

Nama : TRI WULANDARI

NPM : 2123025009

Tugas Elektrodinamika

Tuliskan konsep analog yang bersesuaian.

- **Konsep Medan Magnet**

Medan magnet oleh muatan bergerak

Konsep Analog

Gaya Lorentz adalah gaya yang dilakukan oleh medan magnet pada muatan listrik yang sedang bergerak. Kita dapat menurunkan persamaan gaya Lorentz untuk muatan yang bergerak dari persamaan gaya Lorentz untuk arus pada kawat. Telah kita bahas, gaya Lorentz pada kawat yang dialiri arus listrik adalah $\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$. Jika bagian kawat yang dikenai medan magnet adalah $\Delta\vec{L}$ maka gaya Lorentz yang dihasilkan adalah $\vec{F} = I\Delta\vec{L} \times \vec{B}$. Tetapi, kita tahu definisi arus listrik sama dengan muatan yang mengalir per satuan waktu, atau $I = \frac{q}{\Delta t}$ dengan Δt adalah selang waktu dan q adalah muatan yang mengalir dalam selang waktu tersebut. Selanjutnya kita dapat menulis gaya Lorentz pada kawat berarus listrik sebagai berikut. $\vec{F} = \left(\frac{q}{\Delta t}\right) \Delta\vec{L} \times \vec{B} = q \left(\frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t}\right) \times \vec{B}$

Tetapi, $\frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t}$ adalah elemen panjang per satuan waktu yang merupakan definisi kecepatan dan tidak lain merupakan kecepatan muatan, atau $\frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t} = \vec{v}$ Akhirnya, kita peroleh ungkapan gaya Lorentz untuk muatan yang bergerak sebagai berikut $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$. Besarnya gaya lorentz menjadi $\vec{F} = qvB \sin\theta$ dengan θ adalah sudut antara vector $\vec{v}$ dan vector $\vec{B}$.

- **Konsep Medan Magnet**

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times \hat{r}}{r^2} = k \frac{qv \times \hat{r}}{r^2}$$

Konsep Analog

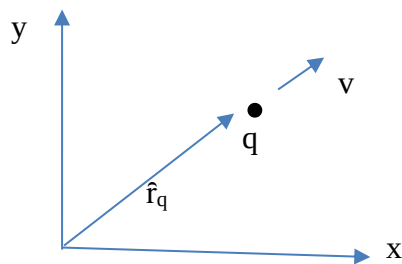
Medan magnet yang dihasilkan oleh muatan titik yang bergerak

Semua muatan listrik yang bergerak akan menghasilkan medan magnet

Kasus: muatan listrik q bergerak dengan kecepatan v

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times \hat{r}}{r^2}$$

Dimana $\hat{r}$ merupakan titik peninjau dimana medan magnet tersebut timbul.



dengan koordinat tersebut, dapat diketahui posisi q di dalam ruang.

$\hat{r}_q$ adalah vektor yang menunjukkan posisi q di dalam ruang.

- **Konsep Medan Magnet**

Medan magnet oleh arus listrik

Konsep Analog

Magnet tidak hanya melakukan gaya pada magnet lain, tetapi juga dapat melakukan gaya pada arus listrik. Jika kawat yang dialiri arus listrik ditempatkan dalam medan magnet, maka kawat tersebut mendapat gaya dari magnet. Besar dan arah gaya yang dialami kawat yang dialiri arus listrik dalam medan magnet diberikan oleh hukum Lorentz

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}.$$

dengan

$\vec{F}$ = gaya yang dialami kawat berarus listrik (N),

I = besar arus listrik (A),

$\vec{B}$ = vektor medan magnet (T),

$\vec{L}$ = vektor panjang kawat yang dikenai medan magnet (m).

Besar vektor $\vec{L}$ sama dengan bagian panjang kawat yang dikenai medan magnet saja sedangkan arahnya sama dengan arah arus dalam kawat. Karena perkalian silang dua vector menghasilkan vector baru yang tegak lurus dua vector tersebut maka arah gaya

Lorentz tegak lurus vector $\vec{L}$ dan vector $\vec{B}$. Dengan kata lain, jika kita membuat bidang datar di mana vector $\vec{L}$ dan vector $\vec{B}$ berada pada bidang tersebut maka vector gaya berarah tegak lurus bidang tersebut.

