilkan sejajar sumbu solenoid.

- Berapa induktansi per satuan panjang?
- Jika arus berubah dengan laju 13 A/s, berapa ggl induksi yang dihasilkan?

Sebuah induktor yang dililit rapat menghasilkan emf 3,0 mV ketika arus berubah dengan laju 5,0 A/s. Arus tetap 8,0 A yang mengalir pada induktor tersebut menghasilkan fluks 40 μ Wb pada tiap lilitan.

- Berapa induktansi induktor tersebut?
- Berapa jumlah lilitan induktor tersebut?

Sebuah toroid 90,0 mH melingkupi volum 0,0200 m³. Jika kerapatan energi rata-rata dalam toroid adalah 70,0 J/m³, berapa arus yang mengalir pada toroid tersebut?

Berapakah kuat medan listrik agar kerapatan energi listrik sama dengan

Bab 6 GGL Induksi dan Induktansi

kerapatan energi magnetik yang kuat medannya 0,50 T?

Kuat medan magnet dalam ruang antar galaksi sekitar 10^{-10} T. Berapa energi yang tersimpan dalam ruang berbentuk kubus dengan panjang sisi 10 tahun cahaya?

Sebuah loop lingkaran dengan jari-jari 50 mm dilalui arus 100 A. a) Cari medan magnet di pusat loop. B) Hitung kerapatan energi di pusat loop.

Sebuah trafo dengan efisiensi 90% memiliki 500 lilitan primer dan 10 lilitan sekunder. A) Jika tegangan pada lilitan primer 120 V berapa tegangan pada lilitan sekunder? B) Jika lilitan sekunder dihubungkan dengan hambatan 15Ω , berapa arus pada lilitan sekunder dan lilitan primer?

Sebuah solenoid yang panjangnya 85,0 cm memiliki luas penampang $17,0 \text{ cm}^2$. Pada solenoid tersebut ada 950 lilitan yang dialiri arus 6,60 A. a) Hitunglah kerapatan energi magnetik dalam solenoid. B) Cari energi total yang tersimpan dalam solenoid

Sebuah generator memberikan tegangan 100 V ke lilitan primer sebuah transformator. Jumlah lilitan primer transformator adalah 50 dan jumlah lilitan sekunder adalah 500. Berapa tegangan keluaran pada lilitan sekunder?