

# Serial Mekanika Kuantum Minimalis 2.0

## Kuliah #03-Polarisasi Gelombang Elektromagnetik

Ahmad R. T. Nugraha (@fisikawan.gendeng), Hendry M. Lim

ver. 25 Februari 2026

Polarisasi dari gelombang elektromagnetik (EM) adalah fenomena yang dalam mekanika kuantum dapat menjadi suatu keadaan dengan derajat kebebasan tersendiri. Sebelum membahas polarisasi dalam mekanika kuantum, pemahaman terhadap polarisasi dan representasinya dalam fisika klasik akan sangat bermanfaat. Pada kuliah ini, kita akan mengulas teori klasik dari polarisasi gelombang EM.

### 1 Vektor Polarisasi

Sebuah gelombang EM, seperti gelombang cahaya, tersusun atas medan listrik dan medan magnet yang merambat. Polarisasi gelombang ditentukan oleh arah dari vektor medan listrik. Gelombang EM merupakan gelombang transversal sehingga medan listrik  $\vec{E}$  tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Asumsikan gelombang merambat dalam vakum pada arah sumbu-z sehingga vektor gelombangnya diberikan oleh  $\vec{k} = k\hat{u}_z$ . Magnitudo dari vektor gelombang terkait dengan panjang gelombang  $\lambda$ , frekuensi  $f$ , dan frekuensi sudut  $\omega$  dari gelombang tersebut melalui formula

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}, \quad (1)$$

dengan  $c$  adalah laju gelombang dalam vakum. Medan listriknya dapat dituliskan sebagai

$$\vec{E} = E_x \hat{u}_x + E_y \hat{u}_y, \quad (2)$$

dengan

$$E_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \text{ dan } E_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \phi). \quad (3)$$

$E_{0x}$  dan  $E_{0y}$  pada persamaan di atas adalah amplitudo-amplitudo dari medan listrik arah  $x$  dan  $y$ . Pergeseran fase  $\phi$  merepresentasikan fakta bahwa dua komponen medan ini tidak mesti berosilasi dengan fase yang sama. Polarisasi dari medan ditentukan oleh magnitudo relatif dari  $E_{0x}$  dan  $E_{0y}$  serta pergeseran fasenya.

Pada pers. (3), kita telah menulis medan listrik dalam bentuk fungsi cosinus dengan pertimbangan bahwa medan ini merupakan besaran fisis yang riil. Namun, secara matematis, akan lebih memudahkan bagi kita untuk menuliskannya dalam bentuk

eksponen kompleks, dengan catatan bahwa kita selalu dapat mengambil bagian riilnya ketika hendak mencari medan sesungguhnya. Dengan konvensi ini, komponen-komponen dari medan listrik dapat dituliskan sebagai

$$E_x = E_{0x} e^{(kz-\omega t)} \text{ dan } E_y = E_{0y} e^{(kz-\omega t+\phi)}, \quad (4)$$

sehingga medan totalnya adalah

$$\vec{E} = E_{0x} e^{(kz-\omega t)} \vec{u}_x + E_{0y} e^{(kz-\omega t+\phi)} \vec{u}_y. \quad (5)$$

Amplitudo  $E_0$  dari medan  $\vec{E}$  adalah

$$E_0 = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}. \quad (6)$$

Dalam bentuk amplitudo di atas, medan listrik bisa tuliskan

$$\vec{E} = E_0 e^{i(kz-\omega t)} \left[ \frac{E_{0x}}{E_0} \vec{u}_x + \frac{E_{0y}}{E_0} \vec{u}_y e^{i\phi} \right]. \quad (7)$$

Sekarang, kita dapat mendefinisikan vektor polarisasi  $\vec{P}$  sebagai besaran di dalam tanda kurung pada pers. (7):

$$\vec{P} = \frac{E_{0x}}{E_0} \vec{u}_x + \frac{E_{0y}}{E_0} e^{i\phi} \vec{u}_y \quad (8)$$

Secara umum, vektor polarisasi merupakan vektor kompleks sekaligus vektor satuan:

$$|\vec{P}| = \sqrt{\vec{P}^* \cdot \vec{P}} = \sqrt{\left(\frac{E_{0x}}{E_0}\right)^2 + \left(\frac{E_{0y}}{E_0}\right)^2} = 1 \quad (9)$$

Medan listrik kemudian dapat dituliskan dalam bentuk vektor polarisasi sebagai

$$\vec{E} = E_0 e^{i(kz-\omega t)} \vec{P} \quad (10)$$

Perhatikan bahwa pada pers. (10) tidak ada kebergantungan terhadap arah  $x$  maupun  $y$ . Medan yang konstan sepanjang sembarang bidang yang tegak lurus dengan arah rambat (sumbu- $z$ ) semacam ini dikenal sebagai gelombang bidang.