Besarnya gaya Lorentz yang dialami kawat berarus listrik dapat ditulis

$$F = ILB \sin\theta$$

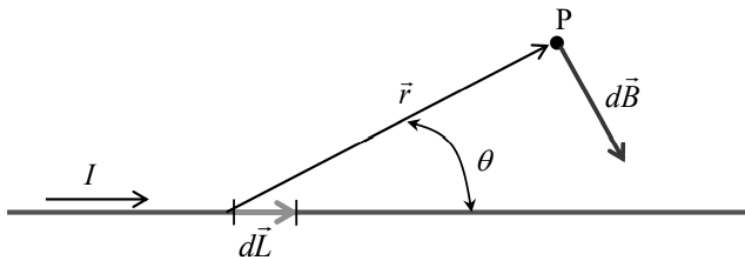
dengan θ adalah sudut antara vector $\vec{v}$ dan vector $\vec{B}$.

- **Konsep Medan Magnet**

Medan magnet pada kawat lurus panjang

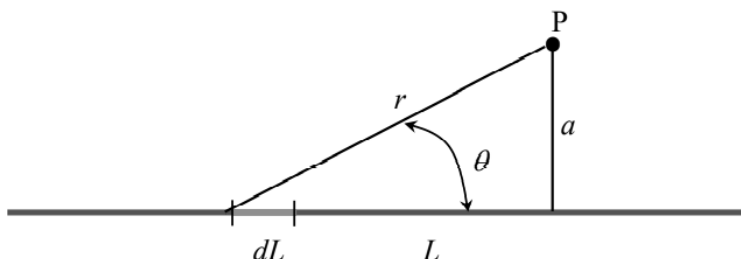
Konsep Analog

Untuk medan magnet dari kawat lurus panjang, dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5.2 Kuat medan magnet yang dihasilkan oleh elemen dari kawat lurus panjang

Untuk memudahkan perhitungan, kita dapat langsung menggunakan persamaan bentuk scalar. Kita melakukan perhitungan besarnya medan dahulu. Setelah medan diperoleh baru menentukan arahnya. Pada ruas kanan pada gambar di bawah, baik dL , r , maupun $\sin \theta$ merupakan variable. Agar integral dapat dikerjakan maka ruas kanan hanya boleh mengandung satu variable. Oleh karena itu kita harus menyatakan dua variable lain ke dalam salah satu variable saja. Untuk hal ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5.3 Variabel-variabel integral pada persamaan (5.3). Jarak tegak lurus titik P ke kawat adalah a dan proyeksi vector $\vec{r}$ sepanjang kawat adalah L .

Jarak tegak lurus titik P ke kawat adalah a dan proyeksi vector $\vec{r}$ sepanjang kawat adalah L . Tampak dari gambar di atas bahwa

$$r = \sqrt{L^2 + a^2}$$

$$\sin\theta = \frac{a}{r}$$

Dengan demikian, persamaan Biot-Savart dapat ditulis menjadi

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dL}{(L^2 + a^2)} \times \frac{a}{\sqrt{L^2 + a^2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \int \frac{dL}{(L^2 + a^2)^{3/2}}$$

Sekarang kita menentukan batas integral. Karena kawat memiliki panjang tak berhingga maka salah satu ujung berada pada posisi $-\infty$ dan ujung lain berada pada posisi $+\infty$. Dengan demikian batas integral adalah dari $-\infty$ sampai $+\infty$. Medan magnet yang dihasilkan menjadi

$$B = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dL}{(L^2 + a^2)^{3/2}}$$

