TUGAS RINGKASAN MEDAN LISTRIK

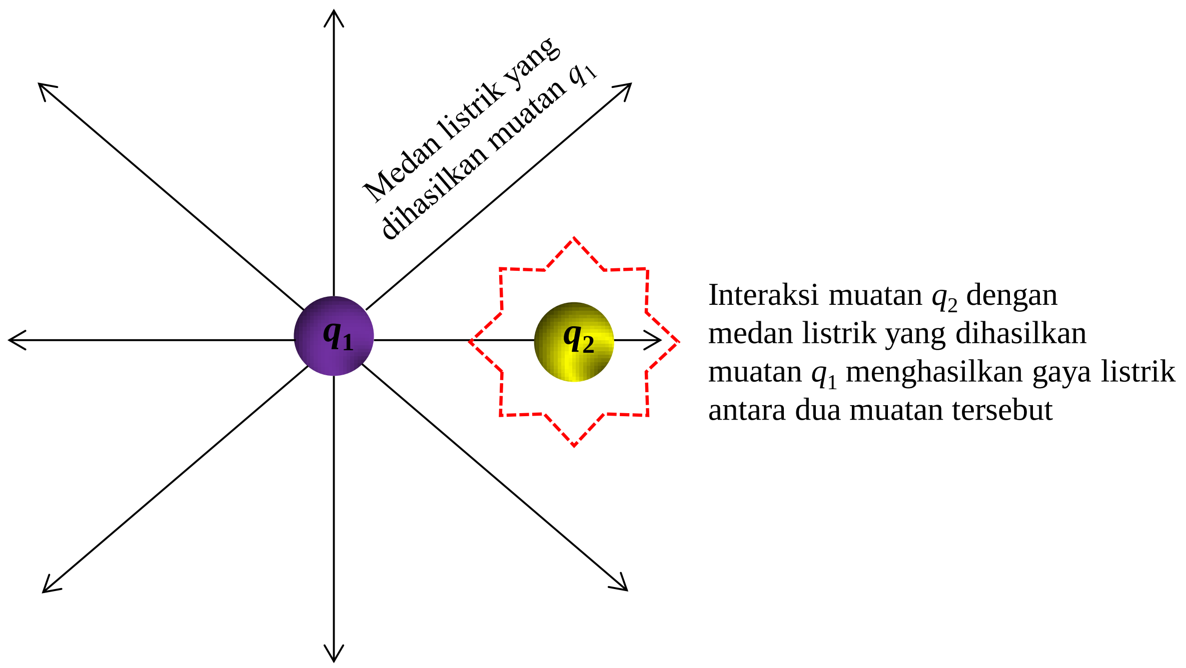
Dosen Pengampu:
Dr. Doni Andra, M. Sc.
Dr. I Wayan Distrik, M.Si

Disusun Oleh:
Laili Fauziah 2123022006

PROGRAM STUDI MAGISTER PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
2022

1 Medan Listrik

Mengapa muatan q_1 dapat melakukan gaya pada muatan q_2 meskipun ke dua muatan tersebut tidak bersentuhan? Mirip dengan pembahasan kita tentang gaya gravitasi yaitu karena adanya medan gaya yang dihasilkan oleh muatan listrik. Medan gaya ini dikenal juga dengan medan listrik. Gaya Coulomb muncul karena muatan q_1 menghasilkan medan listrik pada posisi muatan q_2. Muatan q_2 berinteraksi dengan medan yang dihasilkan muatan q_1, dan interaksi tersebut menghasilkan gaya pada muatan q_2 (**Gambar 1**).



Gambar 1 Muatan liatrik q_1 menghasilkan medan listrik di sekitarnya. Muatan q_2 yang berada di sekitar muatan q_1 berinteraksi dengan medan yang dihasilkan muatan q_1. Efek dari interaksi tersebut adalah muncul gaya listrik pada muatan q_2.

Jika medan listrik yang dihasilkan muatan q_1 pada posisi muatan q_2 dinyatakan sebagai $\vec{E}_{21}$ maka gaya yang dilakukan oleh muatan q_1 pada muatan q_2 memenuhi persamaan

$$\vec{F}_{21} = q_2\vec{E}_{21} \tag{1}$$

Apakah interaksi? Dalam fisika, yang disebut interaksi adalah perkalian. Interaksi antara besaran A dengan besaran B secara matematika dinyatakan sebagai perkalian besaran A dan besaran B. Perkalian tersebut bisa berupa *AB*, atau $A\vec{B}$ atau $\vec{A}\bullet\vec{B}$, atau $\vec{A}\times\vec{B}$, atau *cAB* dengan *c* adalah konstanta. Dengan definisi bentuk perkalian tersebut maka interkasi otomatis nol jika nilai salah satu besaran nol.

Dengan membandingkan persamaan (1) dengan ungkapan hukum Coulumb pada persamaan , maka kuat medan listrik yang dihasilkan muatan q_1 pada posisi muatan q_2 memenuhi

$$\vec{E}_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1}{|\vec{r}_{21}|^3}\vec{r}_{21} \quad (2)$$

Jika kita nyatakan dalam notasi scalar maka besarnya medan listrik yang dihasilkan muatan sembarang pada jarak *r* dari muatan tersebut adalah

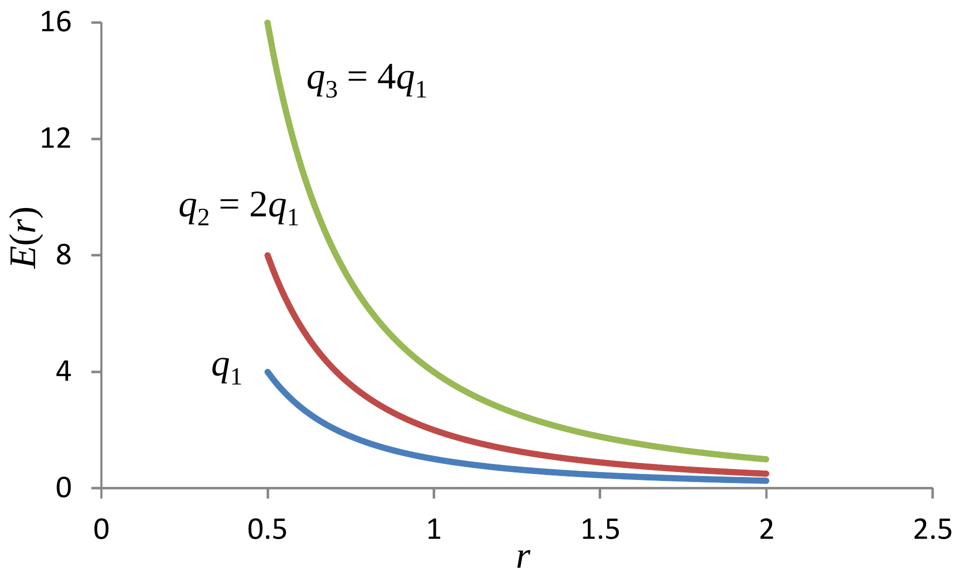
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2} \quad (3)$$