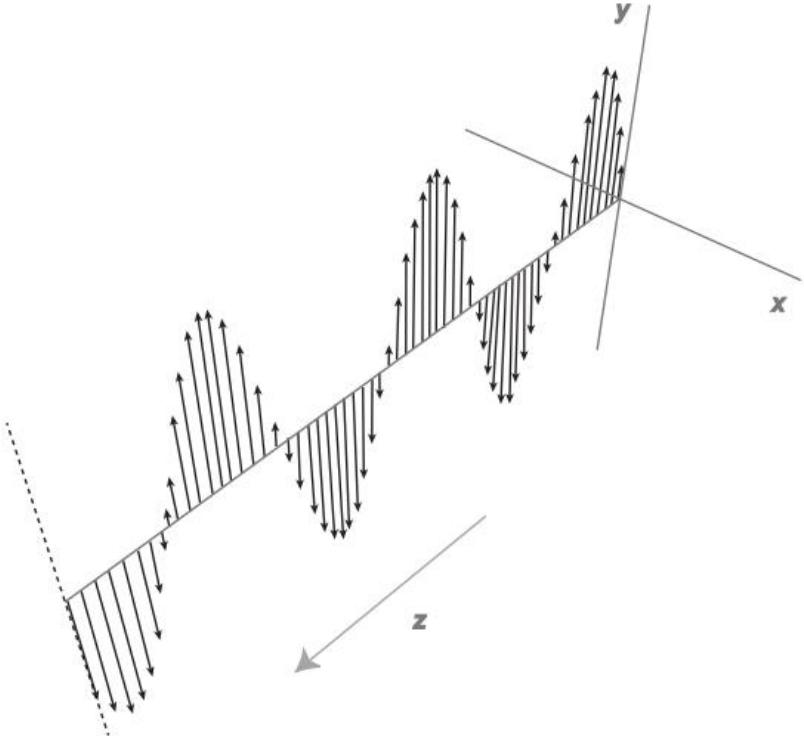
Detektor optik tidak merespons langsung pada medan listrik, melainkan pada daya cahaya yang menghinggapi detektor tersebut. Hal ini dikarenakan medan listrik dari cahaya berosilasi sangat cepat di wilayah optik spektrum cahaya. Detektor tidak dapat mengikuti osilasi ini dan justru terata-ratakan sepanjang banyak perioda osilasi. Daya sebanding dengan intensitas  $I$ , yang akan kita definisikan sama dengan kuadrat magnitudo medan:

$$I \equiv |\vec{E}|^2 = \vec{E}^* \cdot \vec{E} \quad (11)$$

Intensitas tidak berfluktuasi pada frekuensi-frekuensi optik. Fakta ini dapat dilihat melalui penjabaran

$$I = \vec{E}^* \cdot \vec{E} = (E_0 e^{-i(kz-\omega t)} \vec{P}^*) \cdot (E_0 e^{i(kz-\omega t)} \vec{P}) = (E_0)^2, \quad (12)$$

yang tidak memiliki suku osilasi yang bergantung pada waktu. Intensitas ini mengikuti fluktuasi amplitudo medan  $E_0$  yang lambat (relatif terhadap waktu respons detektor) dan tidak mengikuti osilasi medan pada frekuensi optik.



Gambar 1: Sebuah gelombang terpolarisasi linier yang merambat pada arah-z.

## 2 Macam-macam Polarisasi

### Polarisasi linier

Mari kita tinjau kasus khusus pergeseran fase nol ( $\phi = 0$ ) antara komponen-komponen  $x$  dan  $y$  dari medan. Pada kasus ini, vektor polarisasi menjadi riil dan sama dengan

$$\vec{P} = \frac{E_{0x}}{E_0} \vec{u}_x + \frac{E_{0y}}{E_0} \vec{u}_y. \quad (13)$$

Vektor ini menggambarkan suatu garis yang membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu-x, yakni

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right). \quad (14)$$

Gambar 1 menunjukkan potret ilustrasi gelombang terpolarisasi linier (sepanjang  $\vec{u}_y$ ) yang merambat pada arah-z. Seiring dengan waktu yang bertambah, seluruh gelombang meluncur pada sumbu-z sehingga pada setiap bidang yang tegak lurus dengan sumbu-z medan listrik berosilasi bolak-balik.

## Polarisasi melingkar (sirkular)

Sekarang tinjau kasus khusus  $\phi = \pi/2$  dan  $E_{0x} = E_{0y} = E_0/\sqrt{2}$ . Vektor polarisasinya adalah

$$\vec{P} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{u}_x + i\vec{u}_y). \quad (15)$$

Bagaimana kita bisa memahami vektor kompleks ini? Ingat bahwa untuk mendapatkan medan riil kita harus mengambil bagian riilnya. Namun, vektor polarisasi bersifat konstan terhadap ruang dan waktu sehingga pengambilan bagian riilnya hanya meninggalkan sebuah faktor konstanta yang tidak memberikan informasi tentang osilasi medan. Dalam hal ini, kita harus kembali pada bentuk fisis medan yang diberikan oleh pers. (3). Dengan asumsi yang sudah kita buat, komponen-komponen medan ini dapat kita tuliskan sebagai