Untuk menghitung integral di atas, kita gunakan Integral Calculator pada Wolfram Alpha. Kita dapatkan

$$B = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \left[\frac{L}{a^2 \sqrt{L^2 + a^2}} \right]_{-\infty}^{+\infty}$$

$$B = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \left[\left(\frac{\infty}{a^2 \sqrt{\infty^2 + a^2}} \right) - \left(\frac{\infty}{a^2 \sqrt{(-\infty)^2 + a^2}} \right) \right]$$

$$B = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \left[\left(\frac{\infty}{a^2 \times \infty} \right) - \left(\frac{\infty}{a^2 \times \infty} \right) \right]$$

$$B = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \left[\frac{1}{a^2} - \left(-\frac{1}{a^2} \right) \right]$$

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

Tampak bahwa besar medan magnet yang dihasilkan kawat lurus panjang di suatu titik sebanding dengan kuat arus dan berbanding terbalik dengan jarak terdekat titik tersebut ke kawat.

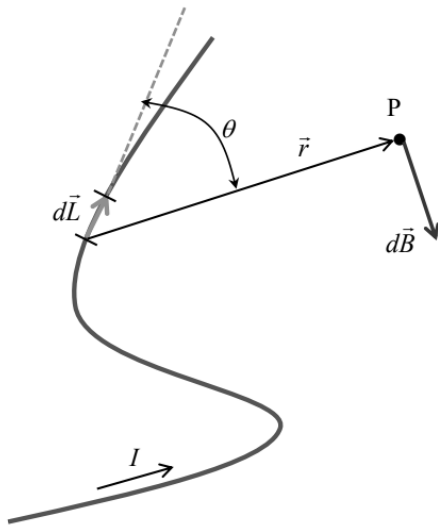
- **Konsep Medan Magnet**

Hukum Biot Savart

Konsep Analog

Besarnya medan magnet di sekitar arus listrik dapat ditentukan dengan hukum Biot-Savart. Misalkan kita memiliki sebuah kawat konduktor yang dialiri arus I . Ambil elemen kecil kawat tersebut yang memiliki panjang dL . Arah dL sama dengan arah arus. Elemen

kawat tersebut dapat dinyatakan dalam notasi vector $d\vec{L}$. Misalkan kita ingin menentukan medan magnet pada posisi P dengan vector posisi $\vec{r}$ terhadap elemen kawat. Perhatikan gambar di bawah ini agar terlihat lebih jelas.



Gambar 5.1 Elemen kawat yang dialiri arus listrik menghasilkan medan magnet di sekitarnya. Medan magnet total di suatu titik samam dengan jumlah medan magnet yang dihasilkan oleh semua elemen tersebut. Karena medan magnet adalah besaran vector maka penjumlahan dilakukan secara vector.

Kuat medan magnet di titik P yang dihasilkan oleh elemen $d\vec{L}$ saja diberikan oleh hukum Biot-Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3}$$

Dengan

μ_0 disebut permeabilitas magnetic vakum = $4\pi \times 10^{-7}$ T m/A.

Dari bentuk ruas kanan menjadi jelas bahwa arah medan magnet yang dihasilkan satu elemen tegak lurus bidang yang dibentuk elemen tersebut dengan vector jarak dari elemen ke posisi pengamatan.

Persamaan di atas adalah medan yang dihasilkan oleh satu elemen saja. Medan total yang dihasilkan oleh semua elemen sepanjang kawat diperoleh dengan melakukan inetgral persamaan di atas menjadi

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3}$$

Kalau kita ingin hitung besarnya saja (nilai scalar) maka medan magnet yang dihasilkan seluruh bagian kawat, maka persamaannya dapat ditulis dengan

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{dL \sin\theta}{r^2}$$

Dengan

θ adalah sudut antara elemen dengan vector jarak yang mengarah ke posisi pengamatan.

Sudut tersebut tidak konstan tetapi bergantung pada orientasi elemen sepanjang kawat. Dengan kata lain sudut tersebut merupakan fungsi jarak sepanjang kawat.

- **Konsep Medan Magnet**

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} = k \int \frac{idl \times \hat{r}}{r^2}$$

Konsep Analog

Hukum Biot Savart

Jika terdapat partikel bermuatan positif q bergerak dengan kecepatan v , maka partikel tersebut akan menghasilkan medan magnet akibat muatan listrik yang bergerak sebesar r dan vektornya searah dengan jarak r

Medan magnetnya:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^2}$$

Dari konsep tersebut, Biot Savart menggunakannya dalam menentukan medan magnet akibat muatan listrik yang bergerak pada kawat konduktor.