Tampak bahwa besarnya medan listrik yang dihasilkan muatan titik berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari muatan. Jika dubuatkan kurva kuat medan terhadap jarak kita dapatkan **Gambar 2.**

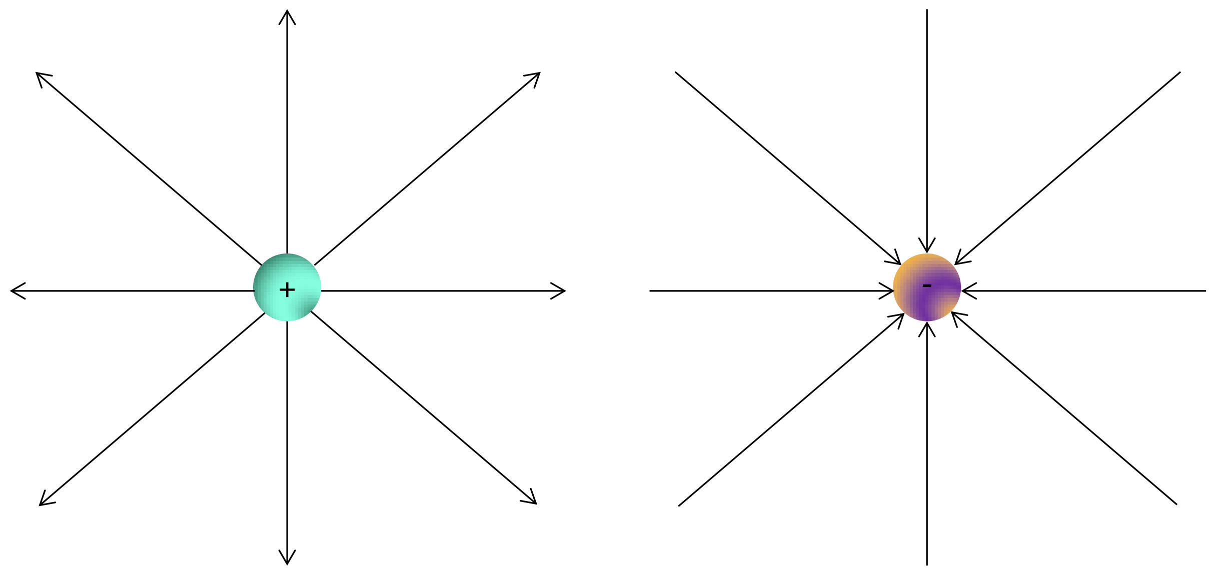
Ke manakah arah medan listrik? Arah medan listrik didefinisikan sebagai berikut:

i. Keluar dari muatan jika muatan tersebut memiliki tanda positif.
ii. Mengarah ke muatan tersebut jika muatan tersebut memiliki tanda negatif.

Arah tersebut diilustrasikan pada **Gambar** 3.



Gambar 2. Kuat medan listrik yang dihasilkan muatan titik sebagai fungsi jarak. Kuat medan listrik yang dihasilkan muatan titik berbanding terbalik dengan jarak dari muatan tersebut.



Gambar 3. Definisi arah medan listrik: (a) keluar dari muatan positif dan (b) masuk ke muatan negatif.

Contoh 1

Andaikan terdapat dua buah muatan listrik masing-masing q_1 = 2 nC dan q_2 = -5 nC. Muatan pertama berada pada pusat koordinat dan muatan kedua berada pada koordinat (80 cm,0).

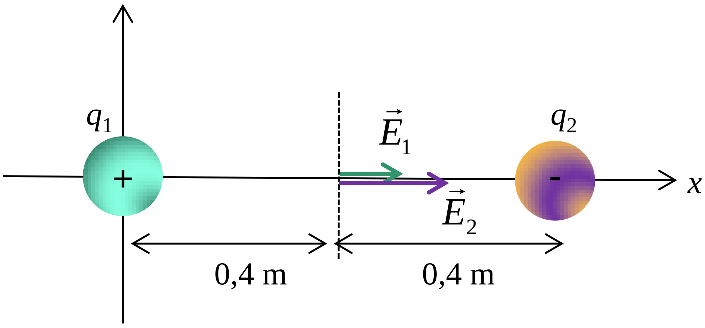
(a) berapa kuat medan litrik dan arahnya pada titik tepat di antara dua muatan tersebut?

(b) Di manakah posisi yang memiliki medan nol?

(c) Buat kurva kuat medan listrik sebagi fungsi koordinat y sepanjang garis x = 10 cm.

Jawab

Untuk menentukan kuat medan listrik antara dua muatan, perhatikan **Gambar** 4.



Gambar 4. Gambar untuk Contoh 1.3 pertanyaan (a).