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(kz - \omega t), \quad (16)$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin(kz - \omega t). \quad (17)$$

Kedua medan di atas memiliki amplitudo yang sama dengan fase yang tergeser satu sama lain. Untuk melihat bagaimana medan-medan ini berosilasi terhadap waktu, pada suatu bidang yang tegak lurus arah perambatan, kita bisa atur  $z = 0$  untuk memperoleh

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(-\omega t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega t), \quad (18)$$

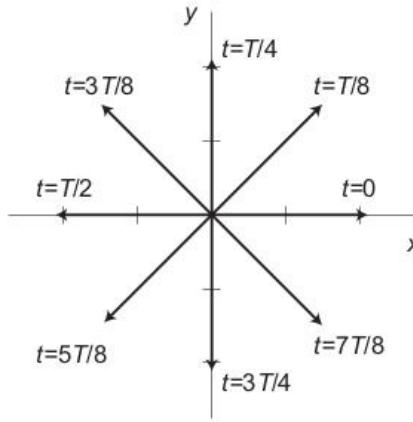
$$E_y = -\frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin(-\omega t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin(\omega t) \quad (19)$$

Gambar 2 menunjukkan total vektor medan listrik yang diperoleh dari pers. (18) dan (19) pada waktu yang berbeda. Besaran waktu pada Gambar 2 diekspresikan sebagai fraksi periode osilasi  $T = 2\pi/\omega$ . Medan listrik pada gambar tersebut berputar menyapu suatu lingkaran sehingga medan ini dikatakan terpolarisasi melingkar. Medan listrik ini membuat satu putaran penuh untuk setiap periode osilasi  $T$ .

Polarisasi melingkar memiliki dua ragam, yakni melingkar kiri (*left-circular polarization/LCP*) dan melingkar kanan (*right-circular polarization/RCP*). Dalam konvensi yang akan kita gunakan sepanjang kuliah, Gambar 2 merepresentasikan cahaya yang terpolarisasi melingkar kiri. Walaupun arah rambat cahaya menjauh dari sumber (keluar halaman teks), jika kita mengarahkan jempol kiri ke arah sumber (ke dalam halaman teks), jari-jari kita yang lain akan melengkung berlawanan jarum jam. Gambar 3 menunjukkan representasi 3D dari suatu gelombang terpolarisasi melingkar kiri.

## Polarisasi eliptis dan acak

Polarisasi linier dan melingkar adalah kasus-kasus khusus polarisasi. Jika suatu gelombang memiliki polarisasi yang terdefinisi dengan baik, tetapi tidak termasuk dua kasus khusus



Gambar 2: Arah vektor medan listrik pada waktu-waktu yang berbeda untuk suatu gelombang terpolarisasi melingkar kiri yang merambat keluar halaman teks.

tersebut, gelombang ini mesti terpolarisasi eliptis. Orientasi dan eksentrisitas dari elips ditentukan oleh rasio amplitudo komponen-komponen  $x$  dan  $y$  dari medan listrik serta pergeseran fasenya.

Jika polarisasi berfluktuasi secara acak terhadap waktu, polarisasi gelombang dikatakan acak atau medannya tidak terpolarisasi. Dalam situasi ini, kita tidak dapat melakukan spesifikasi parameter-parameter dari gelombang secara eksak. Namun, kita masih bisa mendeskripsikan statistika fluktuasinya. Salah satu caranya adalah dengan parameter Stokes. Kita tidak akan membahas hal ini lebih jauh pada kuliah, sekadar sebagai pengertian tambahan.

### 3 Material Bias Ganda

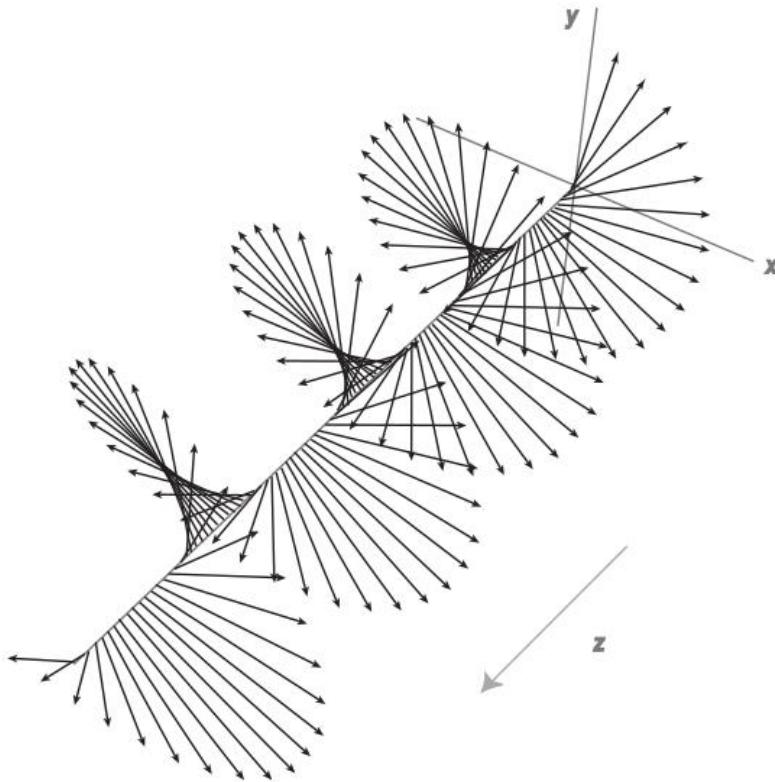
Suatu medium perambatan seperti kaca atau air memiliki indeks bias  $n$  yang terasosiasi dengan medium tersebut. Indeks bias ditentukan oleh  $n = c/v$ , dengan  $c$  adalah laju cahaya pada vakum, sementara  $v$  adalah laju cahaya pada medium. Di dalam suatu medium dengan indeks bias  $n$ , pers. (1) dapat ditulis ulang menjadi:

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{n\omega}{c} = \frac{n2\pi}{\lambda} \quad (20)$$

Pergeseran fase antara dua titik dengan jarak  $z$  di dalam suatu gelombang adalah

$$\phi = kz = \frac{n2\pi z}{\lambda} \quad (21)$$

Pergeseran fase ini bergantung pada indeks bias. Untuk material “normal” seperti kaca, indeks bias bergantung pada frekuensi (ataupun panjang gelombang) dari gelombang yang masuk ke material tersebut, dan tidak bergantung pada polarisasi ataupun arah rambat



Gambar 3: Gelombang terpolarisasi melingkar kiri yang merambat pada arah-z.

gelombang. Material semacam ini dikatakan isotropik. Di sisi lain, ganda, material bias ganda merupakan material anisotropik yang indeks biasnya memiliki kebergantungan pada polarisasi cahaya.

Material bias ganda dari strukturnya merupakan suatu kristal yang memiliki satu atau lebih arah yang lebih “disukai” cahaya dalam perambatannya. Pada kristal uniaksial, cahaya yang terpolarisasi sepanjang sumbu tertentu (disebut sumbu optik) memiliki satu indeks bias, sedangkan cahaya yang tegak lurus dengan sumbu optik memiliki indeks bias yang lain. Pada kristal biaksial, ada tiga buah indeks bias, masing-masing terkait dengan polarisasi pada tiga arah berbeda.

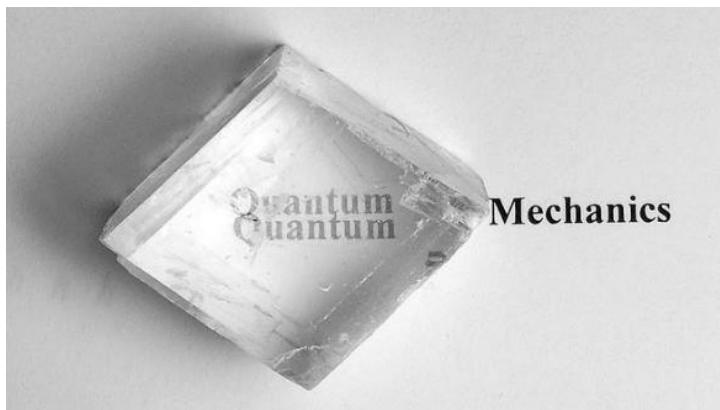
Apa yang menyebabkan perbedaan indeks bias ini untuk polarisasi yang berbeda? Struktur kristalin memiliki susunan atom spesifik yang teratur di dalam material. Bayangkan, sebagai contoh, atom-atom disusun pada lembaran-lembaran yang saling bertumpuk. Pada situasi ini kita bisa menebak bahwa medan-medan yang terpolarisasi sejajar atau tegak lurus lembaran-lembaran tersebut akan berperilaku saling berbeda.

Kita selalu bisa menguraikan polarisasi dari suatu gelombang menjadi dua komponen yang saling ortogonal. Karena material bias ganda memiliki arah-arah yang disukai dalam ruang, kita dapat memilih komponen-komponen yang terkait dengan arah-arah tersebut

untuk merepresentasikan polarisasi. Arah yang terkait dengan indeks bias yang lebih kecil sering disebut sebagai sumbu cepat (*fast axis / FA*) karena cahaya yang terpolarisasi sepanjang arah tersebut merambat dengan laju yang lebih besar. Kebalikannya, arah yang ortogonal disebut dengan sumbu lambat karena cahaya pada arah tersebut merambat dengan laju yang lebih kecil.

## 4 Analisis Vektor Poynting

Pada suatu titik dalam kehidupan kita, ada kemungkinan kita pernah menemui sekeping kristal kalsit dan ketika kristal itu ditaruh di atas benda, tampaklah “salinan” citra dari benda tersebut (contoh di Gambar 4). Ini adalah fenomena “pembiasan ganda” yang terjadi pada material bias ganda.