Misal akan menentukan medan magnet dari bagian kecil kawat konduktor tersebut,

Rapat arus

$$j = n \cdot q \cdot v$$

$$I/A = n \cdot q \cdot v$$

$$v = I/n \cdot q \cdot A$$

$$dQ = n \cdot q \cdot dv$$

$$dQ = n \cdot q \cdot A \cdot dl$$

dengan v adalah volume

kemudian

Substitusikan

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dQ \vec{v} \times \vec{r}}{r^2}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{n \cdot q \cdot A \cdot dl \vec{v} \times \vec{r}}{r^2}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{n \cdot q \cdot A \cdot \vec{v} (dl \times \vec{r})}{r^2}$$

Substitusikan v

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{n \cdot q \cdot A \cdot \frac{I}{n \cdot q \cdot A} dl \times \vec{r}}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{dl \times \vec{r}}{r^2}$$

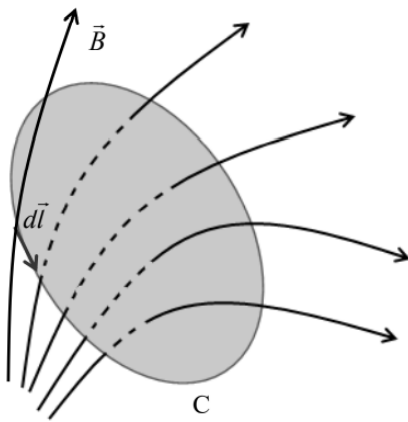
Hukum biot savart untuk menentukan medan magnet di sebuah titik yang diakibatkan oleh arus listrik yang mengalir pada kawat konduktor

- **Konsep Medan Magnet**

Hukum Ampere

Konsep Analog

Misalkan di suatu ruang terdapat medan magnet $\vec{B}$. Di dalam ruang tersebut kita buat sebuah lintasan tertutup C yang sembarang seperti Gambar di bawah ini. Bentuk lintasan bebas, asal tertutup.



Gambar 5.35 Lintasan tertutup sembarang yang kita simbolkan dengan C dalam ruang yang mengandung medan magnet.

Kita perhatikan elemen lintasan $d\vec{l}$. Anggap kuat medan magnet pada elemen lintasan tersebut adalah $\vec{B}$. Integral perkalian titik $\vec{B}$ dan $d\vec{l}$ dalam lintasan tertutup C memenuhi

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$

Dengan

$\sum I$ = jumlah total arus yang dilingkupi C

$\oint$ = menyatakan bahwa integral harus dikerjakan pada sebuah lintasan tertutup.

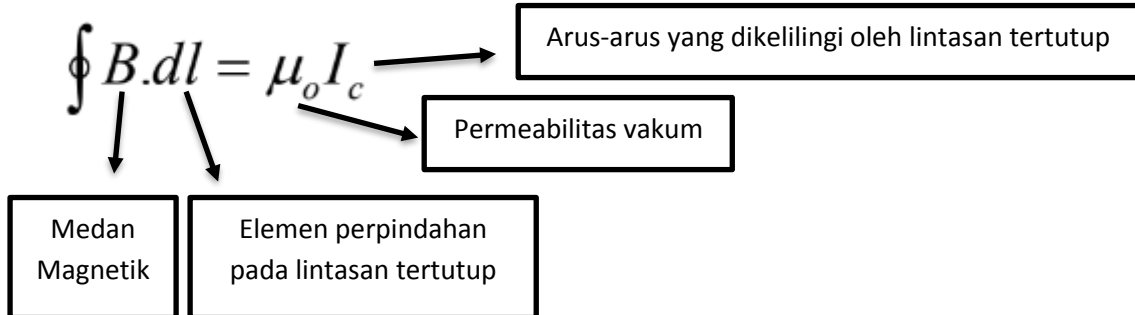
Perlu diperhatikan bahwa yang dikalikan dengan $d\vec{l}$ adalah medan magnet yang berada pada lintasan, bukan medan magnet di dalam atau di luar lintasan. Jika di dalam lintasan medan magnet tidak nol, namun sepanjang lintasan medan magnet nol maka integral tersebut hasilnya nol.

