

# OPTIKA



**Riskan Qadar  
Zeni Haryanto  
Muliati Syam**



**Mulawarman  
University PRESS**

# OPTIKA



(Foto oleh Haryanto di Lokasi Fichtelsee, 95686 Fichtelberg, Jerman)  
(Samsung G935F, F1,7 ISO 50 dan Waktu Pencahayaan 1/344s)

Penulis : Riskan Qadar  
Zeni Haryanto  
Muliati Syam  
Penata Letak : Riskan Qadar  
Desain Cover : Zeni Haryanto

ISBN : 978-602-6834-80-5

© 2019. Mulawarman University Press

Cetakan Pertama: Maret 2019

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun tanpa izin tertulis dari penerbit

Isi diluar tanggung jawab percetakan.

Riskan Qadar, Zeni Haryanto dan Muliati Syam. 2019. Optika.  
Mulawarman University Press. Samarinda.



**Mulawarman**  
**University PRESS**

Penerbit Mulawarman University PRESS

Gedung LP2M Universitas Mulawarman

Jl. Krayan, Kampus Gunung Kelua Samarinda 75123

Telp/Fax (0541) 747432, Email : mup.unmul@gmail.com

ISBN 978-602-6834-80-5



# OPTIKA

Edisi Pertama, 2019

**Tim Penulis:  
Riskan Qadar  
Zeni Haryanto  
Muliati Syam**



## PRAKATA

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Subhaanahu Wa Taala, kepada-Nya kita memuji, memohon pertolongan dan ampunan. Kita berlindung kepada Allah dari kejelekan jiwa dan keburukan amal perbuatan. Selanjutnya, kita mengucapkan sholawat kepada junjungan Baginda Rasulullah Muhammad Sallallahu Alaihi Wasallam yang telah membawa cahaya iman untuk semua manusia agar selamat dunia-akhirat.

Tulisan ini disusun dari beberapa literatur materi optika yang ada sebagai rujukan. Buku yang dihasilkan merujuk pada dua sebab: **Pertama**, sebagai tim pengampu mata kuliah Optika di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Mulawarman. **Kedua**, memudahkan mahasiswa dalam mencari literatur yang disarankan dalam mata kuliah optika.

Isi buku ini menjelaskan tentang sifat-sifat optika yang dilanjutkan pada aplikasinya pada alat-alat optika, peristiwa interferensi, dan difraksi. Persamaan yang digunakan dalam buku ini tergolong sederhana dengan mengedepankan penurunan persamaan secara aljabar. Buku ini ditulis dalam tujuh bab dengan jumlah perkuliahan sebanyak empat belas kali pertemuan. Tujuh kali pertemuan kuliah teori dan tujuh kali pertemuan praktikum. Petunjuk praktikum yang dilampirkan di akhir setiap bab dapat dilakukan sesuai dengan waktu dan peralatan yang tersedia di laboratorium.

Banyak pihak yang terlibat dalam penulisan buku ini, kami tim penulis mengucapkan banyak terima kasih semoga menjadi amal jariyah di sisi Allah Subhaanahu Wa Taala, aamiin.

Samarinda, Januari 2019  
Tim Penulis

Riskan Qadar,  
Zeni Haranto,  
Muliati Syam



## DESKRIPSI MATAKULIAH

Matakuliah ini merupakan prasyarat bagi kelompok matakuliah keahlian program studi pada program S-1 Program Studi Pendidikan Fisika. Setelah mengikuti matakuliah ini mahasiswa diharapkan mampu menguasai pengetahuan optika geometri dan optika gelombang serta dapat mengembangkan dan mengaplikasikan untuk mempelajari pengetahuan fisika optika yang lebih tinggi. Dalam perkuliahan ini dibahas Sifat-Sifat Cahaya: Sifat-Sifat Cahaya, Indeks Refraksi, Lintasan Optik, Hukum Refleksi, Hukum Refraksi, Refleksi Total, Intensitas Cahaya refleksi, Fenomena Gelombang Elektromagnetik, Lampiran Percobaan Sifat-Sifat cahaya. Refleksi dan Refraksi Pada Bidang Datar Dan Lengkung: Dispersi, Polarisasi, Prinsip Fermat, Kaca Plan Paralel, Prisma, Lampiran Percobaan Refleksi dan Refraksi. Cermin: Cermin Datar, Cermin Lengkung, Lampiran Percobaan Cermin. Permukaan Lengkung dan Lensa: Permukaan Lengkung, Lensa Tipis, Lensa Tebal, Lampiran Percobaan Permukaan Lengkung dan Lensa. Alat-Alat Optika: Lup, Mata, Kamera, Mikroskop, Teleskop, Lampiran Percobaan, Alat-Alat Optika. Interferensi: Interferensi Cahaya Dua Celah, Intensitas dalam Pola Interferensi, Interferensi Film Tipis, Cincin Newton, Lampiran Percobaan Interferensi. Difraksi: Difraksi Fresnel dan Fraunhofer, Difraksi Celah Tunggal, Difraksi Cahaya Lubang Lingkaran, Kisi Difraksi, Difraksi Sinar x, Holografi, Lampiran Percobaan Difraksi.

Capaian pembelajaran yang akan ditempuh adalah: Sikap: S1 mencakup; Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa dan mampu menunjukkan sikap religius, jujur dan sabar, S9 mencakup; Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri, dan S10 mencakup; Menginternalisasi semangat kemandirian, kejuangan, dan kewirausahaan. Keterampilan umum: KU2 mencakup; Mampu menunjukkan kinerja mandiri, melakukan pengaturan diri (*self-regulation*), bermutu dan terukur, KU3 mencakup; Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan teknologi yang

memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan bidang pendidikan fisika berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, atau desain, dan KU9 mencakup; Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan serta mencegah plagiasi. Keterampilan khusus: KK4 mencakup; Mampu melakukan penelitian pendidikan fisika dalam bentuk pengkajian dan evaluasi pembelajaran fisika dengan pendekatan kuantitatif dan/atau kualitatif untuk memecahkan permasalahan pembelajaran fisika dan dilaporkan dalam bentuk artikel ilmiah, KK5 mencakup Mampu mengelola sumber daya dan aktivitas yang mencakup penyelenggaraan kelas, laboratorium fisika dan lembaga pendidikan. Selanjutnya untuk Pengetahuan: PP8 mencakup; Menguasai matematika, komputasi, dan instrumentasi untuk mendukung pemahaman konsep fisika, PP9 mencakup Menguasai konsep fisika, pola pikir keilmuan fisika berdasarkan fenomena alam yang mendukung pembelajaran fisika di sekolah, dan PP10 mencakup; Menguasai konsep fisika berdasarkan fenomena alam yang mendukung pendidikan lanjut ke jenjang magister.



**DAFTAR ISI**

<b>BAB 1 SIFAT-SIFAT CAHAYA</b>	<b>1</b>
1.1 Sub Capaian Pembelajaran Mata kuliah	1
1.2 Topik Pembelajaran	1
1.2.1 Sifat-Sifat Cahaya	1
1.2.2 Indeks Refraksi	7
1.2.3 Lintasan Optik	9
1.2.4 Hukum Refleksi	10
1.2.5 Hukum Refraksi	11
1.2.6 Refleksi Total	14
1.2.7 Intensitas Cahaya Refleksi	16
1.2.8 Fenomena Gelombang Elektromagnetik	17
1.3 Rangkuman	23
1.4 Soal-Soal	24
1.5 Lampiran Percobaan Sifat-Sifat cahaya	27
<b>BAB 2 REFLEKSI DAN REFRAKSI PADA BIDANG DATAR DAN LENGKUNG</b>	<b>33</b>
2.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah	33
2.2 Topik Pembelajaran	33
2.2.1 Pelangi	33
2.2.2 Polarisasi	38
2.2.3 Prinsip Fermat	40
2.2.4 Kaca Plan Paralel	43
2.2.5 Prisma	45
2.3 Rangkuman	47
2.4 Soal-Soal	48
2.5 Lampiran Percobaan Refleksi dan Refraksi	51
<b>BAB 3 CERMIN</b>	<b>67</b>
3.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah	67
3.2 Topik Pembelajaran	67

3.2.1	Cermin Datar	67
3.2.2	Cermin Lengkung	70
3.3	Rangkuman	78
3.4	Soal-Soal	79
3.5	Lampiran Percobaan Cermin	81
BAB 4 PERMUKAAN LENGKUNG DAN LENSA		85
4.1	Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah	85
4.2	Topik Pembelajaran	85
4.2.1	Permukaan Lengkung	85
4.2.2	Lensa Tipis	91
4.2.3	Kombinasi Lensa Tipis	97
4.2.4	Lensa Tebal	99
4.3	Rangkuman	108
4.4	Soal-Soal	109
4.5	Lampiran Percobaan Permukaan Lengkung dan Lensa	112
BAB 5 ALAT-ALAT OPTIKA		115
5.1	Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah	115
5.2	Topik Pembelajaran	115
5.2.1	Lup	115
5.2.2	Mata	117
5.2.3	Kamera	123
5.2.4	Mikroskop	128
5.2.5	Teleskop	130
5.3	Rangkuman	131
5.4	Soal-Soal	132
5.5	Lampiran Percobaan Alat-Alat Optika	135
BAB 6 INTERFERENSI		137
6.1	Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah	137
6.2	Topik Pembelajaran	137
6.2.1	Interferensi Cahaya Dua Celah	137
6.2.2	Intensitas Dalam Pola Interferensi	140

6.2.3	Interferensi Film Tipis	142
6.2.4	Cincin Newton	144
6.3	Rangkuman	146
6.4	Soal-Soal	147
6.5	Lampiran Percobaan Interferensi	150
BAB 7 DIFRAKSI		153
7.1	Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah	153
7.2	Topik Pembelajaran	153
7.2.1	Difraksi Fresnel dan Fraunhofer	153
7.2.2	Difraksi Cahaya Celah Tunggal	154
7.2.3	Difraksi Cahaya Lubang Lingkaran	155
7.2.4	Kisi Difraksi	156
7.2.5	Difraksi Sinar x	159
7.2.6	Hologafi	160
7.3	Rangkuman	161
7.4	Soal-Soal	162
7.5	Lampiran Percobaan Difraksi	164
DAFTAR PUSTAKA		167
GLOSARIUM		169

## BAB 1 SIFAT-SIFAT CAHAYA



Matahari memancarkan gelombang elektromagnetik dan cahaya tampak yang dimilikinya dapat menerangi semua benda di sekeliling kita

### 1.1 Sub Capaian Pembelajaran Mata kuliah

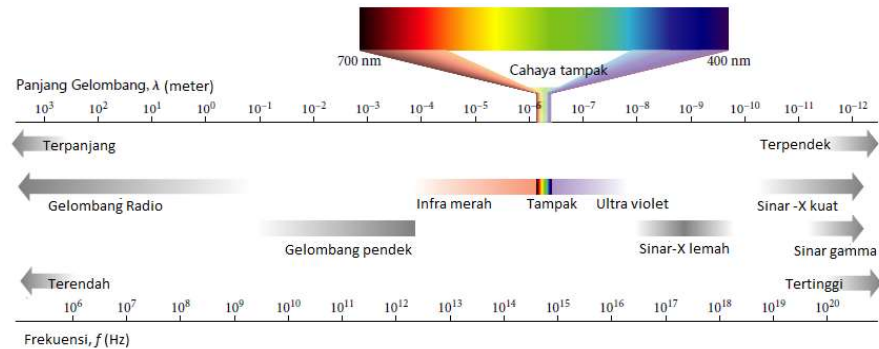
Setelah mengikuti perkuliahan mahasiswa diharapkan dapat menguasai konten Sifat-Sifat Cahaya, Indeks Refraksi, Lintasan Optik, Hukum Refleksi, Hukum Refraksi, Refleksi Total, Intensitas Cahaya Refleksi, Fenomena Gelombang elektromagnetik, dan melakukan percobaan sifat-sifat cahaya.

### 1.2 Topik Pembelajaran

#### 1.2.1 Sifat-Sifat Cahaya

Sejarah optika dimulai dengan contoh-contoh kegunaan dan situasi unik yang terjadi di sekitar kita. Adapun pengetahuan optika diawali ketika manusia mulai memahami dan menggambarkan tentang cahaya sejak 2500 tahun terakhir. Kata optika berasal dari sebuah buku tentang persepsi visual yang ditulis oleh Euclid di sekitar 2300 tahun yang lalu. Euclid mengembangkan teori geometris yang menjelaskan pengamatan gambar dengan cermin. Sejumlah nama yang muncul dalam sejarah optika seperti Ptolemy, Bacon, Brahe, Kepler, dan terbaru seperti Newton, Huygens, Fermat, Young, dan Einstein. Pada awalnya banyak ilmuwan belum mengetahui apa sebenarnya cahaya itu. Sampai abad ke-17, sebagian besar ilmuwan berpikir bahwa cahaya terdiri dari aliran partikel-partikel kecil atau *corpuscles*. Sekitar tahun 1665, sifat cahaya sebagai

gelombang mulai ditemukan dan sangat meyakinkan sebagai gelombang pada abad ke-19.



Gambar 1.1 Spektrum gelombang elektromagnetik dan ukuran benda (Sumber: Bauer, 2011)

Tahun 1873, James Clerk Maxwell meramalkan keberadaan gelombang elektromagnetik dan menghitung laju perambatannya. Walaupun laju rambat gelombang yang ditemukan oleh Maxwell tidak persis sama dengan laju cahaya yang ditemukan sekarang. Namun, keberadaan gelombang elektromagnetik telah membuka wawasan bahwa cahaya sebagai gelombang elektromagnetik. Pada tahun 1887, tidak lama setelah Maxwell meramalkan keberadaan gelombang elektromagnetik, Heinrich Hertz memperlihatkan secara meyakinkan bahwa cahaya sesungguhnya adalah gelombang elektromagnetik.

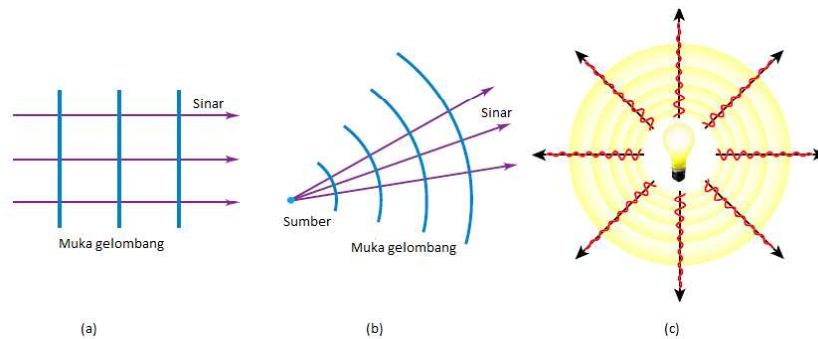
Cahaya sebagai gelombang elektromagnetik merupakan cabang dari elektromagnetisme dalam bentuk cahaya tampak. Spektrum gelombang elektromagnetik diilustrasikan pada Gambar 1.1 dengan panjang gelombang berkisar dari  $10^{-12}$  m (yang terpendek) sampai 1000 m (yang terpanjang), dengan frekuensi yang sesuai dari  $10^{20}$  Hz sampai  $10^5$  Hz. Cahaya tampak merupakan bagian dari gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang antara 400 nm (warna ungu) sampai 700 nm (warna merah).