Jelas dari Gambar 1.20 bahwa

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{(0,4)^3}(0,4\hat{i})$$

$$= (9\times10^9)\frac{(2\times10^{-9})}{(0,4)^3}(0,4\hat{i}) = 112,5\hat{i} \quad \text{N}$$

$$\vec{E}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{(0,4)^3}(-0,4\hat{i})$$

$$= (9\times10^9)\frac{(5\times10^{-9})}{(0,4)^3}(-0,4\hat{i}) = -281,25\hat{i} \quad \text{N}$$

Kuat medan total antara dua muatan

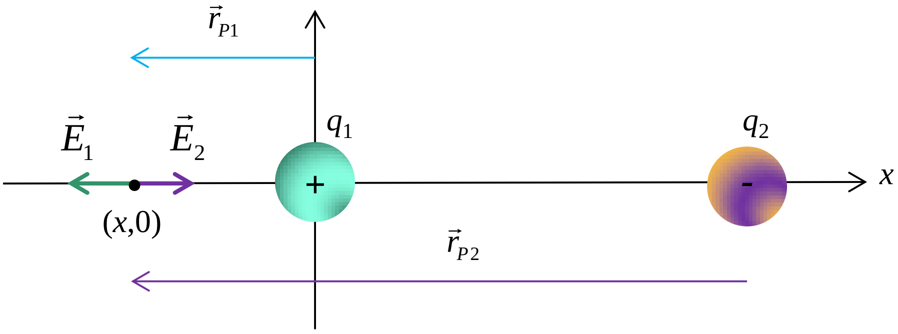
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$= 112{,}5\hat{i} - 281{,}25\hat{i} = -168{,}75\hat{i}$$

b) Medan listrik nol hanya akan berada pada garis hubung dua muatan. Misalkan lokasi tersebut brada pada koordinat (x,0) seperti pada **Gambar** 5. Jarak lokasi tersebut ke masing-masing muatan adalah

$$\vec{r}_{P1} = x\hat{i}$$

$$\vec{r}_{P2} = (x - 0{,}8)\hat{i}$$



Gambar 5. Gambar untuk Contoh 1.3 pertanyaan (b).

Kuat medan total pada koordinat (x,0) menjadi

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{|x\hat{i}|^3}(x\hat{i}) + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{|(x-0{,}8)\hat{i}|^3}[(x-0{,}8)\hat{i}]$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{x^2}\hat{i} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{(x-0{,}8)^2}\hat{i}$$

Agar medan tersebut nol maka

$$\frac{q_1}{x^2} + \frac{q_2}{(x-0{,}8)^2} = 0$$

atau

$$\frac{2}{x^2} + \frac{(-5)}{(x-0{,}8)^2} = 0$$

Persamaan ini dapat diuraikan dengan mudah sebagai berikut

$$2(x^2 - 1{,}6x + 0{,}64) = 5x^2$$

atau

$$3x^2 + 3{,}2x - 1{,}28 = 0$$

Solusi untuk x adalah

$$x_1 = \frac{-3{,}2 + \sqrt{(3{,}2)^2 - 4 \times 3 \times (-1{,}28)}}{2 \times 3}$$

$$= 0{,}31 \text{ m}$$

$$x_2 = \frac{-3{,}2 - \sqrt{(3{,}2)^2 - 4 \times 3 \times (-1{,}28)}}{2 \times 3}$$

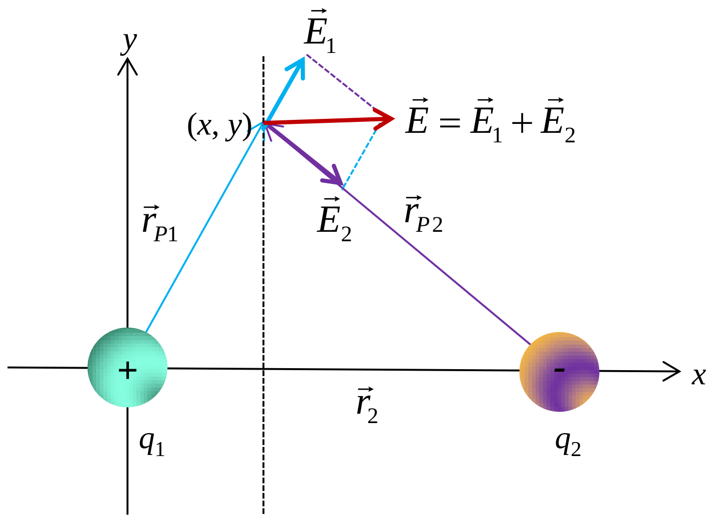
$$= -1{,}38 \text{ m}$$

Posisi x = 0,31 m berada antara dua muatan. Muatan q_1 menghasilkan medan ke kanan dan muatan q_2 menghasilkan medan ke kanan juga. Kedua medan tidak saling mnghilangkan. Kedua medan hanya memiliki besar yang sama. Jadi posisi ini tidak kita ambil. Yang kita ambil hanya posisi x = -1,38 m. Muatan q_1 menghasilkan medan ke kiri dan muatan q_2 menghasilkan medan ke kanan dan keduanya sama besar sehingga saling menghilangkan.

c) Untuk menentukan kuat medan sepanjang sumbu yang sejajar dengan sumbu y, perhatikan **Gambar** 6.. Jelas dari gambar tersebut bahwa

$$\vec{r}_{P1} = x\hat{i} + y\hat{j}$$

$$\vec{r}_{P2} = (x - 0{,}8)\hat{i} + y\hat{j}$$



Gambar 6. Gambar untuk Contoh 1.3 pertanyaan (c).

Dengan demikian, kuat medan di sembarang koordinat (x,y) adalah

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{|\vec{r}_{P1}|^3}\vec{r}_{P1} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{|\vec{r}_{P2}|^3}\vec{r}_{P2}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{(x^2+y^2)^{3/2}}(x\hat{i}+y\hat{j}) + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{[(x-0{,}8)^2+y^2]^{3/2}}[(x-0{,}8)\hat{i}+y\hat{j}]$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left\{\frac{q_1 x}{(x^2+y^2)^{3/2}} + \frac{q_2(x-0{,}8)}{[(x-0{,}8)^2+y^2]^{3/2}}\right\}\hat{i}$$

$$+ \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left\{\frac{q_1}{(x^2+y^2)^{3/2}} + \frac{q_2}{[(x-0{,}8)^2+y^2]^{3/2}}\right\}y\hat{j}$$

$$= (9\times 10^9)\left\{\frac{(2\times 10^{-9})x}{(x^2+y^2)^{3/2}} + \frac{(-5\times 10^{-9})(x-0{,}8)}{[(x-0{,}8)^2+y^2]^{3/2}}\right\}\hat{i}$$

$$+ (9\times 10^9)\left\{\frac{(2\times 10^{-9})}{(x^2+y^2)^{3/2}} + \frac{(-5\times 10^{-9})}{[(x-0{,}8)^2+y^2]^{3/2}}\right\}y\hat{j}$$

$$= \left\{ \frac{18x}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{45(x-0,8)}{[(x-0,8)^2 + y^2]^{3/2}} \right\} \hat{i} + \left\{ \frac{18}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{45}{[(x-0,8)^2 + y^2]^{3/2}} \right\} y\hat{j}$$