Persamaan tersebut dikenal dengan hukum Ampere dalam bentuk integral. Bentuk lain hukum Ampere yang ekuivalen dengan persamaan tersebut adalah bentuk diferensial.

- Konsep Medan Magnet

$$\oint B \cdot dl = \mu_o I_c$$

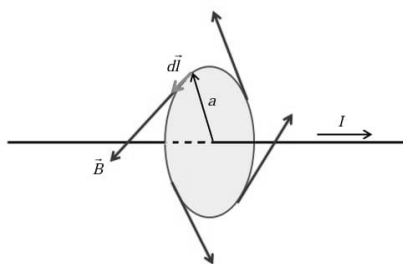
Konsep Analog



Hukum Ampere dapat digunakan untuk mencari kuat medan listrik di sekitar kawat lurus panjang. Dalam menerapkan hukum ini, beberapa langkah standar yang harus dilakukan adalah:

1. Pilih lintasan tertutup sedemikian rupa sehingga
 - Kuat medan magnet pada berbagai titik di lintasan konstan
 - Vektor medan magnet dan vektor elemen lintasan selalu membentuk sudut yang konstant untuk semua elemen lintasan.
2. Cari $\sum I$, yaitu jumlah total arus yang dilingkupi lintasan ampere.

Untuk kawat lurus panjang, lintasan yang memenuhi kriteria di atas adalah sebuah lingkaran yang sumbunya berimpit dengan kawat tersebut seperti diilustrasikan pada Gambar di bawah ini.



Beberapa informasi yang dapat kita peroleh adalah:

1. Berdasarkan aturan tangan kanan, medan magnet selalu menyinggung lintasan.
2. Elemen vektor $\vec{dl}$ juga menyinggung lintasan.

Jadi pada titik-titik di lintasan ampere, vector $\vec{B}$ dan $\vec{dl}$ selalu sejajar sehingga sudut θ antara $\vec{B}$ dan $\vec{dl}$ nol. Dengan demikian,

$$\vec{B} \cdot \vec{dl} = B \, dl \cos \theta = B \, dl \cos 0^\circ = B \, dl$$

dan

$$\oint_s \vec{B} \cdot \vec{dl} = \oint_s B \cdot dl$$

Karena pada tiap titik di lintasan besar medan magnet konstan, maka B dapat ditarik keluar dari integral. Kita dapatkan

$$\begin{aligned} \oint_s B \cdot dl &= B \oint_s dl \\ &= B \times (\text{keliling lingkaran}) \\ dl &= B \times (2\pi a) \end{aligned}$$

Selanjutnya kita cari jumlah arus yang dilingkupi lintasan Ampere. Karena yang dilingkupi lintasan Ampere hanya satu kawat, dan kawat tersebut dialiri arus I, maka