Sumber-sumber cahaya seperti matahari merupakan sumber cahaya utama. Sumber cahaya lain seperti lampu pijar, lampu berpendar (neon), layar televisi, laser, dan *LEDs* (*light-emitting diodes*) semua ini

menggunakan listrik untuk memproduksi cahaya. Untuk benda seperti bulan yang kelihatan bercahaya adalah benda yang memantulkan cahaya dari matahari karena bulan tidak memiliki sumber cahaya sendiri.

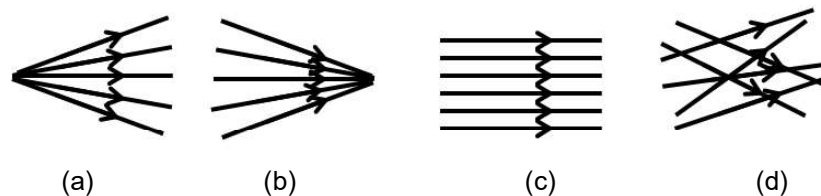
Sebuah muka gelombang merupakan permukaan fasa yang konstan; muka gelombang bergerak dengan laju yang sama dengan laju perambatan gelombang itu.

Sinar merambat menurut garis lurus sepanjang arah rambatan, yang tegak lurus terhadap muka gelombang seperti tampak pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 (a) Sinar dan muka gelombang datar, (b) sinar dan muka gelombang sferis, (c) sumber cahaya, muka gelombang dan sinar

Jenis-jenis sinar dikenal ada empat yaitu: (a) sinar divergen atau menyebar, (b) sinar konvergen atau mengumpul, (c) sinar sejajar, dan (d) sinar difus.



Gambar 1.3. Jenis-jenis rambatan sinar (a) menyebar (divergen), (b) mengumpul (konvergen), (c) sejajar (paralel), dan (d) baur (difus)

Percobaan mengukur laju cahaya telah dilakukan para fisikawan diantaranya Galileo tahun 1600 dan Armand H.L. Fizeau tahun 1849. Dari berbagai percobaan mengukur laju cahaya, hasil yang diperoleh sampai saat ini disepakati tahun 1998 laju cahaya dalam vakum sebesar  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s atau disingkat  $c = 3,00 \times 10^8$  m/s.

Tahun 1850 fisikawan Perancis Jean Bernard Leon Foucault (1819-1868) mempublikasikan hasil percobaannya tentang laju cahaya dalam air. Hasil yang diperoleh Foucault menyatakan bahwa laju cahaya dalam air lebih kecil dibanding laju cahaya dalam udara. 40 tahun kemudian fisikawan Amerika Michelson mengukur laju cahaya di udara dan di air. Hasil yang diperoleh laju cahaya dalam air sebesar 225 000 km/s. Nilai ini  $\frac{3}{4}$  dari laju cahaya dalam vakum. Laju cahaya di udara pada suhu normal terukur  $v = 299,706$  km/s.

Cahaya memiliki beberapa sifat diantaranya:

- a) Merambat secara garis lurus dalam medium yang sama
- b) Refleksi merupakan peristiwa sinar datang dipantulkan kembali ke medium semula setelah menyentuh medium lain
- c) Refraksi merupakan peristiwa pembelokan sinar datang pada batas medium
- d) Dispersi merupakan penguraian cahaya putih menjadi beberapa warna setelah mengalami refraksi pada medium lain.
- e) Interferensi merupakan situasi dua gelombang atau lebih saling tumpang tindih setelah melewati dua celah sempit.
- f) Difraksi merupakan interferensi sebuah gelombang tertentu dengan dirinya sendiri.
- g) Polarisasi merupakan karakteristik untuk semua gelombang transversal.
- h) Refraksi ganda merupakan peristiwa terjadinya dua sinar refraksi yang berasal dari sinar tunggal.

Gelombang elektromagnetik dengan panjang (dan frekuensi) dalam rentang tertentu diidentifikasi dengan nama karakteristik:

- Cahaya tampak mengacu pada gelombang elektromagnetik yang dapat dilihat secara langsung dengan panjang gelombang dari 400 nm (ungu) sampai 700 nm (merah). Respon tertinggi mata manusia di sekitar 560 nm (kuning-hijau) dan menurun dengan cepat jauh dari panjang gelombang itu. Panjang gelombang lain dari gelombang

elektromagnetik tidak dapat dilihat oleh mata manusia. Namun, dapat dideteksi dengan cara lain.

- Gelombang inframerah (dengan panjang gelombang yang lebih besar dari cahaya tampak sekitar  $10^{-4}$  m) dirasakan sebagai kehangatan. Detektor inframerah dapat digunakan untuk mengukur kebocoran panas di rumah dan kantor. Banyak hewan memiliki kemampuan untuk melihat gelombang inframerah, sehingga mereka dapat melihat dalam gelap. Inframerah dapat juga digunakan dalam kran otomatis di toilet umum dan remote control untuk TV dan DVD player.
- Sinar ultraviolet memiliki panjang gelombang yang sangat pendek dari panjang gelombang cahaya tampak. Sinar ultraviolet dapat merusak kulit dan menyebabkan kulit terbakar. Untungnya, atmosfer bumi, terutama lapisan ozon yang mencegah sebagian besar sinar ultraviolet matahari mencapai permukaan bumi. Sinar ultraviolet digunakan di rumah sakit untuk mensterilkan peralatan dan juga menghasilkan sifat optik seperti fluoresensi.
- Gelombang radio memiliki frekuensi mulai dari beberapa ratus kHz (radio AM) sampai 100 MHz (radio FM). Gelombang radio juga banyak digunakan dalam astronomi karena dapat melewati awan debu dan gas yang menghalangi cahaya tampak.
- Gelombang mikro digunakan untuk popcorn dalam oven microwave dan mengirim pesan telepon melalui menara atau satelit, memiliki frekuensi sekitar 10 GHz. Radar menggunakan gelombang dengan panjang gelombang antara gelombang radio dan gelombang mikro yang memungkinkan untuk melakukan perjalanan dengan mudah melalui atmosfer dan merefleksikan benda dari ukuran bola bisbol sampai ukuran awan badai.
- Sinar-x digunakan untuk menghasilkan gambar medis, memiliki panjang gelombang dalam orde  $10^{-10}$  m. Panjang ini hampir sama jarak antara dua atom dalam kristal padat, sehingga sinar-x digunakan untuk menentukan secara detail struktur molekuler bahan apapun yang dapat mengkristal.



- Sinar gamma yang dipancarkan dalam peluruhan radio aktif memiliki panjang gelombang sangat pendek, dalam orde  $10^{-12}$  m, dan dapat menyebabkan kerusakan sel-sel manusia. Sinar gamma sering digunakan dalam medis untuk menghancurkan sel-sel kanker atau jaringan ganas lainnya yang sulit dijangkau.

Seiring perkembangan elektrodinamika kuantum, tahun 1930 sifat cahaya dalam bentuk lain muncul, yakni adanya aspek partikel yang dinamakan foton atau kuantum. Sifat cahaya sebagai partikel dapat ditemukan melalui eksperimen efek Compton dan efek fotolistik. Hal ini, dapat dikatakan bahwa cahaya memiliki dua sifat, yakni sebagai gelombang dan sebagai partikel. Namun, kedua sifat itu belum dapat dibuktikan secara bersamaan melainkan dibuktikan secara terpisah.

Cahaya memiliki dua sifat; sebagai partikel (foton) memiliki energi sebesar

$$E = hf \quad (1.1)$$

dengan

$h$  = konstanta planck =  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s;  $f$  = frekuensi cahaya dan sebagai gelombang yang merambat dalam vakum memiliki karakteristik frekuensi ( $f$ ), panjang gelombang ( $\lambda$ ), dan laju cahaya ( $c$ ) dengan persamaan

$$c = \lambda f \quad (1.2)$$

### Contoh 1.1

Berapa waktu yang diperlukan cahaya merambat dari matahari ke bumi? Asumsikan jarak bumi-matahari  $1,50 \times 10^8$  km.

#### Solusi

Data:  $d = 1,50 \times 10^{11}$  m ;  $c = 3,00 \times 10^8$  m/s

$$t = \frac{d}{c} = \frac{1,50 \times 10^{11} \text{ m}}{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 500 \text{ s}$$

### Contoh 1.2

Tentukan energi (a) sebuah foton yang memiliki frekuensi  $5,00 \times 10^{17}$  Hz dan (b) sebuah foton yang panjang gelombangnya  $3,00 \times 10^2$  nm. Nyatakan jawaban dalam satuan elektron volt (eV), catatan  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$  J.

**Solusi**

Data:  $f = 5,00 \times 10^{17} \text{ Hz}$ ;  $\lambda = 3,00 \times 10^2 \text{ nm}$ ;  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$(a) E = hf = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(5,00 \times 10^{17} \text{ Hz}) = 3,31 \times 10^{-16} \text{ J} = 2,07 \times 10^3 \text{ eV}$$

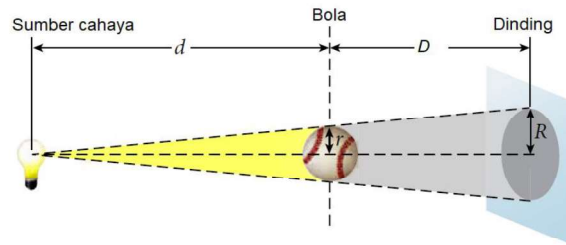
$$(b) E = h \frac{c}{\lambda} = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{3,00 \times 10^2 \text{ nm}} = 6,626 \times 10^{-19} \text{ J} = 4,14 \text{ eV}$$

**Contoh 1.3**

Cahaya dari sumber mengenai sebuah bola dan menghasilkan bayang-bayang bola di dinding. Diameter bola adalah 15,0 cm dan diameter bayang-bayang bola 29,0 cm. Bola berada 2,25 m dari dinding. Berapa jauhkan sumber cahaya dari dinding?

**Solusi**

Data:  $r = 7,50 \text{ cm}$ ;  $R = 14,5 \text{ cm}$ ;  $D = 2,25 \text{ m}$



Gambar 1.4

Secara matematis hubungan radius dan jarak dapat ditulis

$$\frac{r}{d} = \frac{R}{d+D} \rightarrow d + D = \frac{dR}{r} \rightarrow d - \frac{dR}{r} = -D \rightarrow d \left( 1 - \frac{R}{r} \right) = -D$$

$$d = \frac{D}{\frac{R}{r} - 1} = \frac{rD}{R-r}$$

Jarak dari sumber cahaya ke dinding

$$d + D = \frac{rD}{R-r} + D = \frac{(0,0750 \text{ m})(2,25 \text{ m})}{0,145 \text{ m} - 0,0750 \text{ m}} + 2,25 \text{ m} = 4,66 \text{ m}$$

**1.2.2 Indeks Refraksi**

Jika cahaya ditransmisikan dari satu material ke materi lain, frekuensi cahaya tidak berubah, tetapi panjang gelombang dan laju gelombang dapat berubah. Indeks refraksi (bias)  $n$  suatu material adalah

rasio laju cahaya dalam vakum  $c$  terhadap laju cahaya  $v$  dalam material. Jika  $\lambda_0$  adalah panjang gelombang dalam vakum, gelombang yang sama itu panjang gelombangnya  $\lambda$  lebih pendek dalam material dengan indeks refraksi  $n$ . Hubungan variabel-variabel ini adalah

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

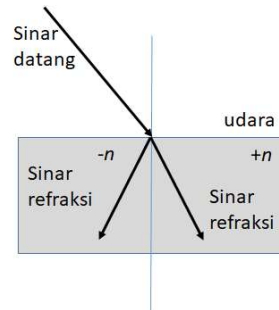
dan

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (1.4)$$

Hubungan kedua persamaan

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 f}{\lambda f} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (1.5)$$

Ditemukan indeks refraksi negatif, yakni sinar yang diarahkan pada medium metamaterial akan mengalami pembelokan seperti gambar 1.5. Istilah metamaterial diciptakan tahun 1999 oleh Rodger M. Walsler dari Universitas Texas-Austin. Bahan metamaterial ini tidak tersedia di alam. Metamaterial merupakan struktur periodik mikroskopik yang memiliki struktur sel dan komposisi kimiawi. Metamaterial didesain untuk menghasilkan koefisien permeabilitas negatif  $\mu$  dan permitivitas negatif  $\epsilon$  dengan persamaan  $n = -\sqrt{\mu\epsilon}$ . Peristiwa refraksi secara umum tunduk pada hukum Snell, berlaku jika sinar datang dari medium indeks refraksi positif ke medium indeks refraksi positif atau sinar datang dari medium indeks refraksi positif ke medium indeks refraksi negatif.



Gambar 1.5 Ilustrasi sinar mengalami refraksi pada medium berindeks positif dan negatif

Tabel 1-1 Daftar beberapa material dengan indeks refraksi untuk cahaya natrium kuning dengan  $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$

Zat	$n$	Zat	$n$	Zat	$n$
<b>Padatan</b>		<b>Kaca (umum)</b>		<b>Cairan (suhu 20°C)</b>	
Es (H <sub>2</sub> O)	1,309	Mahkota	1,52	Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	1,329
Polistiren	1,49	Batu api ringan	1,58	Air (H <sub>2</sub> O)	1,333
Garam batu (NaCl)	1,544	Batu api sedang	1,62	Terpentin	1,472
Kwarsa (SiO <sub>2</sub> )	1,544	Batu api berat	1,66	Gliserin	1,473
Intan (C)	2,419			Benzena	1,501

**Contoh 1.4**

Seberkas sinar dari udara yang memiliki panjang gelombang 700 nm memasuki intan yang memiliki indeks refraksi sebesar 2,419. Berapakah laju cahaya dan panjang gelombang sinar itu dalam intan?

**Solusi**

Data:  $c = 3,00 \times 10^8$  m/s;  $n = 2,419$ ;  $\lambda_0 = 700$  nm

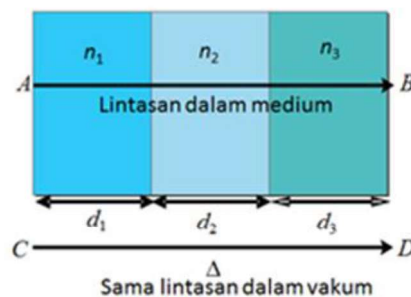
$$(a) v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,419} = 1,24 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$(b) \lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{700 \text{ nm}}{2,419} = 289 \text{ nm}$$

**1.2.3 Lintasan Optik**

Salah satu prinsip dasar optika geometri adalah lintasan optis. Cahaya yang merambat sejauh  $d$  diberikan oleh hasil kecepatan kali waktu:  $d = vt$  karena  $n = c/v \rightarrow v = c/n$ , diperoleh  $d = \frac{c}{n} t$  atau  $nd = ct$ . Hasil  $nd$  disebut lintasan optis  $\Delta \rightarrow \Delta = nd$ . Jika cahaya merambat dalam beberapa medium berjarak  $d_1, d_2, d_3$  yang memiliki indeks refraksi berbeda  $n_1, n_2, n_3$  akan sama jika lintasan optis secara langsung dalam vakum sejauh  $\Delta$  sehingga

$$\Delta = n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 \quad (1.6)$$



Gambar 1.6 Lintasan optis dalam beragam indeks refraksi

**Contoh 1.5**

Seberkas cahaya melintas dalam balok kaca yang tebalnya 10,0 cm, kemudian masuk ke dalam air yang jaraknya 30,5 cm, dan terakhir masuk

ke dalam balok kaca lain yang tebalnya 5.00 cm. Jika indeks refraksi kedua kaca 1,53 dan air 1,33, tentukan lintasan optis totalnya?