Kuat medan sepanjang garis x = 10 cm = 0,1 m adalah

$$\vec{E} = \left\{ \frac{18 \times 0,1}{[(0,1)^2 + y^2]^{3/2}} - \frac{45(0,1-0,8)}{[(0,1-0,8)^2 + y^2]^{3/2}} \right\} \hat{i}$$

$$+ \left\{ \frac{18}{(0,1)^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{45}{[(0,1-0,8)^2 + y^2]^{3/2}} \right\} y\hat{j}$$

$$= \left\{ \frac{1,8}{[0,01 + y^2]^{3/2}} + \frac{31,5}{[0,49 + y^2]^{3/2}} \right\} \hat{i} + \left\{ \frac{18}{[0,01 + y^2]^{3/2}} - \frac{45}{[0,49 + y^2]^{3/2}} \right\} y\hat{j}$$

Dari bentuk ini kita mendapatkan komponen-komponen medan sebagai berikut

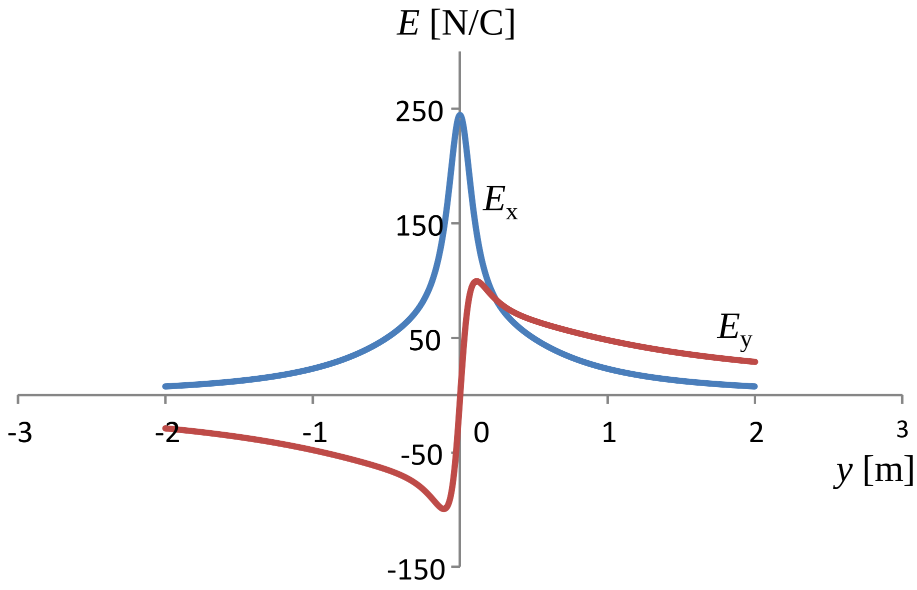
$$E_x = \frac{1,8}{[0,01 + y^2]^{3/2}} + \frac{31,5}{[0,49 + y^2]^{3/2}}$$

$$E_y = \left\{ \frac{18}{[0,01 + y^2]^{3/2}} - \frac{45}{[0,49 + y^2]^{3/2}} \right\} y$$

Kita dapat menggambar besar komponen medan pada berbagai nilai y dengan menggunakan Excel. **Gambar** 7. adalah nilai medan dari x = - 2 m sampai x = 2 m.

2. Medan Listrik yang dihasilkan distribusi muatan

Di bagian terdahulu kita sudah membahas medan listrik yang dihasilkan oleh muatan titik. Medan total merupakan penjumlahan vector dari medan yang dihasilkan oleh masing-masing muatan titik. Sekarang kita meningkat ke kondisi yang sedikit lebih rumit, yaitu jika muatan yang menghasilkan medan bukan merupakan muatan titik, melainkan muatan yang terdistrubusi pada benda yang memiliki ukuran besar. Sebagai contoh adalah muatan yang dihasilkan oleh batang, cincin, bola, dan sebagainya.



Gambar 8. Besar komponen medan dalam arah sumbu x dan sumbu y.

Hukum Coulomb tetap berlaku untuk distribusi muatan apa saja. Namun untuk distribusi muatan pada benda besar kita sering mengalami kesulitan menggunakan hokum Coulomb secara langsung kecuali untuk beberapa bentuk. Kita akan mencari medan listrik yang dihasilkan oleh benda yang bentuknya sederhana.

2.1 Medan listrik oleh muatan cincin

Misalkan kita memiliki cincin yang berjari-jari a. Cincin tersebut mengandung muatan q yang tersebar secara merata. Artinya, jumlah muatan per satuan panjang cincin adalah konstan. Kita akan mencari kuat medan listrik sepanjang sumbu cincin, yaitu pada posisi yang berjarak h dari pusat cincin seperti diilustrasikan pada **Gambar** 9. Bagaimana menghitungnya?

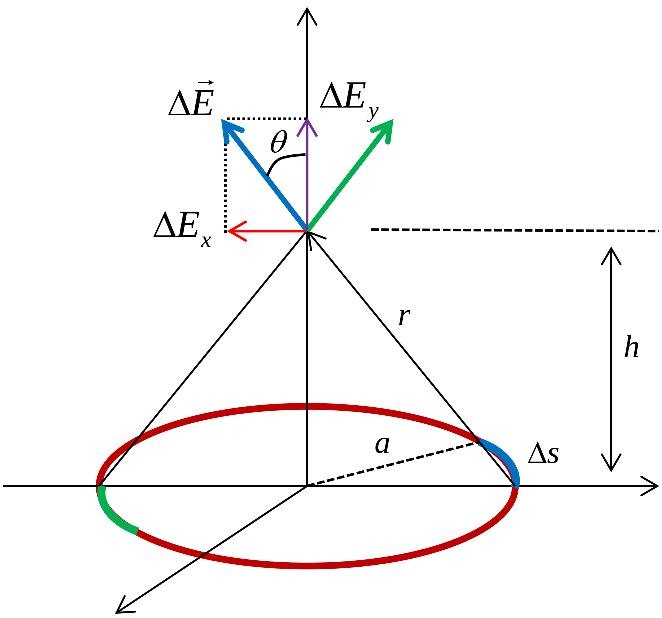
Keliling cincin adalah $S = 2\pi a$ dan kerapatan muatan cincin (muatan per panjang) adalah

$$\lambda = \frac{q}{S} = \frac{q}{2\pi a}$$

Untuk mencari medan yang dihasilkan muatan cincin, mari kita bagi cincin atas bagian-bagian kecil sebanak N buah. Panjang tiap bagian adalah

$$\Delta S = \frac{S}{N}$$

Jika N cukup besar maka ΔS cukup kecil sehingga tiap bagian dapat dipandang sebagai muatan titik. Dengan demikian, hukum Coulumb untuk muatan titik dapat digunakan untuk menghitung medan yang dihasilkan ΔS.