$$\sum I = I$$

Akhirnya, substitusi persamaan-persamaan di atas ke dalam persamaan diperoleh

$$B \times (2\pi a) = \mu_0 I$$

atau

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

3. Konsep Medan Magnet

Medan magnet oleh kawat melingkar

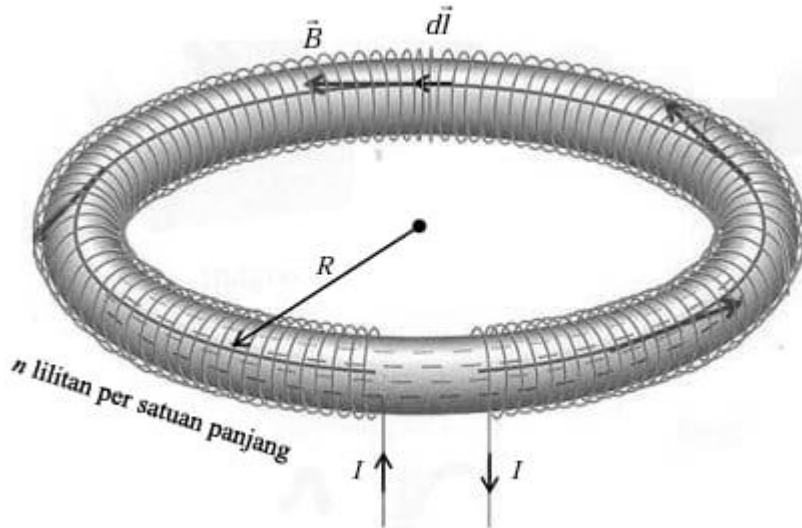
Konsep Analog

4. Konsep Medan Magnet

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi RI}{(R^2 + Z^2)}$$

Konsep Analog

Misalkan jumlah lilitan per satuan panjang yang dimiliki toroid adalah n . Arus yang mengalir pada toroid adalah I . Untuk menentukan kuat medan magnet di dalam rongga toroid, kita buat lintasan Ampere berbentuk lingkaran yang melalui rongga toroid seperti pada gambar di bawah ini.



Jika kita misalkan jari-jari toroid adalah R maka keliling toroid adalah $K = 2\pi R$. Sepanjang lintasan Ampere, vektor $\vec{B}$ dan $d\vec{l}$ selalu sejajar sehingga sudut θ antara $\vec{B}$ dan $d\vec{l}$ nol. Jadi, $\vec{B} \cdot d\vec{l} = B dl \cos \theta = B dl \cos 0^\circ = B dl$. Dengan demikian kita dapatkan

$$\begin{aligned}\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \oint B dl \\ &= B \oint dl \\ &= B \times (\text{keliling lingkaran}) \\ &= B \times (2\pi R)\end{aligned}$$

Karena jumlah lilitan yang dilingkupi lintasan Ampere adalah N maka jumlah arus yang dilingkupi lintasan ini adalah

$$\sum I = NI = 2\pi R n I$$

Akhirnya, dengan mensubstitusikan persamaan-persamaan di atas ke dalam persamaan sebelumnya maka diperoleh

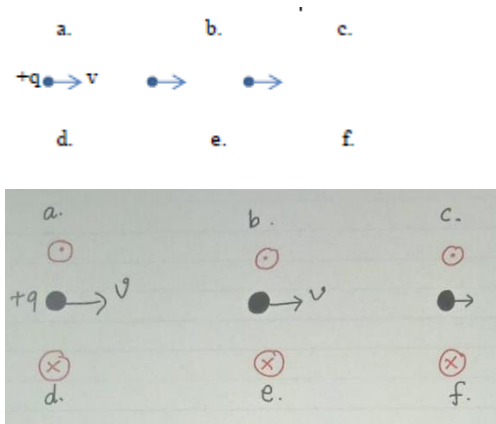
$$B \times (2\pi R) = \mu_0 (2\pi R n I)$$

atau

$$B = \mu_0 n I$$

Menjelaskan konsep medan magnet oleh muatan bergerak

1. Perhatikan animasi gerakan muatan berikut ini (Vno.1), gambar medan magnet pada titik a, b, c, d, e, dan f. (tuliskan tanda titik (.), jika arahnya menuju kita, dan tanda silang (x) jika arahnya menjauhi kita)



2. Jika muatan yang bergerak adalah $+q$ dengan kecepatan v , dan $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ dengan menggunakan analogi medan listrik oleh muatan titik besarnya medan listrik direpresentasikan $\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r}$ maka besarnya medan magnet oleh muatan yang bergerak direpresentasikan

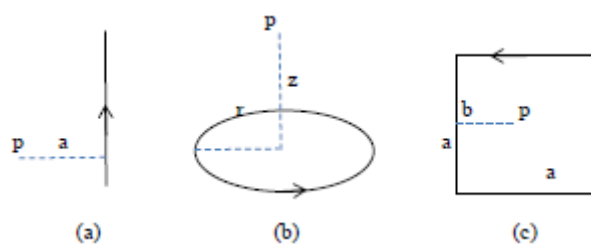
$$k = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