### Solusi

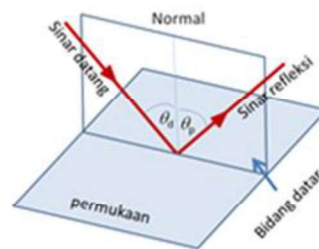
Data:  $d_1 = 10,0$  cm;  $d_2 = 30,5$  cm;  $d_3 = 5,00$  cm;  $n_1 = n_3 = 1,53$ ;  $n_2 = 1,33$   
 $\Delta = n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 = (1,53)(10,0 \text{ cm}) + (1,33)(30,5 \text{ cm}) + (1,53)(5,00 \text{ cm}) = 29,6 \text{ cm}$

### 1.2.4 Hukum Refleksi

Sudut sinar refleksi (pantul),  $\theta_p$ , menghasilkan besar sudut yang sama dengan sudut sinar datang,  $\theta_d$ , yakni

$$\theta_d = \theta_p, \quad (1.7)$$

Sifat lain, sinar datang, garis normal, dan sinar refleksi terletak pada satu bidang datar. Besar sudut sinar diukur antara sinar dengan garis normal. Peristiwa refleksi telah dikenal oleh Euclides (330-260 SM).



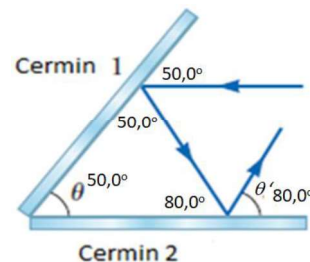
Gambar 1.7 Peristiwa refleksi pada bidang datar

### Contoh 1.6

Dua cermin datar salah satu ujungnya membentuk sudut  $\theta = 50,0^\circ$  satu dengan yang lain. Jika sinar sejajar cermin 2 datang pada cermin 1, pada sudut berapakah sinar itu direfleksikan meninggalkan permukaan cermin 2?

### Solusi

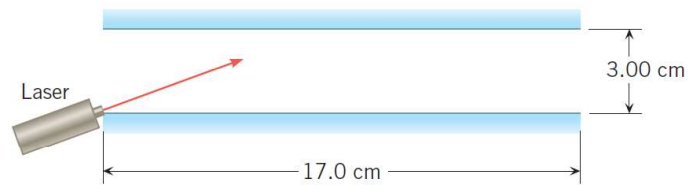
Sinar datang sejajar cermin 2, memiliki sudut sinar datang  $40,0^\circ$ . Sinar refleksinya menuju cermin 2 dengan sudut datang  $10,0^\circ$  dan sudut refleksinya pada cermin 2 juga  $10,0^\circ$ . Berarti sinar meninggalkan cermin 2 dengan sudut  $80,0^\circ$



Gambar 1.8

**Contoh 1.7**

Dua cermin datar berhadapan secara paralel satu sama lain. Jarak kedua cermin 3,00 cm dan panjangnya 17,0 cm seperti Gambar 1.9. Seberkas sinar laser diarahkan pada bagian atas cermin dari sisi kiri cermin bawah. Berapakah sudut datang terkecil pada cermin bagian atas seperti yang terlihat di gambar. (a) jika hanya mengenai satu cermin dan (b) mengenai setiap cermin hanya sekali?



Gambar 1.9

**Solusi**

Data:  $x = 17,0 \text{ cm}$ ;  $y = 3,00 \text{ cm}$ ; (a)  $\theta = \dots ?$  (tidak menyentuh cermin bawah);  
 (b)  $\theta = \dots ?$  (menyentuh kedua cermin hanya sekali).

(a) Sinar refleksi dari cermin atas tidak menyentuh cermin bawah, jadi sinar datang pada cermin atas paling dekat pada jarak  $\frac{1}{2}$  panjang cermin = 8,50 cm dari sisi kiri cermin, sehingga sudut datangnya paling kecil adalah  $\tan \theta = \frac{8,50 \text{ cm}}{3,00 \text{ cm}} = 2,83 \rightarrow \theta = 70,6^\circ$

(b) Sinar hanya menyentuh masing-masing sekali pada cermin, jadi sinar datang pada cermin atas paling dekat pada jarak  $\frac{1}{3}$  panjang cermin = 5,67 cm dari sisi kiri cermin, sehingga sudut datang paling kecil adalah  $\tan \theta = \frac{5,67 \text{ cm}}{3,00 \text{ cm}} = 1,89 \rightarrow \theta = 62,1^\circ$

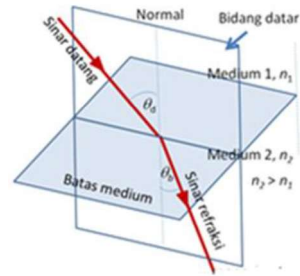
**1.2.5 Hukum Refraksi**

Hasil eksperimen Willebrord van Roijen Snell (1580-1626) yang dipublikasikan tahun 1621 dengan konstruksi geometri dengan perbandingan cosecan dan dikenal sebagai hukum Snell, sedangkan Descartes menggunakan perbandingan sinus (sumber: *Fundamentals of Optics*, Jenkins, F.A, dan White, H.E.). Berdasarkan hasil konstruksi

geometri di atas baik oleh Snell maupun Descartes persamaan hukum

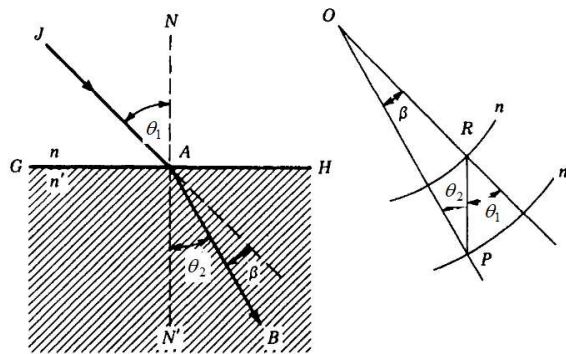
refraksi dapat dituliskan sebagai:  $n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_d}{\sin \theta_b}$ .

Syarat lain, sinar datang, garis normal, dan sinar refraksi terletak pada satu bidang datar.



Gambar 1.10 Peristiwa sinar datang yang mengalami refraksi pada medium kedua.

Untuk membuktikan persamaan hukum refraksi dapat dilakukan melalui Gambar 1.11



Gambar 1.11

### Bukti:

Aplikasi hukum sinus segitiga  $ORP$

Keterangan:

$\beta$  = sudut antara sinar datang dengan sinar bias =  $\theta_1 - \theta_2$

$OR = JA$  = sinar datang;

$OP = AB$  = sinar bias

$RP = AN'$  = garis normal

$\theta_1$  = sudut sinar datang

$\theta_2$  = sudut sinar refraksi

$$\frac{OR}{\sin \theta_2} = \frac{OP}{\sin(\pi - \theta_1)} ; \sin(\pi - \theta_1) = \sin \theta_1 ;$$

$$OR = n; OP = n'$$

$$\frac{OR}{\sin \theta_2} = \frac{OP}{\sin \theta_1} \rightarrow \frac{n}{\sin \theta_2} = \frac{n'}{\sin \theta_1} \rightarrow n \sin \theta_1 = n' \sin \theta_2 \quad (1.8)$$

dengan  $n$  dan  $n'$  indeks refraksi medium sinar datang dan medium sinar refraksi serta  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  sudut sinar datang dan sudut sinar refraksi.

### Contoh 1.8

Cahaya dalam ruang hampa (vakum) datang pada permukaan slab kaca. Dalam vakum cahaya membentuk sudut  $32,0^\circ$  dengan garis normal permukaan, sementara di kaca membentuk sudut  $21,0^\circ$  dengan garis normal. Berapa indeks bias kaca?

#### Solusi

Data:  $n_1 = 1,00$ ;  $\theta_1 = 32,0^\circ$ ;  $\theta_2 = 21,0^\circ$ ;  $n_2 = \dots$

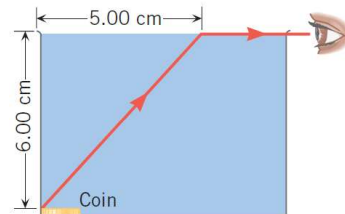
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$(1,00)(\sin 32,0^\circ) = n' (\sin 21,0^\circ) \rightarrow n' = 1,48$$

### Contoh 1.9

Gambar di samping menunjukkan sebuah koin yang berada di dasar gelas kimia dalam cairan yang belum diketahui.

Seberkas sinar cahaya dari koin merambat ke permukaan menuju udara. Seorang pengamat melihat sinar dari atas permukaan cairan. Berapa cepat cahaya merambat dalam cairan?



Gambar 1.12

#### Solusi

Data:  $y = 6,00$  cm;  $x = 5,00$  cm;  $n_u = 1,00$

Dari gambar tampak bahwa sinar keluar menuju udara mengalami refraksi sebesar  $\theta_u = 90^\circ$ . adapun besar sudut datang sinar dalam cairan adalah

$$\tan \theta_c = \frac{x}{y} = \frac{5,00 \text{ cm}}{6,00 \text{ cm}} = 0,833 \rightarrow \theta_c = 39,8^\circ$$

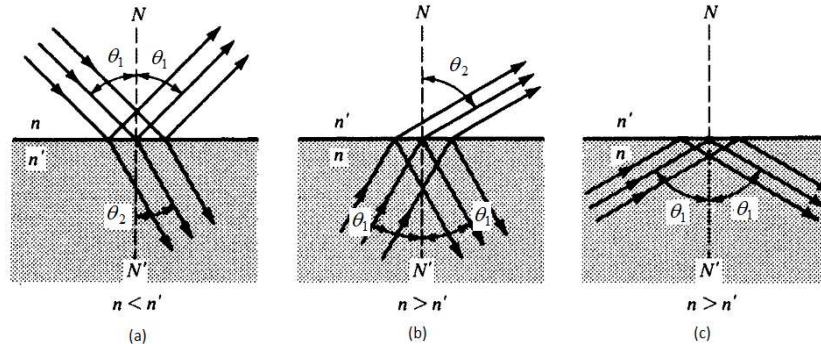
$$n_c \sin \theta_c = n_u \sin \theta_u \rightarrow n_c (\sin 39,8^\circ) = (1,00)(\sin 90^\circ) \rightarrow n_c = 1,56$$

Laju cahaya dalam cairan

$$v = \frac{c}{n_c} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,56} = 1,92 \times 10^8 \text{ m/s}$$



### 1.2.6 Refleksi Total



Gambar 1.13 Berkas sinar yang mengalami refleksi, refraksi, dan refleksi total.

Ada tiga jenis sinar refleksi (pantul). Jika sinar refleksi memiliki sudut dari  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  disebut sinar refleksi **eksternal**, karena sinar datang berasal dari medium renggang ke medium rapat, seperti Gambar 1.13a. Sinar refleksi yang memiliki sudut  $0^\circ \leq \theta < \theta_{\text{kritis}}$  disebut sinar refleksi **internal**, karena sinar datang berasal dari medium rapat ke medium renggang, seperti gambar 1.13b. Adapun sinar refleksi yang terjadi pada sudut  $\theta_{\text{kritis}} \leq \theta \leq 90^\circ$  disebut sinar refleksi **total**, seperti gambar 1.13c. Saat terjadi refleksi total sinar refraksi  $\theta_2 = 90^\circ$ , maka sinar datang pada posisi sudut kritis  $\theta_1 = \theta_k$ , jadi  $n \sin \theta_k = n' \sin 90^\circ = n'$

$$\theta_k = \sin^{-1} \frac{n'}{n} \text{ dengan } n > n' \quad (1.9)$$

dengan  $\theta_k$  adalah sudut kritis sinar datang.

#### Contoh 1.10

Indeks bias benzena adalah 1,80. Berapakah sudut kritis untuk suatu cahaya yang bergerak di dalam benzena menuju suatu lapisan datar udara di atas benzena?

#### Solusi

Data:  $n_1 = 1,80$ ;  $\theta_k = \dots?$ ;  $n_2 = 1,00$

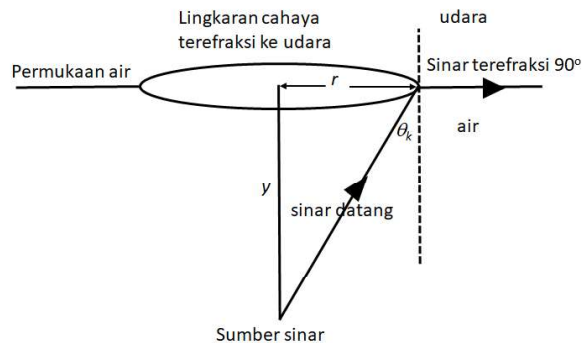
$$\theta_k = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} \frac{1,00}{1,80} = 33,7^\circ$$

**Contoh 1.11**

Suatu sumber cahaya berada 80,0 cm di bawah suatu permukaan air. Tentukanlah diameter lingkaran yang ditembus cahaya ketika keluar dari air.

**Solusi**

Data:  $y = 80,0$  cm;  $n_{air} = 1,33$ ;  $n_{udara} = 1,00$ ;  $\theta_t = 90^\circ$



Gambar 1.14

Berdasarkan hukum Snell jika sinar mengalami refraksi  $90^\circ$  akan memiliki sudut datang kritis sebesar  $\theta_k$ ,

$$n_{air} \sin \theta_k = n_{udara} \sin \theta_{udara} \rightarrow (1,33)(\sin \theta_k) = (1,00)(\sin 90^\circ) \rightarrow \theta_k = 48,8^\circ$$

Jejari lingkaran yang terjadi besarnya

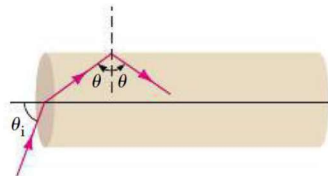
$$\tan \theta_k = \frac{r}{y} \rightarrow \tan 48,8^\circ = \frac{r}{80,0 \text{ cm}} \rightarrow r = 91,4 \text{ cm}$$

Diameter lingkaran yang terjadi adalah  $D = 2 \times 91,4 \text{ cm} = 183 \text{ cm}$

**Contoh 1.12**

Terjadi refleksi total dalam fiber optik seperti Gambar 1.15, sudut  $\theta$  harusnya lebih besar daripada sudut kritis untuk permukaan udara-fiber.