Gambar 9. Mencari medan listrik di sumbu cincin bermuatan yang berjari-jari a. Muatan cincin terdistribusi secara merata sepanjang keliling cincin.

Muatan yang dikandung tiap elemen adalah

$$\Delta q = \lambda \Delta S$$

sehingga besar medan listrik pada titik pengamatan yang dihasilkan oleh elemen muatan ini adalah

$$\Delta E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{\Delta q}{r^2}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda \Delta S}{r^2}$$

Dengan menggunakan dalil Phitagoras maka $r^2 = h^2 + a^2$ sehingga

$$\Delta E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda \Delta S}{h^2 + a^2}$$

Perhatikan medan ΔE. Arahnya membentuk sudut θ dengan sumbu cincin. Medan tersebut dapat diuraikan atas komponen vertical ΔE_y dan horizontal ΔE_x, yaitu

$$\Delta E_y = \Delta E \cos\theta$$

$$\Delta E_x = \Delta E \sin\theta$$

Komponen arah horizontal akan saling ditiadakan oleh komponen arah horizontal elemen kawat yang berada dalam posisi diametral. Setelah dijumlahnya semua medan yang dihasilkan semua komponen maka yang dihasilkan hanya komponen arah vertical (sejajar sumbu). Jadi, kita tidak perlu melanjutkan perhitungan untuk komponen arah horizontal.

Dari Gambar 1.24 tampak bahwa

$$\cos\theta = \frac{h}{r} = \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}}$$

Substitusi ke dalam persamaan medan arah vertikal maka kita dapat menulis

$$\Delta E_y = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda \Delta S}{h^2 + a^2} \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda h \Delta S}{\left(h^2 + a^2\right)^{3/2}}$$

Dengan demikian medan total yang dihasilkan (hanya arah vertikal) adalah

$$E = \sum \Delta E_y = \sum \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda h \Delta S}{\left(h^2 + a^2\right)^{3/2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda h}{\left(h^2 + a^2\right)^{3/2}} \sum \Delta S$$

Ingat $\Sigma\Delta S$ adalah jumlah panjang semua elemen cincin, yang tidak lain merupakan keliling cincin. Dengan demikian

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{\lambda h}{\left(h^2 + a^2\right)^{3/2}} (2\pi a)$$

Tetapi, $\lambda(2\pi a) = q$, yaitu muatan total cincin. Jadi kita peroleh medan total pada sumbu cincin

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qh}{\left(h^2 + a^2\right)^{3/2}} \qquad (4)$$

Persamaan (4) dapat juga ditulis sebagai berikut

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{a^2} \frac{h/a}{\left(1 + (h/a)^2\right)^{3/2}} \qquad (5)$$

Jika kita gambar kurva E sebagai fungus h/a maka kita peroleh **Gambar 10**. Tampak dari persamaan (1.20) bahwa ada lokasi h/a yang menghasilkan kekuatan medan terbesar. Di manakah lokasi tersebut? Untuk menentukan lokasi tersebut maka kita mencari nilai maksimum untuk fungsi

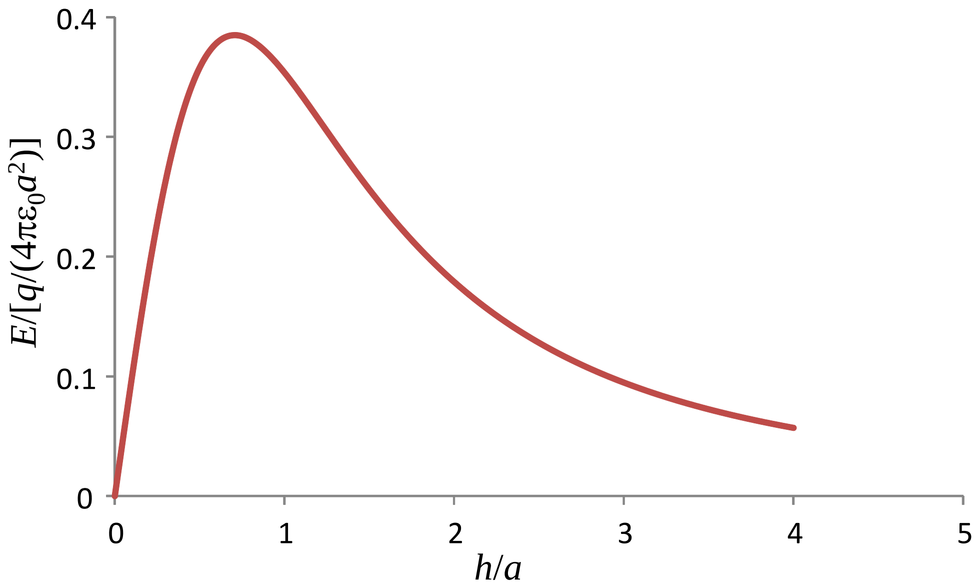
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{a^2} \frac{x}{\left(1 + x^2\right)^{3/2}}$$

dengan $x = h/a$. Nilai maksimum dicari dengan diferensiasi dan menentukan x yang memberikan nilai nol pada diferensial. Dengan demikian

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{a^2} \frac{d}{dx} \left[\frac{x}{\left(1 + x^2\right)^{3/2}} \right]$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{a^2} \frac{(1-2x^2)}{\left(1+x^2\right)^{5/2}} = 0$$

Solusi untuk x adalah $x = 1/\sqrt{2}$. Dengan demikian, jarak dari pusat lingkaran yang menghasilkan medan paling besar adalah $h = a/\sqrt{2}$ = 0,71a.