Gambar 4: Pembiasan ganda pada kalsit menghasilkan dua citra.

Kita mungkin langsung berpikir bahwa kejadian seperti pada Gambar 4 disebabkan oleh dua indeks bias pada material bias ganda yang membuat sinar-sinar berbelok pada dua sudut berbeda sesuai hukum Snell. Betul demikian, tetapi cerita sepenuhnya belum usai.

Hukum Snell menyatakan bahwa

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r, \quad (22)$$

dengan  $i$  merujuk pada berkas datang dan  $r$  merujuk pada berkas yang terbiaskan. Sudut-sudut pada persamaan di atas merujuk pada arah vektor gelombang  $\vec{k}$  terhadap garis tegak lurus (normal) permukaan. Jika berkas datang secara normal terhadap permukaan  $\theta_i = 0$ , kita akan peroleh  $\theta_r = 0$ , tidak tergantung pada indeks bias. Berkas sinar tampaknya akan melewati medium tanpa pembelokan. Namun, pada material bias ganda, cahaya *dapat* berbelok walaupun hukum Snell tidak mengindikasikannya.

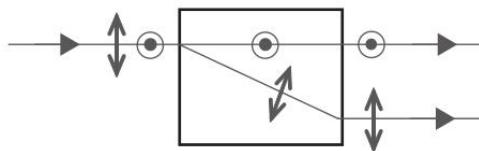
Pertanyaannya, jika vektor gelombang  $\vec{k}$  tidak berbelok, apa lalu yang harus berbelok? Jawabannya, aliran energi yang berbelok. Energi mengalir sepanjang arah vektor Poynting

$\vec{S}$ , yang diberikan oleh medan listrik dan medan magnet sebagai berikut:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} (\vec{E} \times \vec{B}), \quad (23)$$

dengan  $\mu$  adalah permeabilitas dari medium. Di dalam suatu medium isotropik,  $\vec{k} \parallel \vec{S}$  dan  $\vec{k} \perp \vec{E}$ . Sementara itu, di dalam medium anisotropik, cahaya untuk salah satu polarisasi dapat memenuhi relasi tersebut ( $\vec{k} \parallel \vec{S}$  dan  $\vec{k} \perp \vec{E}$ ), disebut sebagai “gelombang biasa”, tetapi cahaya pada polarisasi satunya lagi yang ortogonal (disebut sebagai “gelombang luar biasa”) tidak mesti memenuhinya.

Untuk suatu gelombang biasa yang datang normal pada perbatasan, vektor  $\vec{k}$  dan  $\vec{S}$  sama-sama diteruskan secara lurus melewati batas tersebut tanpa pembelokan. Untuk gelombang luar biasa,  $\vec{k}$  tidak berbelok, tetapi  $\vec{S}$  (dan berkasnya sendiri) akan berbelok. Fenomena ini dikenal sebagai “*Poynting vector walk-off*”. Sebuah gelombang umum yang mengandung kedua polarisasi tersebut akan terbagi menjadi dua dan berjalan pada arah yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Jika muka-muka kristal saling sejajar, dua berkas sinar keluar akan muncul paralel yang tergeser pada jarak tertentu.



Gambar 5: Suatu berkas cahaya yang mengandung polarisasi vertikal dan horizontal terbagi menjadi dua berkas oleh fenomena *Poynting vector walk-off*. Simbol titik (dot) di sini menyatakan polarisasi vertikal, sementara simbol panah atas-bawah menyatakan polarisasi horizontal. Jika bingung, kita harus membayangkan melihat gambar boks polarisator ini sebagai “tampak atas” dan kepala kita mendongak miring ke kanan sampai hampir patah (tapi jangan masuk rumah sakit juga). Dengan begitu, garis-garis berpanah akan masuk akal sebagai polarisasi horizontal.

Dalam seri kuliah ini, kita akan sering merujuk pada polarisator pemindah sinar (“*beam displacing polarizer*”) seperti pada Gambar 5 sebagai suatu *polarization analyzer* (PA). Pada kasus Gambar 5, berkas sinar terbagi menjadi komponen-komponen vertikal dan horizontal sehingga kita dapat menyebut polarisator tersebut sebagai PA<sub>HV</sub>. Andai kita merotasikan perangkat ini dengan sudut 45°, berkas sinar akan teranalisis menjadi komponen-komponen polarisasi linier ±45°, dan kita akan menyebutnya sebagai PA<sub>45</sub>.