Pada ujung fiber, cahaya datang dari bawah dan mengalami refraksi ke dalam fiber. Jika refleksi total terjadi pada sudut  $\theta$  di luar ujung fiber, berapa indeks refraksi fiber?

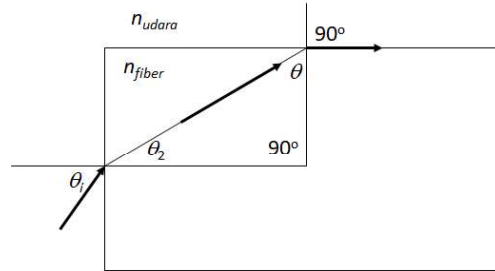


Gambar 1.15

**Solusi**

Perjalanan sinar digambarkan seperti berikut

Pada permukaan atas fiber sinar mengalami refleksi total, sudut sinar datang minimal sebesar sudut kritis. Dalam hukum Snell  $n_f \sin \theta = n_u \sin 90^\circ = 1$ ,



Gambar 1.16

$$\sin \theta = \sin 90^\circ - \theta_2 = \cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}$$

Hukum Snell di permukaan atas

$$n_f \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = 1$$

Di ujung kiri fiber sinar dari udara,

$$\sin \theta = n_f \sin \theta_2 \rightarrow \sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_i}{n_f} \text{ kemudian dikuadratkan menjadi}$$

$$\sin^2 \theta_2 = \frac{\sin^2 \theta_i}{n_f^2} \text{ dan mensubstitusi ke persamaan } n_f \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = 1$$

$$\text{menjadi } n_f \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_f^2}} = 1$$

kedua sisi dikuadrat menjadi

$$n_f^2 - \sin^2 \theta_i = 1 \rightarrow n_f^2 = 1 + \sin^2 \theta_i \rightarrow n_f = \sqrt{1 + \sin^2 \theta_i}$$

Untuk mendapatkan indeks refraksi maksimum fiber berarti nilai

$$\sin^2 \theta_i = 1, \text{ sehingga}$$

$$n_f = \sqrt{1 + 1} = 1,41$$

### 1.2.7 Intensitas Cahaya Refleksi

Fraksi cahaya refleksi pada batas medium, seperti pada permukaan udara-kaca, gayut pada sudut datang sinar. Namun, jika sinar datang pada medium dengan arah normal  $\theta_1 = 0^\circ$  akan menghasilkan sudut refraksi juga  $\theta_2 = 0^\circ$ , maka intensitas sinar refleksi diberikan

$$I = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 I_0 \quad (1.10)$$

dengan  $I_0$  intensitas sinar datang,  $n_1$  indeks refraksi medium pertama, dan  $n_2$  indeks refraksi medium kedua.

**Contoh 1.13**

Seberkas cahaya dalam udara menuju kaca dengan sudut datang arah normal. Kaca memiliki indeks refraksi 1,50. Perkirakan persentase intensitas sinar datang yang mengalami refleksi dan refraksi.

**Solusi**

Data:  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,50$

Intensitas cahaya yang mengalami refleksi sebesar

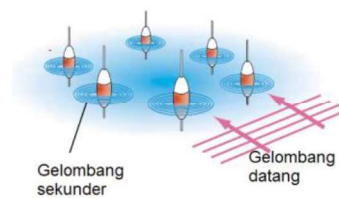
$$I = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 I_o \rightarrow \frac{I}{I_o} = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left( \frac{1,00 - 1,50}{1,00 + 1,50} \right)^2 = 0,04 = 4 \%$$

Dan intensitas cahaya yang mengalami refraksi 96 %

### 1.2.8 Fenomena Gelombang Elektromagnetik: Hamburan dan Penglihatan Warna

**Hamburan**

Salah satu sifat cahaya adalah dapat dihamburkan oleh partikel-partikel udara yang disebut polarisasi. Pada bagian ini dijelaskan proses hamburan cahaya. Cahaya matahari melewati atmosfer, hal itu akan secara acak diarahkan oleh udara. Pengalihan cahaya ini memberi warna pada langit. Hamburan mirip dengan bobber dalam air seperti Gambar 1.17, ketika gelombang melewati bobber, bobber akan bergerak ke atas dan ke bawah dengan frekuensi yang sama dengan gelombang asli. Akibatnya banyak gelombang yang berasal dari bobber. Seperti bobber, molekul udara menyerap dan kemudian memancarkan kembali gelombang cahaya.

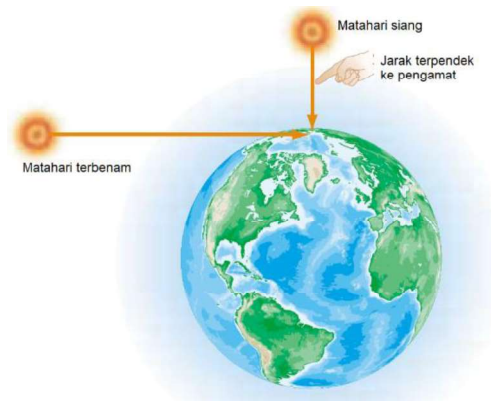


Gambar 1.17 Gelombang tunggal masuk dan berbelok di sekitar bobber akan menimbulkan sumber gelombang sekunder.

Panjang gelombang terpendek tersebar lebih mudah daripada yang lebih panjang karena elektron dalam molekul mampu menyerap energi

dengan mudah untuk gelombang yang lebih pendek. Benda lebih mudah menyerap energi jika bergetar pada resonansi yang alami. Resonansi alami elektron dalam molekul udara paling dekat pada ujung spektrum ultraviolet. Oleh sebab itu, semakin panjang gelombang cahaya semakin sedikit yang diserap elektron dan semakin sedikit hamburan cahaya.

Gambar 1.18 memperlihatkan ketika matahari pada siang hari dan matahari saat terbenam. Pada siang hari jarak matahari sangat dekat dibanding saat matahari terbenam yang jaraknya maksimum untuk mendapatkan cahaya matahari. Pada siang hari langit berwarna biru karena warna ini paling tersebar. Adapun warna lain seperti violet, hijau, dan kuning tidak merata. Saat matahari terbenam, cahaya matahari menempuh perjalanan yang jauh melalui atmosfer. Saat mendekati permukaan bumi, sebagian besar panjang gelombang pendek telah tersebar. Gelombang panjang yang tersisa lebih lama berada di ujung spektrum merah, mencapai mata kita dan kita melihat matahari merah saat terbenam.



Gambar 1.18 Cahaya menempuh jarak lebih jauh melalui atmosfer saat matahari terbenam daripada di siang hari.

Tabel 1.2 Tingkat hamburan cahaya oleh molekul udara secara proporsional berada  $\frac{1}{\lambda^4}$ . Panjang gelombang cahaya tampak memiliki rentang dari 0,700  $\mu\text{m}$  (merah) sampai 0,400  $\mu\text{m}$  (ungu). Tabel ini menunjukkan jumlah relative variasi warna yang dihamburkan.

Warna	Merah	Jingga	Kuning	Hijau	Biru	Violet
Panjang gelombang ( $\mu\text{m}$ )	0,70	0,600	0,580	0,520	0,480	0,400
Jumlah relative gelombang hambur	1	2	3	4	5	10

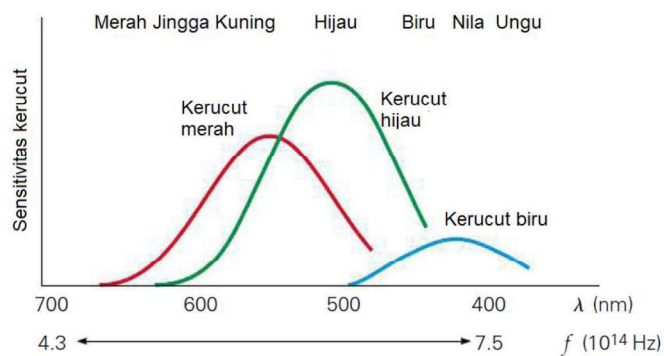
Atmosfir dekat permukaan bumi memiliki lebih banyak partikel debu dan di dekat kota lebih banyak polutan yang berukuran tepat untuk menyebarkan panjang gelombang merah dengan baik. Jadi pada malam hari saat polusi tinggi, kita melihat matahari terbenam berwarna merah (lihat Gambar 1.19). Namun, di beberapa daerah di Bumi, tingkat polusi sangat tinggi, sehingga tidak ada matahari yang terlihat sama sekali.



Gambar 1.19 Warna-warna langit yang disebabkan oleh hamburan cahaya

### Penglihatan Warna

Jenis radiasi elektromagnetik memiliki frekuensi dan panjang gelombang tertentu. Namun, persepsi visual dari radiasi ini dapat bervariasi dari orang ke orang. Bagaimana kita “melihat” (atau otak kita “menafsirkan”) radiasi menimbulkan apa yang kita sebut penglihatan warna.



Gambar 1.20 Berbagai jenis kerucut di retina mata manusia dapat merespon frekuensi cahaya yang berbeda untuk memberikan tiga respon warna umum: merah, hijau, dan biru.

Warna dirasakan karena respon fisiologis terhadap eksitasi akibat oleh cahaya reseptor kerucut di retina mata manusia. (Banyak hewan tidak memiliki sel kerucut dan karenanya dia hidup dalam dunia hitam-putih.) Kerucut peka terhadap cahaya dengan rentang panjang gelombang 400 nm sampai 700 nm. Sinyal-sinyal yang mewakili frekuensi berbeda dirasakan oleh otak sebagai warna yang berbeda.

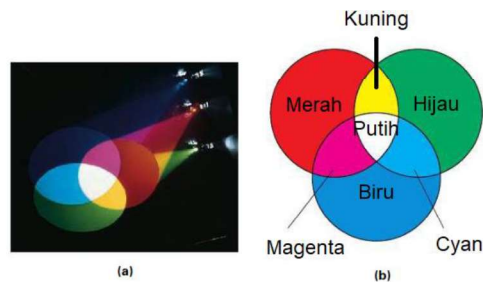
Secara detail penglihatan warna tidak dapat dipahami dengan baik. Diketahui bahwa ada tiga jenis kerucut yang merespon berbagai bagian spektrum yang terlihat: merah, hijau, dan biru (1.20). Agaknya, setiap kerucut menyerap cahaya dalam rentang frekuensi tertentu dan ketiganya secara fungsional tumpang tindih untuk membentuk kombinasi yang ditafsirkan oleh otak sebagai variasi warna spektrum. Sebagai contoh; ketika kerucut merah dan hijau distimulasi sama, otak menafsirkan dua sinyal yang dilapiskan sebagai kuning. Tetapi ketika kerucut merah dirangsang lebih kuat daripada hijau, otak merasakan oranye/jingga (yaitu "kuning" tetapi didominasi oleh merah). Buta warna terjadi ketika satu atau lebih jenis kerucut hilang atau tidak berfungsi.

Seperti Gambar 1.20 menunjukkan mata manusia tidak sama sensitifnya untuk semua warna. Beberapa warna membangkitkan respon yang lebih besar daripada yang lain dan karenanya tampak lebih terang pada intensitas yang sama. Panjang gelombang sensitivitas penglihatan sekitar 550 nm, di wilayah kuning-hijau. Teori penglihatan warna sebelumnya (pencampuran atau penggabungan) didasarkan pada fakta eksperimen bahwa sinar dengan intensitas yang bervariasi dari cahaya merah, hijau, dan biru dapat diatur untuk menghasilkan sebagian besar warna lainnya. Merah, biru, dan hijau dari mana kita menafsirkan spektrum penuh warna disebut warna primer aditif. Ketika seberkas cahaya dari bahan tambahan primer diproyeksikan dan tumpang tindih pada layar putih, warna lain dihasilkan, seperti tampak pada Gambar 1.21. Teknik ini disebut metode aditif produksi warna.

Gambar 1.21 memperlihatkan kombinasi tiga warna primer tampak putih oleh mata. Juga banyak pasangan warna tampak putih di mata saat

digabungkan. Warna-warna dari pasangan semacam itu dikatakan sebagai warna yang saling melengkapi (warna komplementer). Komplemen biru adalah kuning, merah adalah cyan, dan hijau adalah magenta. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar. Warna komplementer dari primer tertentu adalah kombinasi, atau jumlah dua primer lainnya. Oleh karena itu, primer dan komplemennya bersama-sama tampak putih.

Benda akan memperlihatkan warnanya ketika diterangi dengan cahaya putih karena refleksi (menyebarkan) atau mentransmisikan cahaya terutama dalam rentang frekuensi warna itu. Frekuensi lain dari cahaya putih sebagian besar diserap. Sebagai contoh, ketika warna putih di aahkan ke apel merah, sebagian besar energi di bagian spektrum merah dipantulkan, sebagian besar warna yang lain diserap. Demikian pula, ketika cahaya putih melewati kaca merah transparan, atau filter, sebagian besar cahaya yang terkait dengan merah ditransmisikan. Ini terjadi karena pigmen warna dalam kaca adalah peredam selektif.

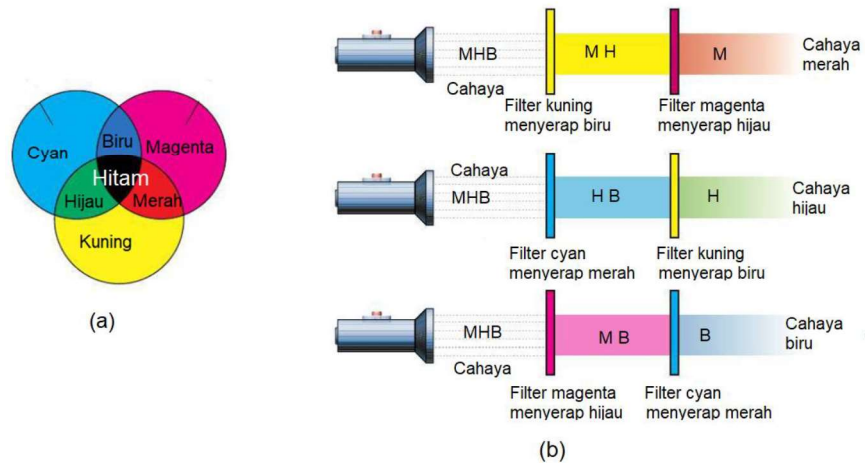


Gambar 1.21 Metode aditif produksi warna, ketika cahaya primer (merah, hijau, dan biru) diproyeksikan ke layar putih, campurannya menghasilkan warna lain. Berbagai variasi intensitas warna memungkinkan muncul warna yang lebih banyak diproduksi.

Pigmen adalah campuran dari berbagai warna, seperti cat dan pewarna. Anda mungkin sadar bahwa mencampur cat kuning dan cyan menghasilkan warna hijau. Ini karena pigmen kuning menyerap sebagian besar panjang gelombang kecuali yang di daerah kuning dan sekitarnya (hijau tambah jingga) dari spektrum yang terlihat, dan pigmen cyan menyerap sebagian besar panjang gelombang kecuali yang di daerah biru dan sekitarnya (ungu tambah hijau). Panjang gelombang dalam daerah



hijau menengah (tumpang tindih) rentang antara kuning dan cyan, tidak terserap kuat oleh salah satu pigmen, dan oleh karena itu campuran tampak berwarna hijau. Efek yang sama diperoleh dengan melewati cahaya putih melalui filter kuning dan cyan. Lampu menembus kedua filter tampak hijau.