Gambar 10. Kurva E dalam satuan $q/(4\pi\varepsilon_0 a^2)$ sebagai fungsi h/a. Medan listrik mula-mula bertambah dengan bertambahnya h/a, kemudian turun dan menjadi nol ketika h/a makin besar. Medan listrik mencapai nilai maksimum pada *h*/*a* = 0,71.

Menarik untuk mengamati sifat persamaan (1.19). Jika posisi pengamatan sangat jauh atau $h >> a$ maka $h^2 + a^2 \approx h^2$ sehingga kita dapat melakukan aproksimasi

$$E \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qh}{\left(h^2\right)^{3/2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{h^2} \quad (6)$$

Ini adalah ungkapan kuat medan listrik yang dihasilkan muatan titik pada jarak h. Dengan demikian, pada jarak yang sangat jauh maka cincin berperilaku sebagai sebuah titik.

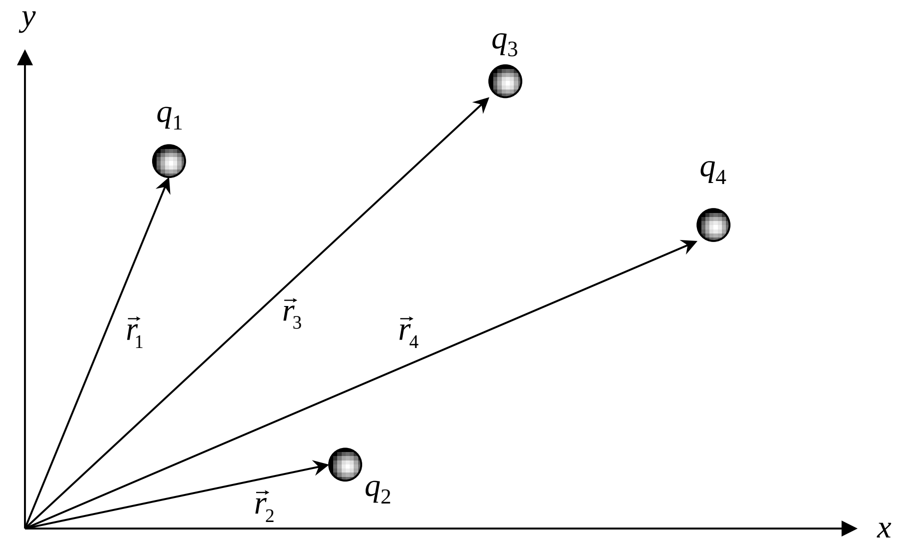
Dari persamaan (1.20) kita dapat langsung menentukan kuat medan listrik di pusat cincin. Pada lokasi ini h = 0 sehingga E = 0.

2.2 Medan Listrik oleh Momen Dipol

Dipol listrik didefinisikan sebagai perkalian muatan dengan posisi. Jika muatan q_1 berada pada posisi $\vec{r}_1$ maka dipol listrik yang dihasilkan adalah

$$\vec{p}_1 = q_1 \vec{r}_1 \qquad (7)$$

Jika terdapat sejumlah muatan listrik yang berada pada berbagai posisi maka dipol total merupakan julah secara vector dari dipol-dipol semua muatan. Sebagai ilustrasi perhatikan **Gambar 1**1.



Gambar 11. Sejumlah muatan titik menghasilkan dipole sebagai perkalian muatan dan vector posisi muatan tersebut.

Dipol total susunan muatan seperti pada **Gambar 1**1. adalah

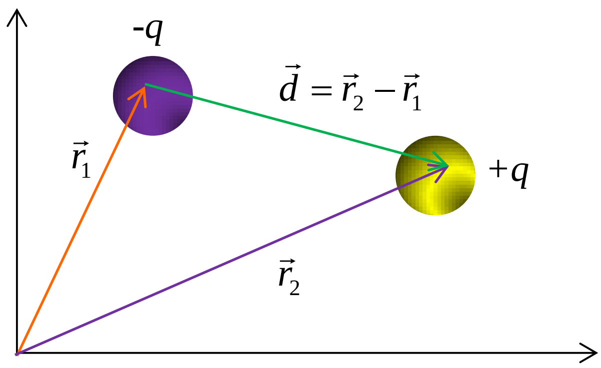
$$\vec{p} = q_1\vec{r}_1 + q_2\vec{r}_2 + q_3\vec{r}_3 + q_4\vec{r}_4$$

Secara umum, jika terdapat N muatan maka dipol total yang dihasilkan oleh N muatan tersebut adalah

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{N} q_i \vec{r}_i \tag{8}$$

Nilai suatu dipol sangat bergantung pada koordinat yang dipilih. Untuk muatan yang sama atau susunan muatan yang sama maka nilai dipol total akan berbeda jika koordinat yang dipilih berbeda. Perbedaan koordinat menyebabkan perbedaan vector posisi masing-masing muatan yang melahirkan perbedaan dipol.

Sekarang kita tinjau satu kasus khusus jika tedapat dua muatan yang besarnya sama tetapi arah berlawanan. Kita anggap vector yang menghubungkan muatan bertanda negatif ke muatan yang bertanda positif adalah $\vec{d}$. **Gambar 1**2. adalah ilustrasi posisi dua muatan tersebut



Gambar 12. Dua muatan yang sama besar dan berlawanan tanda menghasilkan momen dipol.

Dipol total dua muatan tersebut adalah

$$\vec{p} = (-q)\vec{r}_1 + q\vec{r}_2$$

$$= q(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$$

$$= q\vec{d} \tag{9}$$

Tampak bahwa dipol total muatan yang berbeda tanda hanya bergantung pada vector posisi relative dua muatan. Koordinat mana pun yang kita pilih maka dipol total yang dihasilkan selalu sama. Dipol total dua muatan yang besarnya sama dan berbeda tanda dinamakan juga momen dipol.