## 5 Modifikasi Polarisasi

Material yang kita temui dalam kehidupan sehari-hari memiliki respons yang berbeda terhadap kedatangan cahaya. Misalnya, sebuah benda yang berwarna merah terbuat dari material yang menyerap seluruh gelombang cahaya kecuali warna merah. Sementara

itu, kaca jendela bersifat transparan terhadap cahaya tampak, tetapi menjadi panas di siang hari karena kaca tersebut menyerap cahaya ultraviolet dan inframerah. Hal yang serupa berlaku untuk polarisasi. Setiap material memiliki responsnya sendiri terhadap cahaya tergantung polarisasinya. Material semacam ini digunakan dalam elemen-elemen optik yang berfungsi mengubah polarisasi cahaya.

## Polarisator linier

Beberapa material hanya dapat menyerap komponen cahaya pada arah tertentu yang dapat beresonansi dengan arah getar molekul-molekulnya. Sumbu untuk arah ini, yang berada dalam bidang tegak lurus arah rambat cahaya, dinamakan sumbu penyerapan (*absorption axis*). Lantas, apa yang terjadi dengan komponen cahaya yang tegak lurus dengan sumbu penyerapan? Komponen ini tidak memengaruhi molekul-molekul dalam material sehingga dapat merambat melalui material tersebut. Dengan kata lain, material ini “transparan” dan dapat meneruskan komponen cahaya pada sumbu tegak lurus sumbu penyerapannya, disebut sebagai sumbu transmisi (*transmission axis/TA*).

Gambar 6 menunjukkan sumbu transmisi di dalam bidang yang tegak lurus dengan arah rambat cahaya. Walau tidak ditunjukkan, sumbu penyerapan juga berada di dalam bidang yang sama. Karena satu komponen diserap dan komponen lainnya diteruskan, cahaya akan kehilangan sebagian energinya.

Kita dapat menuliskan secara eksplisit medan listrik yang ditransmisikan oleh polarisator linier. Mari kita tinjau sebuah gelombang EM yang datang pada polarisator semacam itu, dengan medan listrik berbentuk

$$\vec{E}_i = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \vec{P}. \quad (24)$$

$P$  pada persamaan di atas adalah sembarang polarisasi. Sumbu transmisi berada pada arah dari vektor satuan  $\vec{u}_\theta$ , dengan  $\theta$  adalah sudut antara sudut transmisi dan sumbu horizontal. (Catatan: Kita akan biasa merujuk pada arah  $x$  sebagai horizontal dan arah  $y$  sebagai vertikal.) Medan yang ditransmisikan dapat dituliskan sebagai

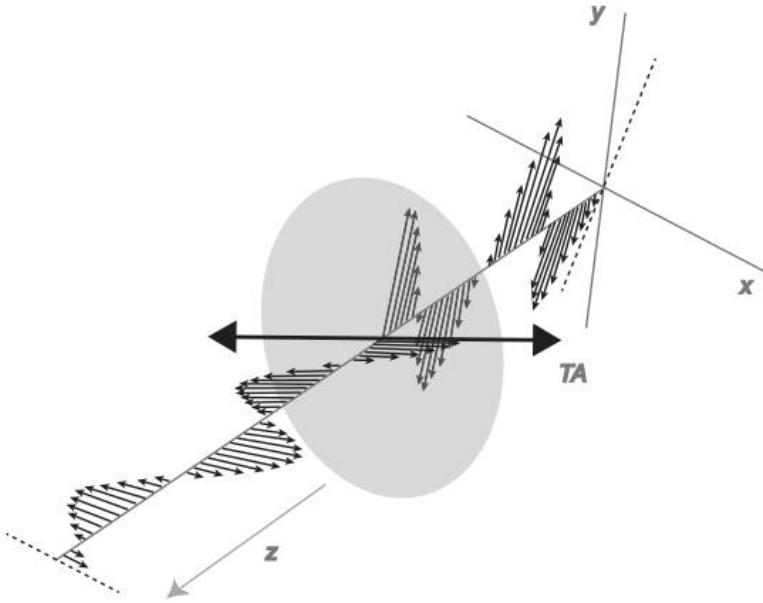
$$\vec{E}_t = (\vec{E}_i \cdot \vec{u}_\theta) \vec{u}_\theta = E_0 e^{i(kz - \omega t)} (\vec{P} \cdot \vec{u}_\theta) \vec{u}_\theta. \quad (25)$$

Medan output menjadi terpolarisasi linier sepanjang  $\vec{u}_\theta$  dan amplitudonya tereduksi oleh faktor  $\vec{P} \cdot \vec{u}_\theta$  seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Untuk cahaya terpolarisasi linier yang membentuk sudut  $\varphi$  dengan sumbu horizontal ( $\vec{P} = \vec{u}_\varphi$ ), amplitudo dari medan ini akan tereduksi oleh faktor  $|\cos(\theta - \varphi)|$ . Intensitasnya proporsional dengan kuadrat medan sehingga intensitas cahaya berkurang dengan faktor  $\cos^2(\theta - \varphi)$ . Kondisi ini adalah hukum Malus. Untuk berkas terpolarisasi melingkar yang datang pada polarisator linier, amplitudo medan tereduksi oleh faktor  $1/\sqrt{2}$  sementara intensitasnya tereduksi oleh faktor  $1/2$ , independen terhadap arah sumbu polarisator.