Gambar 1.22 (a) Memperlihatkan tiga warna pigmen dasar dicampur akan menghasilkan warna yang berbeda misalnya, campuran kuning dan magenta menghasilkan merah. Jika tiga warna pigmen dicampur akan menghasilkan warna hitam. (b) Warna Pencampuran warna subtraktif menggunakan filter. Prinsipnya sama dengan bagian (a). Setiap pigmen secara selektif menyerap warna-warna tertentu, menghilangkannya dari cahaya putih. Warna yang tersisa adalah apa yang kita lihat.

Telah dibahas bahwa warna dasar dari cahaya adalah merah, hijau, dan biru. Jika ketiga warna ini dicampur akan menghasilkan berbagai warna dan secara keseluruhan menjadi warna putih. Ketiga warna primer cahaya jika dicampur akan menghasilkan warna kuning magenta, dan cyan. Dalam pigmen warna dasarnya adalah magenta, kuning, dan cyan. Pencampuran warna pigmen akan menghasilkan warna dasar dari warna yang dihasilkan oleh warna primer cahaya seperti Gambar 1.22. Pigmen warna cyan dicampur dengan kuning akan menghasilkan warna hijau. Pigmen warna magenta dicampur dengan kuning menghasilkan warna merah, dan pigmen warna cyan dicampur dengan warna magenta menghasilkan warna biru. Jika semua warna pigmen dicampur akan

menghasilkan warna hitam. Tampak pada Gambar 1.22 perbedaan warna hasil campuran antara pigmen dengan gelombang elektromagnetik.

### 1.3 Rangkuman

- Spektrum elektromagnetik meliputi jangkauan frekuensi sekitar 1 sampai  $10^{24}$  Hz dan jangkauan dari panjang gelombang yang bersangkutan. Cahaya tampak merupakan bagian kecil dari spektrum ini dari panjang gelombang antara 400 nm sampai 700 nm. Cahaya memiliki berbagai sifat dan karakteristik sesuai panjang gelombangnya.
- Cahaya yang merambat dalam medium vakum memiliki laju sebesar  $c$ . Ketika cahaya melewati suatu medium maka laju cahaya dalam medium tersebut mengalami perubahan sesuai karakteristik medium tersebut. Rasio laju cahaya dalam vakum dengan laju cahaya dalam medium dinamakan indeks refraksi.
- Cahaya yang merambat dalam suatu medium memiliki panjang lintasan sebesar  $nd$ . Jika cahaya tersebut memasuki beberapa medium, maka panjang lintasan cahaya yang ditempuh sebesar jumlah  $nd$  pada masing-masing indeks refraksi dan panjang lintasannya.
- Ketika seberkas cahaya menuju suatu batas antara dua medium optis, sinar akan terefleksi ke medium semula dan memiliki sudut sinar refleksi yang sama dengan sudut sinar datang,  $\theta_i = \theta_r$ .
- Ketika seberkas cahaya memasuki suatu batas antara dua medium optis, sinar akan trefraksi dengan hukum Snell  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
- Ketika seberkas cahaya merambat ke medium yang lebih renggang, maka refleksi total akan terjadi jika sinar datang melebihi sudut kritis yang diberikan oleh  $\theta_k = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$
- Cahaya yang mengalami refleksi secara normal memiliki intensitas sebesar  $I = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 I_0$
- Warna langit di siang hari sangat dipengaruhi oleh peristiwa

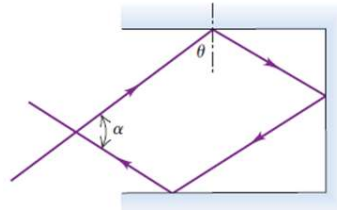
hamburan oleh partikel-partikel di udara.

- Cahaya gelombang elektromagnetik memiliki warna dasar merah, hijau, dan biru. Adapun warna pigmen memiliki warna dasar magenta, kuning, dan cyan.

#### 1.4 Soal-Soal

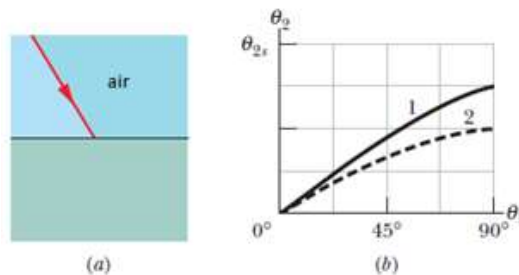
1. Selama Apollo XI mendarat di Bulan, sebuah panel reflektor di pasang di permukaan Bulan. Kecepatan cahaya dapat ditentukan dengan mengukur waktu yang digunakan berkas laser yang merambat dari Bumi. Refleksi dari panel dan kembali ke Bumi memerlukan waktu 2,51 s. Berapakah laju cahaya yang terukur? Gunakan jarak dari pusat Bumi-pusat Bulan  $3,84 \times 10^8$  m. Asumsikan bahwa Bulan tepat berada di atas kepala.
2. Cahaya dengan frekuensi sebesar  $5,80 \times 10^{14}$  Hz merambat dalam sebuah balok kaca yang mempunyai indeks refraksi sebesar 1,52. Berapakah panjang gelombang cahaya itu (a) dalam kaca itu, (b) dalam ruang hampa?
3. Seberkas cahaya merambat pada laju  $1,94 \times 10^8$  m/s dalam kuarsa. Panjang gelombang cahaya dalam kuarsa 355 nm. (a) Berapa indeks refraksi kuarsa pada panjang gelombang ini, (b) Jika cahaya ini merambat dalam udara, berapa panjang gelombangnya?
4. Cahaya dengan frekuensi tertentu memiliki panjang gelombang 438 nm dalam air. Berapa panjang gelombangnya dalam benzena?
5. Tentukan laju cahaya dalam (a) air, (b) kaca crown, (c) intan
6. Sebuah tangki air memiliki panjang sisi 62,0 cm dan dindingnya yang terbuat dari kaca memiliki tebal 2,50 cm. Jika indeks refraksi air 1,33 dan kaca 1,62, tentukan lintasan optis keseluruhannya.
7. Seberkas cahaya merambat dalam air sejauh 286 cm yang indeks refraksinya 1,33, kemudian meneruskan ke dalam kaca sejauh 15,4 cm yang indeks refraksinya 1,64, dan terakhir dalam minyak sejauh 174 cm yang indeks refraksinya 1,39. Tentukan (a) panjang lintasan optis setiap medium, (b) panjang total lintasan optisnya.

8. Tiga cermin datar disusun seperti Gambar 1.23 seberkas sinar laser diarahkan pertama pada sudut datang  $\theta$  terhadap normal cermin paling atas. (a) Tunjukkan bahwa sinar ini direfleksikan melalui dua cermin yang lain dan memotong sinar awal, sudut  $\alpha$  antara dua sinar ini akan diberikan  $\alpha = 180^\circ - 2\theta$ . (b) Pada sudut  $\theta$  berapa kedua sinar berpotongan saling tegak lurus?



Gambar 1.23

9. Pada Gambar 1.24a, berkas cahaya dalam air datang pada sudut  $\theta_1$  pada batas dengan material di bawahnya, di mana sebagian dari cahaya dibiaskan. Ada dua pilihan untuk material. Masing-masing, sudut bias  $\theta_2$  terhadap sudut datang  $\theta_1$  diberikan pada Gambar 1.24b. Skala sumbu vertikal dibuat  $\theta_{2s} = 90^\circ$ . Tanpa perhitungan, tentukan apakah indeks bias (a) material 1 dan (b) material 2 lebih besar atau lebih kecil dari indeks bias air ( $n = 1,33$ ). Berapakah indeks bias (c) material 1 dan (d) material 2?



Gambar 1.24 soal 9

10. Dua cermin datar salah satu ujung-ujungnya membentuk sudut  $90^\circ$ . Jika sinar datang pada cermin 1 dengan sudut  $\theta$  dan mengalami refleksi menuju cermin 2. Cari sudut antara sinar cahaya datang dan sinar cahaya keluar dari cermin 2?
11. Buktikan bahwa sebuah sinar cahaya direfleksikan dari sebuah cermin datar berotasi melalui sudut sebesar  $2\theta$  jika cermin itu berotasi melalui

sudut  $\theta$  di sekitar sebuah sumbu yang tegak lurus terhadap bidang masuk.

12. Ketika tangki logam berbentuk persegi di Gambar 1.25 diisi suatu cairan yang tak diketahui hingga penuh, pengamat  $O$  dengan tingkat mata di atas tangki hanya dapat melihat sudut  $E$ . Suatu sinar yang berefraksi terhadap  $O$  di permukaan atas cairan yang digambarkan. Jika  $D = 85,0$  cm dan  $L = 1,10$  m, berapakah indeks bias cairan tersebut?



Gambar 1.52 Soal 12

13. Cahaya datang dari udara memasuki permukaan air yang berada dalam wadah kaca secara tegak lurus permukaan. Jika indeks refraksi kaca 1,50, berapakah intensitas cahaya yang ditransmisikan ke dalam kaca setelah menembus air.

## 1.5 Lampiran Percobaan Sifat-Sifat Cahaya

### 1.5.1 Menyelidiki Cahaya sebagai Bentuk Radiasi Gelombang Elektromagnetik

#### Permasalahan

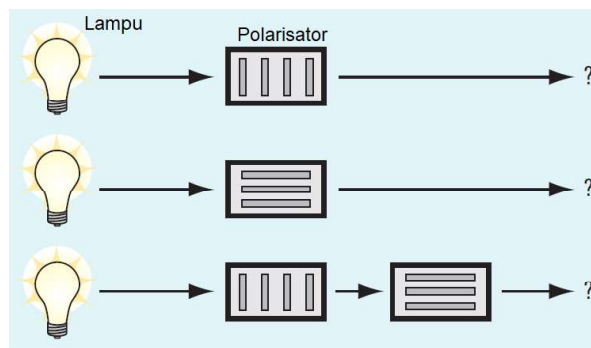
Bagaimana mengungkap sifat-sifat cahaya?

#### Alat yang Digunakan

Sumber cahaya dan Dua filter polarisasi

#### Prosedur

1. Tempatkan sumber cahaya di depan satu filter dan amati apakah cahaya mampu menembus filter.
2. Putar filter  $90^\circ$  seperti yang ditunjukkan Gambar 1.23 dan amati apakah cahaya mampu menembus filter.



Gambar 1.23

3. Letakkan filter  $90^\circ$  satu sama lain dan amati apakah cahaya mampu menembus filter.
4. Perlahan putar salah satu filter dan amati apakah cahaya mampu menembus kedua filter pada sudut yang divariasikan antara kedua filter.

#### Pertanyaan

1. Dapatkah cahaya tampak melewati filter polarisasi tunggal walaupun filter tersebut diputar?
2. Dapatkah cahaya tampak melewati dua filter ketika kedua filter sejajar pada  $90^\circ$  satu sama lain?

3. Jelaskan satu karakteristik radiasi gelombang elektromagnetik yang ditunjukkan oleh pengamatan Anda terhadap cahaya dalam kegiatan ini.
4. Apakah pengamatan yang dilakukan dalam kegiatan ini menjelaskan apa itu radiasi gelombang elektromagnetik, atau apakah filter hanya mengungkap satu karakteristik radiasi gelombang elektromagnetik?

### 1.5.2 Mengukur Laju Radiasi Elektromagnetik

#### Permasalahan

Gelombang mikro merupakan jenis radiasi elektromagnetik dan merambat pada laju cahaya. Gelombang ini memiliki Panjang gelombang dan frekuensi jika merambat dalam vacuum atau dalam udara. Persamaan gelombang umum  $v = f\lambda$  dengan  $f$  adalah frekuensi dan  $\lambda$  panjang gelombang radiasi. Setiap oven gelombang mikro umumnya frekuensinya sekitar 2450 MHz. Jika panjang gelombang mikro ini dapat dihitung, lajunya dapat dihitung menggunakan persamaan umum gelombang.

#### Alat dan bahan yang digunakan

Oven of microwave, Piring microwave, dan Marsmalow (makanan kenyal)

#### Prosedur

1. Bungkus marsmalow padat dan letakkan ke dalam piring microwave
2. Letakkan piring ke dalam oven dan masak hingga marsmalow mulai meleleh dalam empat atau lima lokasi
3. Keluarkan piring dari oven dan ukur jarak antara bintik-bintik lembut
4. Hitung jarak pisah rata-rata antara beberapa bintik lembut. Jarak ini sama setengah panjang gelombang microwave.
5. Hitunglah panjang gelombang rata-rata jarak dua bitnik
6. Catat frekuensi microwave, manakah yang mengindikasikan frekuensi oven microwave.

#### Pertanyaan

Gunakan panjang gelombang dan frekuensi microwave untuk menjawab pertanyaan berikut.

1. Berapakah laju gelombang microwave
2. Berapakah persen kesalahan yang dihitung, bandingkan dengan nilai laju cahaya  $3,00 \times 10^8$  m/s
3. Berapa kemungkinan sumber kesalahan yang mempengaruhi perhitungan Anda
4. Bandingkan panjang gelombang microwave dengan gelombang radio dan gelombang cahaya tampak. Mengapa semua ini disebut gelombang pendek?



### 1.5.3 Menentukan Indeks Refraksi Berbagai Cairan

Percobaan ini ingin mengetahui nilai-nilai indeks refraksi air dan alcohol

#### Pertanyaan

Berapakah indeks refraksi air dan alcohol

#### Variabel

Bebas: sudut datang

Terikat: sudut refraksi

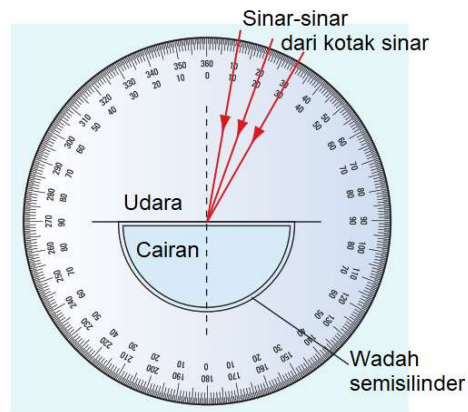
Control: panjang gelombang cahaya

#### Alat dan Bahan yang Digunakan

Kertas koordinat polar, Kertas grafik, Air, Alkohol, Pointer, dan Wadah semisilinder

#### Prosedur

1. Desain tabel data pada kertas dengan *heading*: sudut datang,  $\theta_1$ , sudut refraksi,  $\theta_2$ , sin sudut datang ( $\sin \theta_1$ ), sin sudut refraksi ( $\sin \theta_2$ ), dan rasio  $\sin \theta_1 / \sin \theta_2$ .
2. Isilah air wadah semisilinder dan letakkan pada kertas koordinat polar dengan garis  $0^\circ - 180^\circ$  terletak pada bagian atas wadah semisilinder. Buatlah garis normal garis di  $0^\circ - 180^\circ$  tepat di tengah wadah, seperti gambar.
3. Arahkan sinar cahaya sepanjang garis normal  $0^\circ$  dan catat sudut refraksinya. Di sini diperoleh sudut refraksi nol jika posisi wadah adalah tepat di tengah garis normal.
4. Catat sudut refraksi untuk sudut sinar datang dari  $10^\circ - 70^\circ$  untuk tiap langkah  $10^\circ$ .
5. Lengkapi data dalam tabel dan buatlah grafik  $\sin \theta_1$  terhadap  $\sin \theta_2$ . Hitunglah indeks refraksi air berdasarkan kemiringan grafik ini.
6. Ulangi langkah 2 – 5 jika wadah semisilinder diganti dengan alcohol.