Muatan yang membentuk momen dipol umumnya akan Tarik menarik dengan gaya Coulumb. Besarnya gaya tarik antara dua muatan tersebut adalah

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{d^2}$$

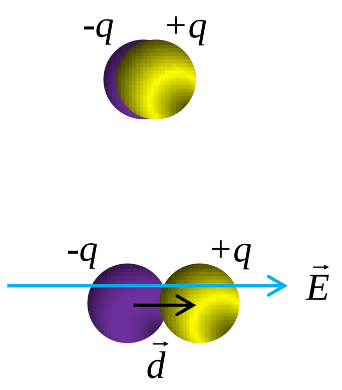
Berapa nilai gaya tersebut? Untuk momen dipole yang dihasilkan oleh pergeseran muatan dalam atom atau ion, nilai muatan kira-kira dalam orde muaatan electron dan jarak antar muatan kira-kira sama dengan diameter atom, yaitu sekitar 1 angstrom. Jadi, besarnya gaya tarik dalam orde

$$F = (9\times 10^9)\frac{(1{,}6\times 10^{-19})^2}{(1\times 10^{-10})^2}$$

$= 2{,}3 \times 10^{-8}$ N

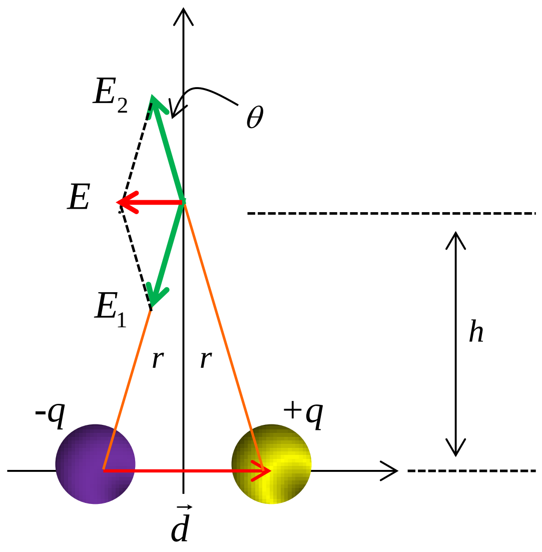
Dalam material, momen dipole umumnya tercipta karena pergeseran sedikit muatan positif dan negative. Mula-mula titik pusat muatan positif dan negative berada pada lokasi yang sama sehingga dipol total nol. Namun, jika terjadi sedikit pergeseran muatan positif terhadap muatan negative maka titik pusat muatan menjadi tidak berimpit. Muncul vector posisi relative pusat dua muatan tersebut sehingga muncul momen dipol. Salah satu cara untuk menghasilkan pergeseran muatan tersebut adalah memberikan medan listrik yang cukup besar. Muatan positif akan ditarik ke arah medan dan muatan negative akan ditarik berlawanan dengan arah medan. Walaupun ikatan antar dua muatan sangat kuat, namun jika medan yang diterapkan sangat besar maka pergeseran relative dua muatan dapat terjadi. Mekanisme ini diilustrasikan pada **Gambar 1**3.

Jarak antar muatan pada momen dipole umumnya sangat kecil dan biasanya dalam orde ukuran atom. Sehingga kalau diukur dari jauh maka momen dipole masih terdeteksi netral. Namun kalau diukur dari jarak yang sanfat dekat, yaitu pada jarak sekitar orde ukuran atom maka momen dipol terdeteksi sebagai dua muatan terpisah. Oleh karena itu satu momen dipol mempunyai efek secara mikroskopik dan tidak menghasilkan efek makroskopik. Momen dipol akan menghasilkan efek makroskopik jika jumlahnya sangat banyak, misalnya dalam orde bilangan Avogandro. Efek yang ditimbulkan momen dipol secara maksiskopik diamati sebagai sifar dielektron bahan. Sifat dielektrik tersebut menghasilkan sifat kapasitif, pembiasan cahaya, pandu gelombang (waveguide), dan lain-lain.



Gambar 13. Pergeseran muatan positif dan negative akibat pemberian medan liatrik luar yang cukop besar. Pergeseran tersebut menyebabkan munculnya momen dipol.

Selanjutnya mari kita menghitung kuat medan listrik yang dihasilkan oleh momen dipole. Untuk mudahnya, kita hanya menghitung kuat medan sepanjang gasris yang tegak lurus sumbu momen dipol seperti diilustrasikan pada **Gambar 14**.



Gambar 14. Menentukan medan listrik yang dihasilkan momen dipol.

Medan di sumbu merupakan julah medan yang dihasilkan muatan positif dan muatan negative. Besar medan yang dihasilkan muatan negatif adalah

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{h^2 + (d/2)^2} \qquad \text{(arah ke muatan)}$$

Besar medan yang dihasilkan muatan positif adalah

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{h^2 + (d/2)^2} \qquad \text{(menjauhi muatan)}$$

Medan resultan yang dihasilkan dua muatan tersebut hanya memiliki komponen arah horizontal. Komponen arah vertikal saling meniadakan. Jadi, medan total di titik yang ditinjau adalah

$$E = E_1 \sin\theta + E_2 \sin\theta$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{2q}{h^2 \quad (d/2)^2}\sin\theta \qquad (10)$$

Dengan mengacu pada Gambar 1.29 kita dapatkan

$$\sin\theta = \frac{d/2}{r} = \frac{d/2}{\sqrt{h^2 + (d/2)^2}}$$

Substitusi persamaan ini ke dalam persamaan (1.25) maka diperoleh medan listrik yang dihasilkan oleh momen dipol adalah

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{2q}{h^2 + (d/2)^2}\frac{d/2}{\sqrt{h^2 + (d/2)^2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qd}{\left[h^2 + (d/2)^2\right]^{3/2}} \qquad (11)$$

Kita telah mendefinisikan momen dipol $p = qd$ sehingga persamaan (1.26) dapat ditulis sebagai

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{p}{\left[h^2 + (d/2)^2\right]^{3/2}} \qquad (12)$$

Tampak bahwa kuat medan listrik bergantung pada jarak antara dua muatan maupun jari dari pusat dipol.