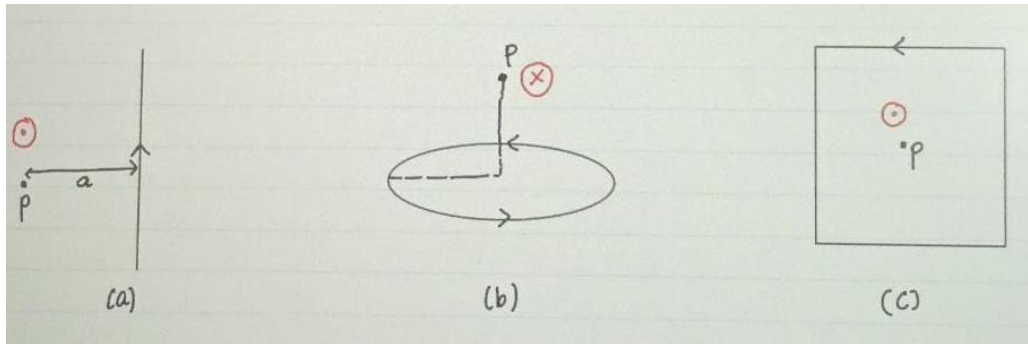
$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad \vec{E} = v \vec{B}$$

$$v \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

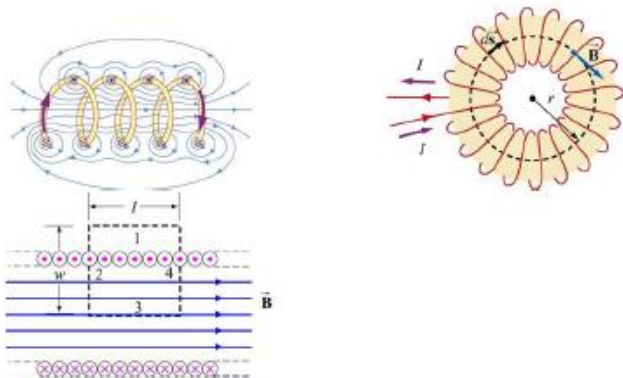
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv}{r^2} \hat{r}$$

3. Sekarang perhatikan gambar animasi berikut ini (Vno.2). Gunakan kaidah tangan kanan untuk menggambarkan medan magnet pada titik p yang ditimbulkan oleh kawat lurus panjang, kawat melingkar, dan kawat berbentuk bujur sangkar yang dialiri arus listrik.





4. Perhatikan gambar solenoida dan toroida di bawah ini!



Dengan menerapkan hukum Ampere, formulasikan persamaan medan magnet yang ditimbulkan oleh solenoida.

Apakah di luar solenoida terdapat medan magnet? Kenapa?

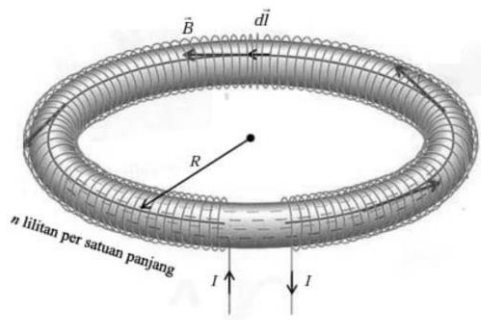
Pada suatu titik di solenoida, garis-garis gaya magnet di bagian luar tidak sebanyak di bagian dalam. Di luar solenoida terdapat medan magnet namun medan magnetnya lemah. Lemahnya medan magnet di luar solenoida disebabkan oleh adanya gejala saling menghapus antara medan magnet yang berasal dari berbagai bagian di dalam tiap lilitan.

Apakah di dalam solenoida medan magnetnya seragam?

Ya, di dalam solenoida kuat medan magnetnya seragam

5. Formulasikan persamaan medan magnet yang ditimbulkan oleh toroida. Apakah di luar toroida terdapat medan magnet? Kenapa?