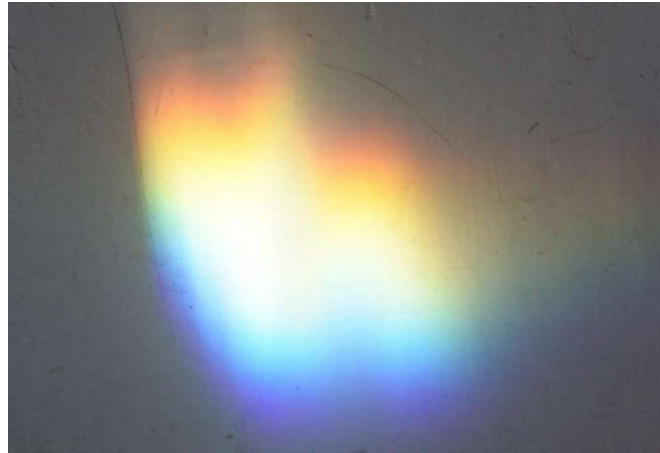
Gambar 1.24

### Analisis

1. (a) Berapakah nilai kemiringan grafik jika air yang digunakan sebagai bahan refraksi?  
(b) Berapakah nilai kemiringan jika alcohol digunakan sebagai bahan refraksi?
2. Berdasarkan perhitungan kemiringan yang diperoleh, bahan manakah yang memiliki indeks refraksi terbesar?
3. Hitunglah persentase kesalahan untuk tiap indeks refraksi menggunakan nilai indeks refraksi dari buku referensi.
4. Jelaskan sumber kesalahan yang diperoleh dalam percobaan ini.
5. Mengapa penting bahwa kontak sinar datang harus di pusat wadah semisilinder?
6. Mengapa penting harus menggunakan wadah berbentuk semisilinder. Bagaimana jika bentuknya wadah persegi?
7. Bahan cairan manakah yang lebih efektif dalam mengubah arah cahaya dalam wadah?
8. Prediksi apa yang terjadi jika wadah semisilinder diganti dengan wadah kaca persegi, jika Anda punya waktu ujliah prediksi Anda.



## BAB 2 REFLEKSI DAN REFRAKSI PADA BIDANG DATAR DAN LINGKUNG



Pelangi yang terjadi akibat cahaya matahari mengalami peristiwa refraksi dan refleksi dalam air

### 2.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah

Setelah mengikuti perkuliahan mahasiswa diharapkan dapat menguasai konten Pelangi, Polarisasi, Prinsip Fermat, Kaca Plan Paralel, Prisma, dan Percobaan Refleksi dan Refraksi.

### 2.2 Topik Pembelajaran

#### 2.2.1 Pelangi

Indeks refraksi suatu medium bergantung pada panjang gelombang cahaya. Ketergantungan ini berimplikasi akan terurainya cahaya putih jika masuk pada permukaan prisma. Penguraian panjang gelombang ini menjadi berbagai macam panjang gelombang atau warnanya disebut dispersi kromatik. Contoh yang paling menarik dari dispersi kromatik adalah pelangi.

Pelangi terjadi akibat sinar matahari mengalami refleksi dan refraksi pada butir-butir air di udara. Hasil dispersi dapat dilihat pada peristiwa terjadinya pelangi. Pelangi dapat dibagi menjadi: Pelangi primer terjadi jika sinar matahari dalam tetesan air mengalami pemantulan sempurna satu kali. Arah pandang pelangi ini sebesar  $42^\circ$  terhadap

horizontal membelakangi matahari. Pelangi primer dapat dilihat dalam bentuk lingkaran. Pelangi sekunder terjadi jika sinar matahari dalam tetesan air mengalami refleksi sempurna sebanyak dua kali. Arah pandang pelangi ini sebesar  $52^\circ$  terhadap horizontal membelakangi matahari. Pelangi tersier terjadi jika sinar matahari dalam tetesan air mengalami refleksi sempurna sebanyak tiga kali. Arah pandang pelangi ini sebesar  $40^\circ$  terhadap horizontal menghadap matahari.

Menghitung radius angular pelangi

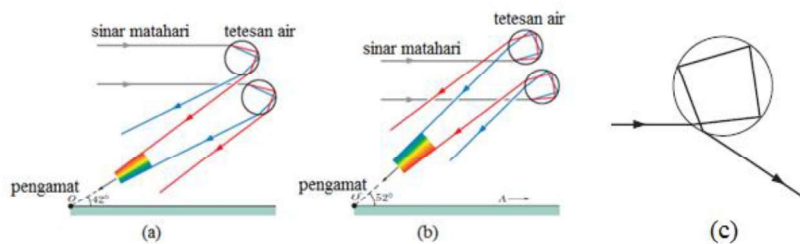
Pada permukaan  $A$  Gambar 2.2 dapat ditulis

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

pada titik  $P$

$$\phi_d + 2\beta = \pi \quad (2.2)$$

Dalam segitiga  $AOB$



Gambar 2.1 Tetesan air pada (a) pelangi primer, (b) pelangi sekunder, dan (c) pelangi tersier

$$2\theta_2 + \alpha = \pi \rightarrow \alpha = \pi - 2\theta_2 \quad (2.3)$$

Pada segitiga  $AOP$

$$\theta_1 + \alpha + \beta = \pi \rightarrow \theta_1 + (\pi - 2\theta_2) + \beta = \pi \rightarrow \beta = 2\theta_2 - \theta_1 \quad (2.4)$$

Pada persamaan

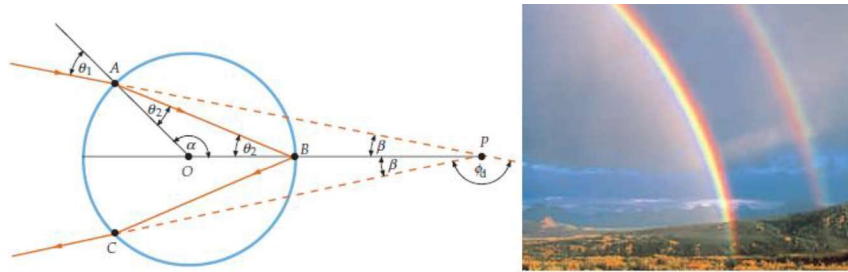
$$\phi_d + 2\beta = \pi \rightarrow \phi_d = \pi - 4\theta_2 + 2\theta_1 \quad (2.5)$$

Dari hukum refraksi

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (2.6)$$

sehingga

$$\phi_d = \pi + 2\theta_1 - 4\sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (2.7)$$

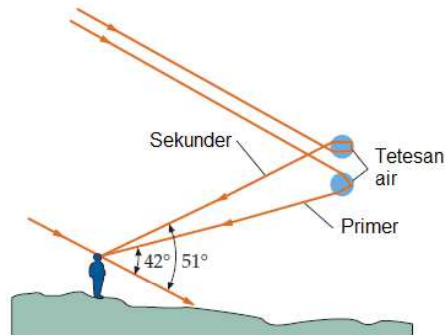


Gambar 2.2. Proses terjadinya pelangi primer, sekunder, dan tersier (Sumber: Walker, 2014)

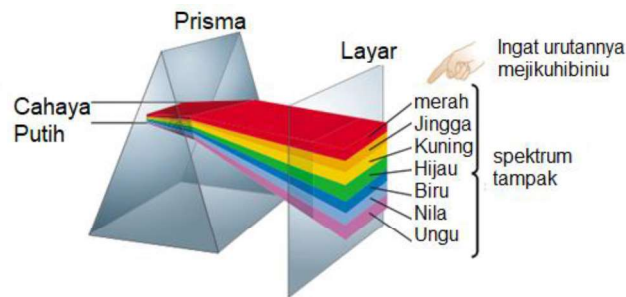
Misalkan sudut datang sinar  $\theta_1 = 60^\circ$ ;  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,33$ , maka diperoleh  $\phi_{d \min} = 138^\circ$  adalah deviasi minimum. Akan terjadi radius angular maksimum pada sudut  $2\beta = \pi - \phi_{d \min} = 180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$ .

Indeks refraksi air bervariasi terhadap panjang gelombang cahaya, maka cahaya matahari polikromatik akan terdispersi menjadi berbagai warna yang disebut pelangi.

Jika cahaya putih masuk ke dalam prisma, maka cahaya putih akan terdispersi menjadi warna-warna tunggal seperti gambar di bawah ini.



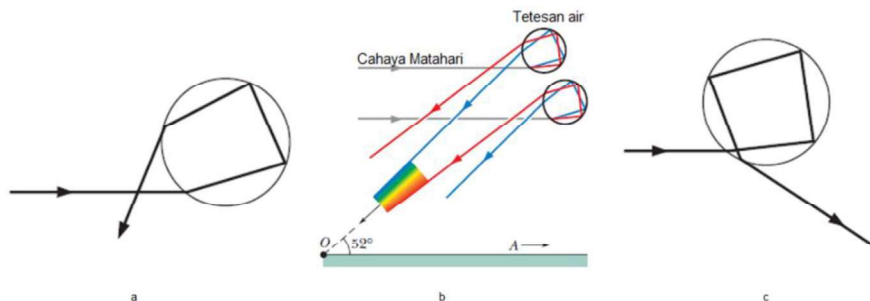
Gambar 2.3 Hasil pelangi primer dan sekunder dari cahaya matahari yang direfleksikan oleh tetesan air (Sumber: Tipler, 2006)



Gambar 2.4 Dispersi cahaya putih pada prisma (Sumber: Nowikow, 2001)

### Contoh 2.1

*Pelangi primer* (utama) adalah jenis pelangi umum yang biasa kita lihat. Pelangi ini dihasilkan oleh sinar yang memantul saat di dalam tetesan-tetesan. *Pelangi sekunder* yang langka dihasilkan oleh cahaya yang memantul dua kali dalam tetesan-tetesannya (Gambar 2.5a). (a) Tunjukkan bahwa deviasi sudut cahaya yang memasuki dan meninggalkan lapisan airnya adalah  $\theta_{dev} = (180^\circ)k + 2\theta_i - 2(k + 1)\theta_r$  di mana  $k$  adalah jumlah pemantul internal. Dengan menggunakan prosedur pelangi primer, temukanlah sudut deviasi minimum untuk (b) sinar merah dan (c) sinar biru di pelangi kedua, (d) Berapakah lebar angular pelangi tersebut (Gambar 2.5b)? *Pelangi tersier* gayut pada 3 pemantulan total (Gambar 2.5c). Pelangi ini mungkin saja terjadi tapi seperti yang dijelaskan bahwa pelangi ini tidak bisa dilihat karena sangat tipis dan terletak di langit yang cerah mengitari matahari. Berapakah sudut deviasi minimum untuk (e) sinar merah dan (f) sinar biru di pelangi ini? Berapakah lebar angular pelangi tersebut? (g) lebar angular sudut merah-biru?



Gambar 2.5

**Solusi**

- (a) Kontribusi pertama pada deviasi adalah refleksi pertama  $\delta\theta_1 = \theta_i - \theta_r$ . Kontribusi selanjutnya pada deviasi adalah refleksi. Menentukan bahwa sudut antara sinar tepat sebelum dan sumbu normal pada permukaan belakang bola adalah persamaan  $\theta_r$  dan mengingat hukum refleksi, kami menyimpulkan bahwa sudut dimana sinar berubah (membandingkan arah propagasi sebelum dan sesudah refleksi) adalah  $\delta\theta_r = 180^\circ - 2\theta_r$ . Selanjutnya untuk  $k$  refleksi, kita punya  $\delta\theta_2 = k\theta_r$ . Kontribusi akhir adalah refraksi yang meninggalkan permukaan bola  $\delta\theta_3 = \theta_i - \theta_r$ . Oleh karena itu,

$$\begin{aligned}\theta_{dev} &= \delta\theta_1 + \delta\theta_2 + \delta\theta_3 = 2(\theta_i - \theta_r) + k(180^\circ - 2\theta_r) \\ &= k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r\end{aligned}$$

- (b) Untuk  $k = 2$  dan  $n = 1,331$ , untuk refleksi kedua diperoleh  $\theta_{dev}$  minimum untuk warna cahaya merah adalah  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r$ . Untuk mencari  $\theta_r$  digunakan  $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$  pada  $\theta_i = 71,90^\circ$  diperoleh  $45,62^\circ$ . Pada  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r = 2(180^\circ) + 2(71,90^\circ) - 2(2+1)(45,62^\circ) \approx 230^\circ$
- (c) Untuk  $k = 2$  dan  $n = 1,343$ , untuk refleksi kedua diperoleh  $\theta_{dev}$  minimum untuk warna cahaya biru adalah  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r$ . Untuk mencari  $\theta_r$  digunakan  $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$  pada  $\theta_i = 71,52^\circ$  diperoleh  $44,93^\circ$ . Pada  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r = 2(180^\circ) + 2(71,52^\circ) - 2(2+1)(44,93^\circ) \approx 234^\circ$
- (d) Lebar angular pelangi tersebut adalah  $\approx 234^\circ - 230^\circ \approx 4^\circ$
- (e) Untuk  $k = 3$  (pelangi orde tiga), dan  $n = 1,331$ , untuk refleksi kedua diperoleh  $\theta_{dev}$  minimum untuk warna cahaya merah adalah  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r$ . Untuk mencari  $\theta_r$  digunakan  $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$  pada  $\theta_i = 76,88^\circ$ . Pada  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k+1)\theta_r \approx 317,5^\circ$
- (f) Untuk  $k = 3$  dan  $n = 1,343$ , untuk refleksi kedua diperoleh  $\theta_{dev}$  minimum untuk warna cahaya biru adalah  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i -$



$2(k + 1)\theta_r$ . Untuk mencari  $\theta_r$  digunakan  $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$  pada  $\theta_i = 76,62^\circ$ . Pada  $\theta_{dev} = k(180^\circ) + 2\theta_i - 2(k + 1)\theta_r \approx 321,9^\circ$

(g) Lebar angular pelangi tersebut adalah  $321,9^\circ - 317,5^\circ = 4,4^\circ$

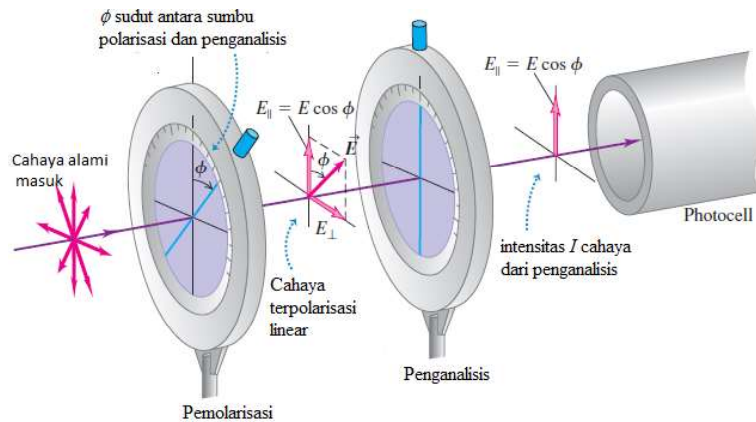
## 2.2.2 Polarisasi

### Saringan Polarisasi

Arah polarisasi dari sebuah gelombang elektromagnetik yang terpolarisasi linear adalah arah dari medan  $\vec{E}$ . Sebuah saringan polarisasi melewatkan gelombang yang terpolarisasi linear sepanjang sumbu polarisasinya dan merintangi gelombang yang terpolarisasi dalam arah tegak lurus terhadap sumbu tersebut. Jika cahaya yang tidak terpolarisasi  $I_0$  memasuki pemolarisasi intensitasnya menjadi  $I_{maks} = \frac{1}{2} I_0$  memasuki sebuah saringan polarisasi yang digunakan sebagai penganalisis, maka intensitas  $I$  dari cahaya yang ditransmisikan melalui penganalisis itu diberikan oleh hukum Malus:

$$I = I_{maks} \cos^2 \phi. \quad (2.8)$$

Dengan  $\phi$  adalah sudut antara arah polarisasi cahaya masuk dan sumbu polarisasi dari penganalisis.