Apa yang akan dideteksi jika titik pengamatan sangat jauh dari pusat dipol? Jika jarak titik pengamatan (*h*) sangat besar dibandingkan dengan jarak antara dua muatan, atau $d << h$, maka kita dapat melakukan aproksimasi $h^2 + (d/2)^2 \approx h^2$. Dengan demikian,

$$E \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{p}{\left[h^2\right]^{3/2}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{p}{h^3}$$

Tampak bahwa medan listrik berbanding terbalik dengan pangkat tiga jarak dari momen dipole. Kita sudah pelajari bahwa untuk muatan titik, kuat medan listrik berbanding terbalik dengan pangkat dua jarak. Dengan demikian medan listrik yang dihasilkan dipole berkurang lebih cepat daripada yang dihasilkan oleh muatan titik.

Berikutnya, mari kita coba hitung gaya coulomb antar dua momen dipol. Untuk penyederhanaan kita asumsikan bahwa dua momen dipole berada pada satu garis yang melewati tengah-tengah momen dipol dan salah satu momen dipole dalam posisi tegak lurus garis hubung dua momen dipol. Kita akan tinjau dua kasus, yaitu momen dipol kedua sejajar dan tegak lurus momen dipol pertama seperti diilustrasikan pada **Gambar 1**4.

Medan listrik yang dihasilkan momen dipol bawah pada muatan-muatan di momen dipol atas adalah

$$E_{bawah} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{p}{\left[(h-d/2)^2 + (d/2)^2\right]^{3/2}}$$

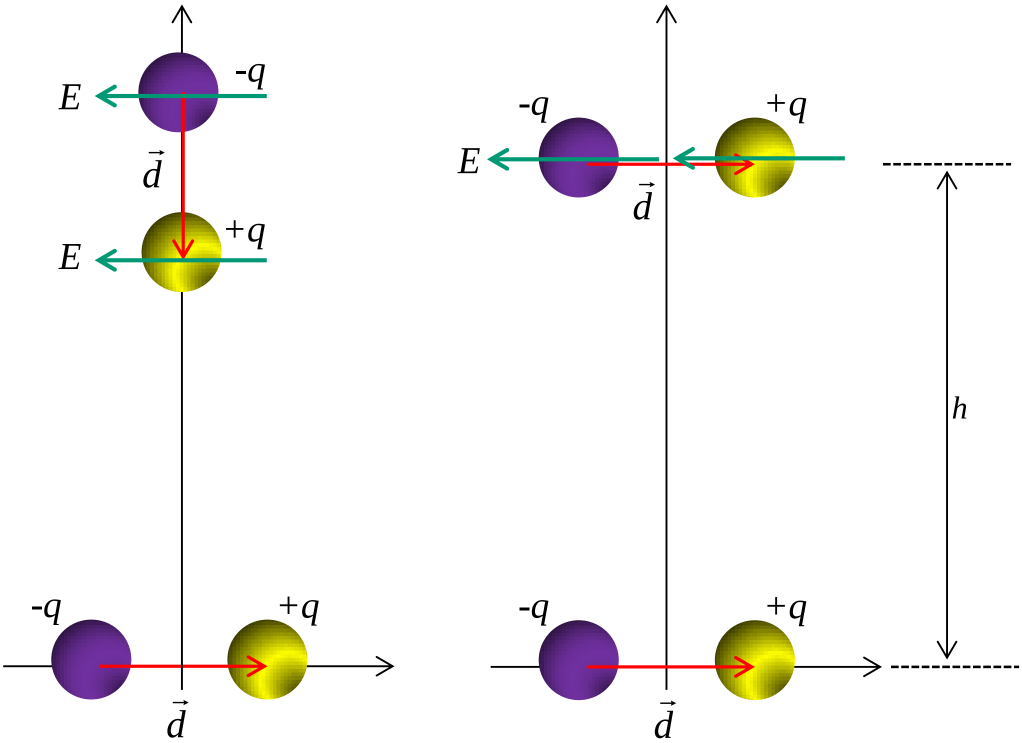
$$E_{atas} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{p}{\left[(h+d/2)^2 + (d/2)^2\right]^{3/2}}$$

Dengan demikian, gaya total yang dialami momen dipol atas akibat pengaruh momen dipol bawah menjadi

$$F = qE_{bawah} - qE_{atas}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{\left[(h-d/2)^2 + (d/2)^2\right]^{3/2}} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{\left[(h+d/2)^2 + (d/2)^2\right]^{3/2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{\left[h^2 - hd + 2(d/2)^2\right]^{3/2}} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{\left[h^2 + hd + 2(d/2)^2\right]^{3/2}} \qquad (13)$$



Gambar 14. Menentukan gaya tarik antar dua momen dipol. (kiri) dua momen dipol dalam posisi tegak lurus dan (kanan) dua momen dipol dalam posisi sejajar.

Kita asumsikan bahwa $h >> d$ sehingga $h^2 + hd + 2(d/2)^2 \approx h^2 + hd$ dan $h^2 - hd + 2(d/2)^2 \approx h^2 - hd$. Dengan demikian, persamaan (1.28) dapat diaprokasimasi sebagai

$$F \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{\left[h^2 - hd\right]^{3/2}} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{\left[h^2 + hd\right]^{3/2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{qp}{h^3} \left\{ \frac{1}{\left[1 - d/h\right]^{3/2}} - \frac{1}{\left[1 + d/h\right]^{3/2}} \right\}$$

Karena $d << h$ maka $d/h << 1$ sehingga kita dapat menggunakan pendekatan binomial sebagai berikut $1/(1-d/h)^{3/2} \approx 1 + (3/2)(d/h)$ dan

$1/(1+d/h)^{3/2} \approx 1-(3/2)(d/h)$. Dengan demikian kita dapat melakukan aproksimasi lebih lanjut

$$F \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qp}{h^3}\left\{\left(1+\frac{3}{2}\frac{d}{h}\right)-\left(1-\frac{3}{2}\frac{d}{h}\right)\right\}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{3dqp}{h^4} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{3p^2}{h^4} \qquad (14)$$

di mana kita telah melakukan penggantian $p = qd$. Jelas di sini bahwa gaya antar dua momen dipol berbanding terbalik dengan pangkat empat jarak.

Jika momen dipol atas berada dalam posisi sejajar momen dipol bawah maka dua muatan mendapat medan listrik yang sama besar dan arah sama. Tetapi karena dua muatan memiliki tanda yang berlawanan maka dua muatan mendapat gaya yang sama besar tetapi berlawanan arah. Dengan demikian gaya total pada momen dipol atas mejadi nol.