## Polarisator pembagi berkas

Suatu perangkat yang membagi sebuah berkas menjadi komponen-komponen yang saling ortogonal (misalnya polarisasi linier horizontal dan vertikal) disebut sebagai polarisator



Gambar 6: Sebuah gelombang terpolarisasi linier merambat melalui suatu polarisator linier. Sumbu transmisi polarisator ini direpresentasikan oleh panah TA.

pembagi berkas (“*polarizing beam splitter*”, PBS). Sekeping material bias ganda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dapat pula digunakan sebagai PBS. Selain itu, PBS dapat dibuat menggunakan *coating* lapisan tipis.

## Pelat gelombang

Ketika merambat melalui suatu material bias ganda dengan panjang  $l$ , komponen polarisasi pada sumbu cepat mengumpulkan suatu fase sebesar

$$\phi_f = \frac{n_f 2\pi l}{\lambda}, \quad (26)$$

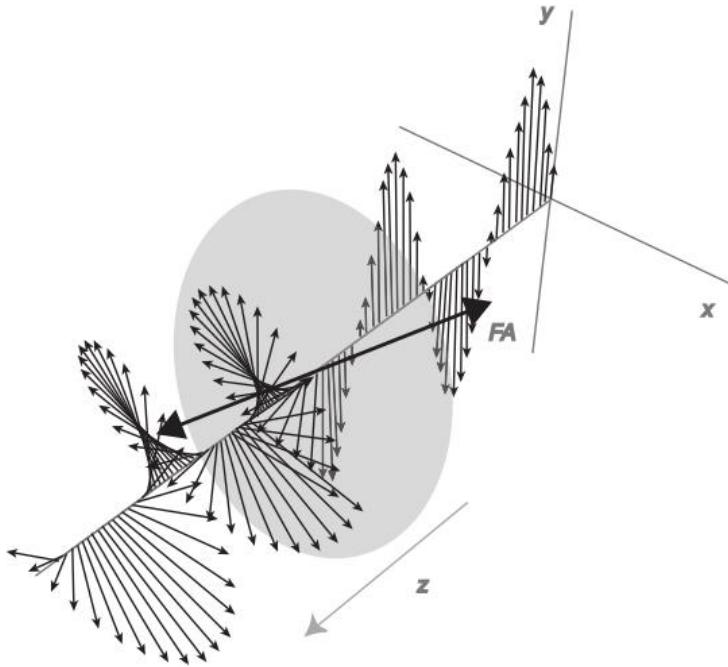
dengan  $n_f$  adalah indeks bias sepanjang sumbu cepat. Di sisi lain, komponen polarisasi pada sumbu ortogonal mengakumulasi suatu fase sebesar

$$\phi_s = \frac{n_s 2\pi l}{\lambda}, \quad (27)$$

dengan  $n_s$  adalah indeks bias sepanjang sumbu lambat. Gelombang ini kemudian memperoleh pergeseran fase relatif antara dua komponen tersebut sebesar

$$\Delta\phi = \phi_s - \phi_f = \frac{(n_s - n_f)2\pi l}{\lambda}, \quad (28)$$

Pergeseran fase relatif antara dua komponen polarisasi yang ortogonal merupakan parameter penting yang menentukan polarisasi gelombang. Pelat gelombang adalah sebuah



Gambar 7: Sebuah gelombang terpolarisasi linier berubah menjadi gelombang terpolarisasi melingkar setelah melalui pelat seperempat gelombang. Sumbu cepat dari pelat gelombang ditunjukkan oleh panah FA.

elemen optik yang memanfaatkan pergeseran fase antara komponen-komponen medan ortogonal untuk mengubah polarisasi suatu gelombang.

Salah satu tipe paling penting dari pelat gelombang adalah “pelat seperempat gelombang”. Di dalam sebuah pelat seperempat gelombang, pergeseran fase antara sumbu-sumbu cepat dan lambat adalah  $\Delta\phi = 2\pi/4 = \pi/2$ , yang bersesuaian dengan seperempat pergeseran panjang gelombang. Secara umum, pergeseran fase untuk pelat seperempat gelombang adalah  $\Delta\phi = 2\pi j + \pi/2$ , dengan  $j$  suatu bilangan bulat. Pelat gelombang dengan  $j = 0$  disebut juga sebagai pelat gelombang berorde nol.

Pelat gelombang lainnya yang kerap digunakan adalah pelat setengah gelombang. Pada pelat ini, pergeseran fase relatif bersesuaian dengan setengah panjang gelombang. Karena pergeseran fase dan indeks bias bergantung pada panjang gelombang, pelat-pelat gelombang dirancang untuk bekerja secara spesifik pada panjang gelombang tertentu.