Gambar 2.6 Penganalisis ideal hanya mentransmisikan komponen yang paralel dengan arah transmisinya, atau sumbu polarisasinya.

**Contoh 2.2**

Cahaya yang tidak terpolarisasi dengan intensitas  $I_0$  masuk pada dua filter polarisasi. Sumbu filter pertama membuat sudut  $60,0^\circ$  dengan vertikal, dan sumbu filter kedua adalah horizontal. Berapa intensitas cahaya sesudah melewati filter kedua?

**Solusi**

Data:  $\theta = 60,0^\circ$  sudut sumbu filter pertama terhadap vertikal.

Intensitas yang masuk pada filter pertama menjadi  $\frac{1}{2} I_0$  dan sudut antara kedua sumbu  $\phi = 30,0^\circ$  maka intensitas setelah melewati filter kedua adalah

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \phi = (\frac{1}{2} I_0) \cos^2 (30,0^\circ) = 0,375 I_0$$

**Polarisasi akibat Refleksi**

Pada tahun 1812 ilmuwan Inggris Sir David Brewster menemukan polarisasi secara refleksi. Gelombang yang memantul akan sepenuhnya terpolarisasi dengan vektor  $\vec{E}$  nya tegak lurus terhadap bidang datang. Jika gelombang datang ke suatu batas pada sudut Brewster  $\theta_B$  maka:  $\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$  (sudut Brewster atau hukum Brewster) (2.9)

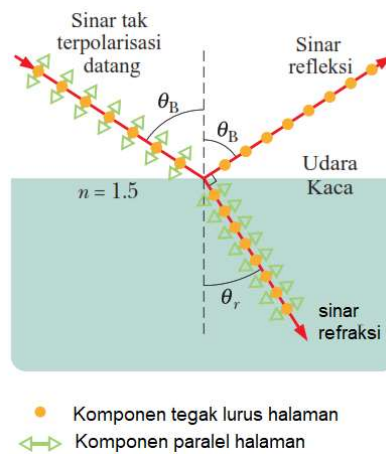
**Bukti Hukum Brewster**

Jika jumlah sudut sinar refleksi dan sudut sinar refraksi =  $90^\circ$ , maka cahaya yang direfleksikan akan terpolarisasi (lihat Gambar 3.4) atau  $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$ . Dalam hal ini sudut sinar refleksi disebut sudut Brewster  $\theta_1 = \theta_B$  dan sudut sinar refraksi adalah  $\theta_2 = \theta_r$  maka ditulis  $\theta_B + \theta_r = 90^\circ$ . Pada peristiwa refraksi persamaan hukum Snell ditulis

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_r$$

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin (90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

menghasilkan  $\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$



Gambar 2.7 Polarisasi yang terbentuk akibat refleksi

### Contoh 2.3

Cahaya yang merambat dalam air menumbuk sebuah pelat kaca pada sudut masuk sebesar  $53,0^\circ$ ; sebagian sinar itu direfleksikan dan sebagian direfraksikan. Jika bagian yang direfleksikan dan yang direfraksikan membuat sudut  $90,0^\circ$  terhadap satu sama lain, berapakah indeks refraksi dari kaca itu?

#### Solusi

Data:  $\theta_1 = 53,0^\circ$ ;  $n_1 = 1,33$ ;

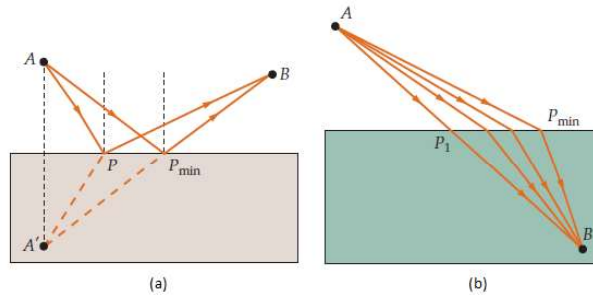
Jika sinar refleksi dan sinar refraksi membentuk sudut  $90,0^\circ$ , maka sudut refraksi di kaca  $\theta_2 = 37,0^\circ$ . Indeks refraksi kaca yang mengakibatkan polarisasi adalah

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \tan 53,0^\circ = \frac{n_2}{1,33} \rightarrow n_2 = 1,77$$

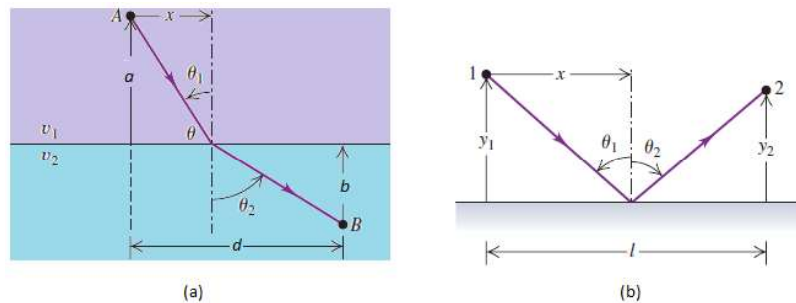
### 2.2.3 Prinsip Fermat

Cara lain untuk menjelaskan jejak sinar refleksi dan refraksi pada medium tak homogen dianjurkan oleh matematikawan Perancis Pierre de Fermat (1601-1665). Prinsip Fermat dapat dinyatakan; *dalam perjalanan dari titik satu ke titik yang lain, suatu sinar memilih jejak di mana waktu perambatan mempunyai nilai minimum*. Melalui prinsip Fermat hukum refleksi dan hukum refraksi dapat dibuktikan. Gambar 2.8a memperlihatkan sinar

merambat ke titik  $B$  melalui titik  $P$  dan  $P_{\min}$  dan Gambar 2.8b memperlihatkan sinar berefraksi ke titik  $B$  melalui titik  $P_1$  sampai  $P_{\min}$ .



Gambar 2.8 Sinar pada peristiwa (a) Refleksi dan (b) refraksi



Gambar 2.9 Prinsip Fermat pada peristiwa (a) refraksi, (b) refleksi

Gambar 2.8 memperlihatkan bagaimana sinar mengalami refleksi dan refraksi dengan waktu yang sangat minimum. Gambar 2.9 dapat diturunkan persamaan hukum refleksi dan refraksi.

**Bukti:**

**Hukum Refraksi**

Prinsip Fermat mengatakan bahwa waktu lintasan cahaya dari titik  $A$  ke titik  $B$  memerlukan waktu sesingkat mungkin, yakni:

$$t = \frac{r_1}{v_1} + \frac{r_2}{v_2} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{c/n_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{c/n_2} \tag{2.10}$$

untuk nilai  $x$  sedemikian agar waktu seminimal mungkin, maka  $\frac{dt}{dx} = 0$ , jadi

$$\frac{dt}{dx} = \frac{n_1}{c} \frac{d}{dx} \sqrt{a^2 + x^2} + \frac{n_2}{c} \frac{d}{dx} \sqrt{b^2 + (d-x)^2} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dx} &= \frac{n_1}{c} \left( \frac{1}{2} \right) (2x)(a^2 + x^2)^{-1/2} + \frac{n_2}{c} \left( \frac{1}{2} \right) 2(d - x)(-1)(b^2 + (d - x)^2)^{-1/2} = 0 \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{n_1}{c} x(a^2 + x^2)^{-1/2} - \frac{n_2}{c} (d - x)(b^2 + (d - x)^2)^{-1/2} = 0 \\ \frac{n_1}{c} x(a^2 + x^2)^{-1/2} &= \frac{n_2}{c} (d - x)(b^2 + (d - x)^2)^{-1/2} \\ n_1 \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} &= n_2 \frac{(d - x)}{(b^2 + (d - x)^2)^{1/2}} \\ n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

terbukti sebagai hukum Snell atau hukum refraksi

### Bukti Hukum Refleksi

Prinsip Fermat mengatakan bahwa waktu yang diperlukan cahaya dari titik 1 ke titik 2 diperlukan waktu seminimal mungkin, yakni

$$t = \frac{(y_1^2 + x^2)^{1/2} + (y_2^2 + (l - x)^2)^{1/2}}{c} \quad (2.12)$$

untuk nilai  $x$  sedemikian agar waktu seminimal mungkin, maka  $\frac{dt}{dx} = 0$ , jadi

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{c} \frac{d}{dx} (y_1^2 + x^2)^{1/2} + \frac{1}{c} \frac{d}{dx} (y_2^2 + (l - x)^2)^{1/2} = 0 \\ \frac{1}{c} \frac{1}{2} (2x)(y_1^2 + x^2)^{-1/2} &+ \frac{1}{c} \frac{1}{2} 2(l - x)(-1)(y_2^2 + (l - x)^2)^{-1/2} = 0 \\ \frac{1}{c} x(y_1^2 + x^2)^{-1/2} &- \frac{1}{c} (l - x)(y_2^2 + (l - x)^2)^{-1/2} = 0 \\ \frac{1}{c} x(y_1^2 + x^2)^{-1/2} &= \frac{1}{c} (l - x)(y_2^2 + (l - x)^2)^{-1/2} \\ \frac{x}{(y_1^2 + x^2)^{1/2}} &= \frac{(l - x)}{(y_2^2 + (l - x)^2)^{1/2}} \\ \sin \theta_1 &= \sin \theta_2 \rightarrow \theta_1 = \theta_2 \text{ terbukti hukum refleksi} \end{aligned} \quad (2.13)$$

### Contoh 2.4

Berdasarkan Gambar 2.10, jarak  $x = 6,00$  cm,  $h = 12,0$  cm,  $h' = 15,0$  cm,  $n = 1,33$ , dan  $n' = 1,53$ . Tentukan  $\phi'$ ,  $\phi$ ,  $d$ ,  $d'$ ,  $p$ , dan  $\Delta$ ?

### Solusi

Data:  $x = 6,00$  cm,  $h = 12,0$  cm,  $h' = 15,0$  cm,  $n = 1,33$ , dan  $n' = 1,53$ .

$$\phi' = \dots? \phi' = \tan^{-1} \frac{x}{h'} = \tan^{-1} \frac{6,00 \text{ cm}}{15,0 \text{ cm}} = 21,8^\circ$$

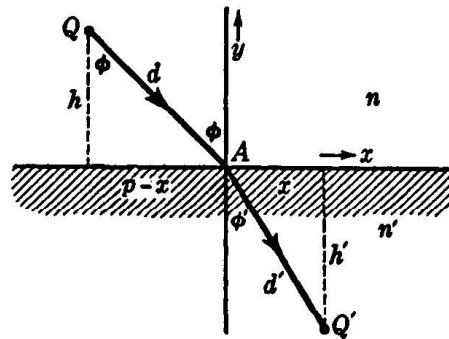
$$\phi = \dots? n \sin \phi = n' \sin \phi' \rightarrow (1,33) \sin \phi = (1,53)(\sin 21,8^\circ) \rightarrow \phi = 25,3^\circ$$

$$d = \dots? d = \frac{h}{\cos \phi} = \frac{12,00 \text{ cm}}{\cos 25,3^\circ} = 13,3 \text{ cm}$$

$$d' = \dots? d' = \frac{x}{\sin \phi'} = \frac{6,00 \text{ cm}}{\sin 21,8^\circ} = 16,2 \text{ cm}$$

$$p = \dots? p - x = d \sin \phi \rightarrow p = x + d \sin \phi = 6,00 \text{ cm} + (13,3 \text{ cm})(\sin 25,3^\circ) = 11,7 \text{ cm}$$

$$\Delta = \dots? \Delta = nd + n'd' = (1,33)(13,3 \text{ cm}) + (1,54)(16,2 \text{ cm}) = 42,6 \text{ cm}$$



Gambar 2.10

#### 2.2.4 Kaca Plan Paralel

Sinar yang diarahkan pada keping datar (misalnya kaca planparalel) akan mengalami refraksi dua kali seperti terlihat pada Gambar 2.11. Sinar yang keluar dari kaca planparalel akan mengalami pergeseran terhadap sinar masuk sebesar

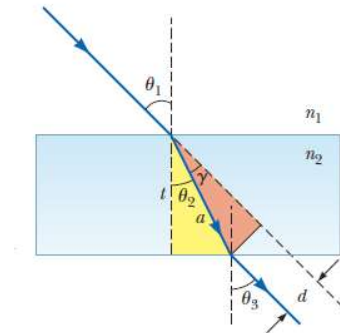
$$d = t \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2}$$

**Bukti:**

Acuan pada sinar bias,

$$a = \frac{t}{\cos \theta_2} = \frac{d}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \rightarrow d = t \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2} \quad (2.14)$$

dengan  $t$  adalah ketebalan kaca



Gambar 2.11 Pergeseran sinar dalam kaca plan paralel

**Contoh 2.5**

Seberkas sinar di udara datang dengan sudut  $45,0^\circ$  menuju permukaan kaca plan paralel ( $n = 1,50$ ) yang tebalnya  $10,0$  cm. Tentukan pergeseran sinar yang keluar dari sisi lain kaca plan paralel?

**Solusi**

Data:  $\theta_1 = 45,0^\circ$ ;  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,50$ ;  $t = 10,0$  cm;  $d = \dots$ ?