Misalkan jumlah lilitan per satuan panjang yang dimiliki toroida adalah n . Arus yang mengalir pada toroida adalah I . Untuk menentukan kuat medan magnet di dalam rongga toroida, kita buat lintasan Ampere berbentuk lingkaran yang melalui rongga toroida



Jika kita misalkan jari-jari toroida adalah R maka keliling toroida adalah $K = 2\pi R$.
 Sepanjang lintasan Ampere, vektor B dan dl selalu sejajar sehingga sudut θ antara B dan dl nol. Jadi, $B \cdot dl = B \, dl \cos \theta = B \, dl \cos 0^\circ = B \, dl$. Dengan demikian kita dapatkan

$$\begin{aligned}\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \oint_S B \, dl \\ &= B \oint_S dl \\ &= B \times (\text{keliling lingkaran}) \\ &= B \times (2\pi R)\end{aligned}$$

Karena jumlah lilitan yang dilingkupi lintasan Ampere adalah N maka jumlah arus yang dilingkupi lintasan ini adalah

$$\Sigma I = NI = 2\pi R n I$$

dengan mensubstitusikan persamaan-persamaan di atas ke dalam persamaan

$$\begin{aligned}\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \Sigma I \text{ maka diperoleh} \\ B \times (2\pi R) &= \mu_0 (2\pi R n I) \\ \text{atau} \\ B &= \mu_0 n I\end{aligned}$$

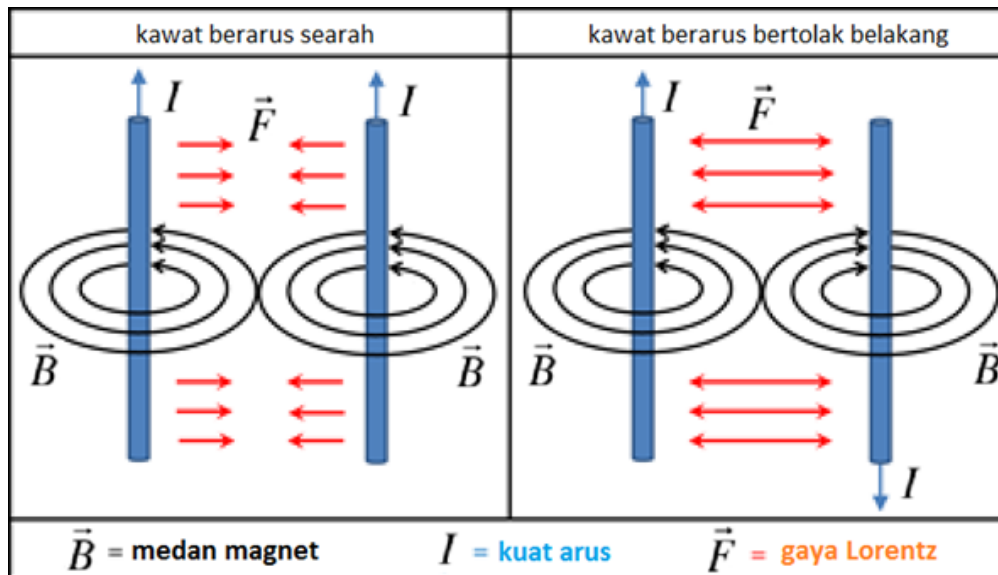
Apakah di luar toroida terdapat medan magnet?

Di luar toroida terdapat medan magnet, namun medan magnet di luar toroida lebih lemah dibandingkan medan magnet di dalam lingkaran toroida. Medan magnet yang ditimbulkan toroida mempunyai arah melingkar.

6. Perhatikan animasi (V no.3 dan 4) gerakan dua buah kawat yang dialiri arus listrik! perhatikan arah arus pada kawat. Apa yang terjadi pada kedua kawat tersebut?

7. Gambar medan magnet pada kedua kawat yang dialiri arus listrik!





8. Apa kesimpulan Anda tentang medan magnet yang ditimbulkan oleh 2 kawat berarus listrik?

Arah medan magnet yang ditimbulkan pada kawat sejajar yang dialiri arus listrik searah, berlawanan arah antara satu dengan yang lainnya. Sedangkan pada kawat sejajar yang dialiri arus listrik berlawanan arah, medan magnet yang ditimbulkan memiliki arah yang sama.