Mari kita tinjau berkas sinar terpolarisasi vertikal yang datang pada sebuah pelat seperempat gelombang. Jika sumbu cepat dari pelat gelombang sejajar dengan polarisasi yang masuk, kita hanya akan punya satu indeks bias yang relevan, yakni  $n_f$  sehingga gelombang tersebut memperoleh pergeseran fase tetapi tidak ada perubahan polarisasinya. Namun, jika sumbu cepat dari pelat seperempat gelombang membentuk sudut  $45^\circ$  dari garis horizontal, setengah dari cahaya yang masuk akan terpolarisasi ke sumbu cepat dan

setengahnya lainnya terpolarisasi sepanjang sumbu lambat. Dua polarisasi ini memiliki pergeseran fase relatif sebesar  $\pi/2$ .

Pada bagian sebelumnya, kita sudah mengenali bahwa suatu gelombang yang dua komponennya memiliki amplitudo sama dan pergeseran fase relatif sebesar  $\pi/2$  adalah gelombang yang terpolarisasi melingkar. Dengan demikian, pelat seperempat gelombang dapat mengubah berkas terpolarisasi linier menjadi berkas terpolarisasi melingkar seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Sementara itu, pelat setengah gelombang dapat berfungsi merotasikan gelombang masukan terpolarisasi linear untuk keluar menjadi terpolarisasi melingkar pada sembarang arah, dengan sudut rotasi yang ditentukan oleh orientasi pelat gelombang.

## Latihan (Soal-Jawab)

### Soal 1

Sebuah berkas terpolarisasi melingkar kiri datang pada polarisator linier yang sumbu transmisinya membentuk sudut  $\theta$  dari garis horizontal. Tentukanlah faktor ukuran berkurangnya magnitudo medan listrik berkas sinar tersebut.

### Jawaban

Pertama, kita definisikan vektor polarisasi untuk masing-masing komponen. Berkas yang terpolarisasi melingkar kiri (LCP) memiliki vektor polarisasi:

$$\vec{P}_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{u}_x + i\vec{u}_y).$$

Polarisator linier dengan sumbu transmisi yang membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu horizontal ( $x$ ) memiliki vektor polarisasi:

$$\vec{P}_{pol} = \cos \theta \vec{u}_x + \sin \theta \vec{u}_y.$$

Magnitudo medan listrik yang keluar dari polarisator ( $E_{out}$ ) adalah proyeksi dari medan listrik datang ( $\vec{E}_{in} = E_0 \vec{P}_{LCP}$ ) ke arah sumbu transmisi polarisator:

$$E_{out} = |\vec{E}_{in} \cdot \vec{P}_{pol}| = E_0 |\vec{P}_{LCP} \cdot \vec{P}_{pol}|$$

Hitung hasil kali skalar (*dot product*):

$$\begin{aligned} \vec{P}_{LCP} \cdot \vec{P}_{pol} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{u}_x + i\vec{u}_y) \cdot (\cos \theta \vec{u}_x + \sin \theta \vec{u}_y) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\cos \theta + i \sin \theta) = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\theta}, \end{aligned}$$

sehingga

$$E_{out} = E_0 \left| \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\theta} \right| = E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta} = E_0 \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Faktor ukuran berkurangnya magnitudo medan listrik adalah perbandingan magnitudo medan listrik keluar dan medan listrik masuk:

$$\left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right| = \left| \frac{E_0/\sqrt{2}}{E_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Jadi, magnitudo medan listrik berkurang menjadi  $1/\sqrt{2}$  dari magnitudo awalnya.

### Soal 2

Untuk kasus seperti soal sebelumnya, hitunglah faktor ukuran berkurangnya intensitas medan listrik berkas sinar. Apakah ada kebergantungan pada sudut  $\theta$ ?

### Jawaban

Intensitas cahaya ( $I$ ) didefinisikan sebagai kuadrat dari magnitudo medan listrik ( $I \equiv |E|^2$ ). Berdasarkan hasil dari Soal 1, kita telah mendapatkan hubungan antara magnitudo medan listrik keluaran dan masukan:

$$|\vec{E}_{out}| = \frac{1}{\sqrt{2}} |\vec{E}_{in}|$$

Maka, intensitas cahaya yang keluar ( $I_{out}$ ) adalah:

$$I_{out} = |E_{out}|^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{2}} |E_{in}| \right)^2 = \frac{1}{2} |E_{in}|^2 = \frac{1}{2} I_{in}$$

Faktor ukuran berkurangnya intensitas adalah  $1/2$ . Mengenai kebergantungan pada sudut  $\theta$ , berdasarkan perhitungan di atas, hasil akhirnya adalah nilai konstan  $1/2$  yang tidak mengandung variabel  $\theta$ . Penyebabnya, pada polarisasi melingkar, magnitudo komponen medan listrik pada setiap arah di bidang transversal selalu sama. Oleh karena itu, intensitas yang diteruskan oleh polarisator linier akan selalu setengah dari intensitas datang, tidak peduli ke arah mana sumbu transmisi polarisator tersebut diputar.