Mencari sudut refraksi dalam kaca

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow (1,00)(\sin 45,0^\circ) = (1,50) \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 28,1^\circ$$

$$d = t \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2} = (10,0 \text{ cm}) \frac{\sin(45,0^\circ - 28,1^\circ)}{\cos 28,1^\circ} = 3,30 \text{ cm}$$

**Contoh 2.6**

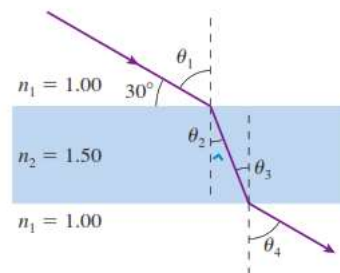
Seberkas laser memasuki plat kaca ( $n = 1,50$ ) yang tebalnya  $1,0$  cm pada sudut  $30^\circ$  di atas permukaan kaca. (a) Berapakah sudut refraksi sinar dalam kaca? (b) Berapakah sudut refraksi yang keluar dari sisi lain kaca? (c) Berapakah pergeseran sinar keluar dari kaca?

**Solusi**

Data:  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,50$ ;  $t = 1,0$  cm;

$$\theta = 30^\circ; \theta_1 = 60^\circ$$

Gambar 2.12



(a)  $\theta_2 = \dots$ ?  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

$$(1,00)(\sin 60^\circ) = (1,50) \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 35^\circ$$

(b)  $\theta_4 = \dots$ ? Berdasarkan gambar sudut  $\theta_3 = \theta_2 = 35^\circ$ .

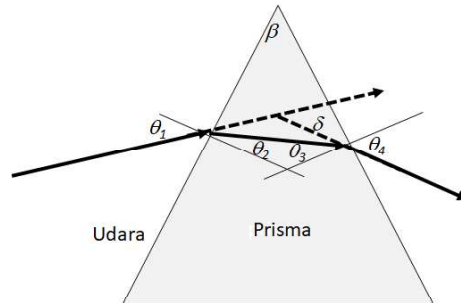
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_2 \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4 \rightarrow \theta_4 = \theta_1 = 60^\circ$$

$$(c) d = \dots? d = t \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2} = (1,0 \text{ cm}) \frac{\sin(60^\circ - 35^\circ)}{\cos 35^\circ} = 0,51 \text{ cm}$$

### 2.2.5 Prisma

**Sudut deviasi prisma.** Jika seberkas sinar masuk pada prisma yang memiliki sudut pembias ( $\beta$ ) dengan sudut sinar datang ( $\theta_1$ ) seperti pada Gambar 2.12, maka sinar yang keluar dengan sudut refraksi ( $\theta_4$ ) akan membentuk sudut deviasi ( $\delta$ ) terhadap sinar datang. Hubungan antara variabel  $\theta_1$ ,  $\beta$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  dan  $\delta$

dibuktikan  $\delta = \theta_1 + \theta_4 - \beta$ .



Gambar 2.12 Sinar datang menuju sisi prisma dan keluar pada sisi lain

**Bukti:**

$$\delta = \theta_1 - \theta_2 + \theta_4 - \theta_3 = (\theta_1 + \theta_4) - (\theta_2 + \theta_3)$$

Karena  $\beta = \theta_2 + \theta_3$ , maka

$$\delta = \theta_1 + \theta_4 - \beta \quad (2.15)$$

**Deviasi minimum,  $\delta_{min}$ ,** terjadi jika sudut datang sinar sama dengan sudut saat sinar keluar dari prisma,  $\theta_1 = \theta_4$ , ini berarti juga terjadi  $\theta_2 = \theta_3 \rightarrow \theta_2 = \frac{1}{2} \beta$  dan

$$\delta_{min} = 2\theta_1 - \beta \rightarrow \theta_1 = \frac{1}{2}(\delta_{min} + \beta)$$

Pada hukum refraksi

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow$$

$$n_1 \sin \frac{1}{2}(\delta_{min} + \beta) = n_2 \sin \frac{1}{2} \beta \quad (2.16)$$

### Contoh 2.7

Sebuah prisma memiliki sudut pembias  $50,0^\circ$  dibuat dari zirkonia dengan  $n = 2,20$ . Berapa sudut deviasi minimumnya?



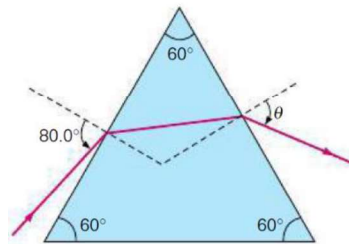
**Solusi**

Data:  $\beta = 50,0^\circ$ ;  $n = 2,20$ ;  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 2,20$ ;  $\delta_{min} = \dots?$

$$n_1 \sin \frac{1}{2}(\delta_{min} + \beta) = n_2 \sin \frac{1}{2} \beta \rightarrow (1,00) \sin \frac{1}{2} (\delta_{min} + 50,0^\circ) = (2,20) \sin \frac{1}{2} (50,0^\circ) \rightarrow \delta_{min} = 86,8^\circ$$

**Contoh 2.8**

Seberkas cahaya merah datang pada sisi prisma seperti Gambar 2.13. (a) Jika indeks refraksi prisma untuk cahaya merah 1,400, pada sudut berapakah berkas cahaya akan keluar dari sisi lain prisma? (b) Jika cahaya datang adalah putih. Berapakah sudut angular warna merah-biru jika indeks refraksi warna biru 1,403? (c) Berapakah jika indeks refraksi biru 1,405?



Gambar 2.13

**Solusi**

Data:  $\theta_1 = 80,0^\circ$ ;  $n_m = 1,400$ ;  $n_b = 1,403$ ;  $n_{m'} = 1,405$ ;  $\beta = 60^\circ$

(a)  $\theta_4 = \dots?$

Sudut refraksi sinar merah pada sisi pertama

$$n_1 \sin \theta_1 = n_m \sin \theta_2 \rightarrow (1,00)(\sin 80,0^\circ) = (1,400) \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 44,7^\circ$$

$$\text{segitiga perjalanan sinar diperoleh } \theta_3 = 180^\circ - (120^\circ + 44,7^\circ) = 15,3^\circ$$

Sudut sinar refraksi yang keluar pada sisi lain prisma

$$n_m \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4 \rightarrow (1,400)(\sin 15,3^\circ) = (1,00) \sin \theta_4 \rightarrow \theta_4 = 21,7^\circ$$

(b)  $\Delta\delta = \dots?$   $\delta_m = \theta_1 + \theta_4 - \beta = (80,0^\circ) + (21,7^\circ) - 60^\circ = 41,7^\circ$

Sudut refraksi sinar biru pada sisi pertama

$$n_1 \sin \theta_1 = n_b \sin \theta_2 \rightarrow (1,00)(\sin 80,0^\circ) = (1,403) \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 44,6^\circ$$

$$\text{segitiga perjalanan sinar diperoleh } \theta_3 = 180^\circ - (120^\circ + 44,6^\circ) = 15,4^\circ$$

Sudut sinar refraksi yang keluar pada sisi lain prisma

$$n_b \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4 \rightarrow (1,403)(\sin 15,4^\circ) = (1,00) \sin \theta_4 \rightarrow \theta_4 = 21,9^\circ$$

$$\delta_b = \theta_1 + \theta_4 - \beta = (80,0^\circ) + (21,9^\circ) - 60^\circ = 41,9^\circ$$

$$\Delta\delta = 41,9^\circ - 41,7^\circ = 0,20^\circ$$

(c)  $\Delta\delta = \dots?$

Sudut refraksi sinar biru pada sisi pertama

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow (1,00)(\sin 80,0^\circ) = (1,405) \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 44,5^\circ$$

$$\text{segitiga perjalanan sinar diperoleh } \theta_3 = 180^\circ - (120^\circ + 44,5^\circ) = 15,5^\circ$$

Sudut sinar refraksi yang keluar pada sisi lain prisma

$$n_2 \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4 \rightarrow (1,405)(\sin 15,5^\circ) = (1,00) \sin \theta_4 \rightarrow \theta_4 = 22,1^\circ$$

$$\delta = \theta_1 + \theta_4 - \beta = (80,0^\circ) + (22,1^\circ) - 60^\circ = 42,1^\circ$$

$$\Delta\delta = 42,1^\circ - 41,7^\circ = 0,40^\circ$$

### 2.3 Rangkuman

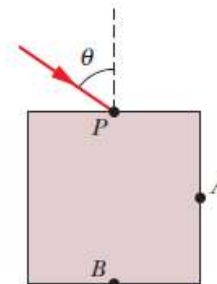
- Indeks refraksi suatu medium bergantung pada panjang gelombang yang melewatinya. Implikasi ketergantungan pada panjang gelombang menimbulkan penguraian warna dengan pelangi sebagai contohnya.
- Jika sinar cahaya tak terpolarisasi dengan intensitas  $I_0$  ditransmisikan pada pemolarisasi maka intensitasnya menjadi  $I = \frac{1}{2} I_0$ . Jika sinar terpolarisasi melewati polarisasi kedua maka intensitas yang dihasilkan gayut pada sudut antara kedua sumbu polarisasi dengan persamaan  $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \phi$ . Persamaan ini dikenal dengan hukum Malus.
- Polarisasi yang disebabkan karena refleksi terjadi jika sudut antara sinar refleksi dengan sinar refraksi saling tegak lurus. Besar sudut datang pada batas bidang dikenal sebagai sudut Brewster yang dirumuskan  $\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$
- Prinsip Fermat memperlihatkan bagaimana sinar merambat kemudian melakukan refleksi dan refraksi akan membutuhkan waktu yang sangat minimum. Waktu minimum yang dibutuhkan sinar dalam merefleksikan dan merefraksikan membuktikan hukum refleksi dan refraksi.
- Sinar yang merambat dalam kaca plan parallel akan mengalami pergeseran sebesar  $d = t \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2}$
- Sinar yang memasuki salah satu sisi prisma akan membentuk sudut deviasi terhadap sinar yang keluar dari sisi lain prisma. Deviasi pada

prisma dapat diukur dengan persamaan  $\delta = \theta_1 + \theta_4 - \beta$ . Adapun deviasi minimum yang dapat terjadi jika sudut datang sinar sama dengan sudut bias sinar yang keluar di sisi lain prisma dengan persamaan  $n_1 \sin \frac{1}{2}(\delta_{min} + \beta) = n_2 \sin \frac{1}{2} \beta$

#### 2.4 Soal-Soal

1. Pelangi dari tetesan-tetesan persegi. Misalnya di suatu dunia lain, tetesan hujannya memiliki penampang melintang persegi dan selalu turun dengan salah satu sisinya horizontal. Gambar 2.14 menunjukkan kejadian ini, dengan sudut datang sinar putih dari matahari pada  $\theta = 70^\circ$  pada titik  $P$ .

Bagian cahaya yang masuk tetesan-tetesan kemudian bergerak ke titik  $A$ , di mana sebagiannya berefraksi keluar menuju udara dan sisanya memantul. Cahaya yang memantul tersebut kemudian bergerak ke titik  $B$ , di mana sekali lagi sebagian cahayanya berefraksi ke udara dan sebagian lagi memantul. Apakah perbedaan sudut sinar merah ( $n = 1,331$ ) dan sinar biru ( $n = 1,343$ ) yang muncul pada (a) titik  $A$  dan (b) titik  $B$ ? (perbedaan sudut pada sinar yang tampak, misalkan pada titik  $A$  akan menjadi lebar sudut dari pelangi yang kita lihat jika kita menyergap cahaya yang keluar di sana)

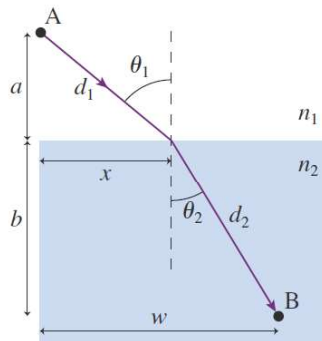


Gambar 2.14

2. Ketika sinar merah di ruang hampa masuk dengan sudut Brewster pada suatu lempengan kaca, sudut biasanya adalah  $32^\circ$ . Berapakah (a) indeks bias untuk kaca, dan (b) sudut Brewster?
3. Seberkas sinar cahaya tak terpolarisasi yang paralel dalam udara masuk pada sudut sebesar  $54,5^\circ$  (terhadap normal) pada sebuah permukaan kaca yang datar. Sinar yang direfleksikan itu sepenuhnya terpolarisasi linear. (a) Berapakah indeks refraksi kaca itu? (b) Berapakah sudut refraksi dari sinar yang ditransmisikan itu?
4. Gambar 2.15 menunjukkan sinar cahaya merambat dari titik  $A$  menuju titik  $B$ . Sinar merambat ke batas medium pada posisi  $x$  yang membuat

sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  pada batas medium. Anggap bahwa Anda belum mengetahui hukum Snell.

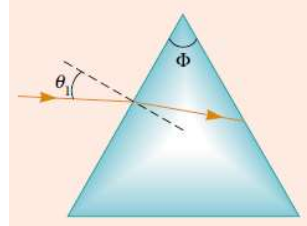
- Buatlah persamaan rambatannya berdasarkan waktu selama sinar merambat dari  $A$  dan  $B$ . Persamaan yang dibuat berdasarkan variabel jarak  $a$ ,  $b$ , dan  $w$ , dan indeks refraksi  $n_1$  dan  $n_2$ .
- Waktu gayut pada  $x$ . Ada satu tempat  $x$  dimana sinar merambat dari  $A$  ke  $B$  dalam waktu yang singkat. Kita akan menulisnya dalam  $x_{\min}$ . Tulislah pernyataan (bukan menjawab untuk menyelesaikan) dari mana  $x_{\min}$  diperoleh.
- Sekarang, gunakan geometri gambar untuk menurunkan persamaan hukum Snell dari jawaban bagian b.



Gambar 2.15

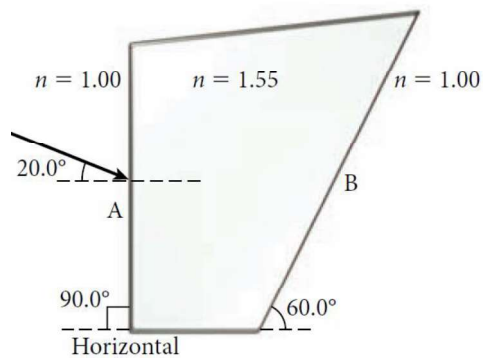
- Sinar cahaya datang dengan sudut  $30^\circ$  menuju ke sebuah balok kaca yang tebalnya 2,00 cm dengan indeks refraksi  $n = 1,50$  dan sinar itu mengalami pergeseran sejauh  $d$ . (a) Tentukan nilai  $d$ . (b) Tentukan waktu yang dibutuhkan cahaya dalam balok kaca.
- Sebuah wadah dari kaca datar yang tebalnya 2,00 cm diisi air setinggi 3,00 cm. Selanjutnya dibagian atas air diisi minyak setinggi 1,00 cm. Seberkas sinar datang dari udara memasuki lapisan minyak yang menyebabkan sudut datang sinar dalam medium minyak  $20,0^\circ$  di batas medium minyak-air. Hitunglah (a) sudut datang sinar di udara dan sudut refraksi sinar yang keluar dari kaca, (b) pergeseran sinar yang keluar dari kaca. Indeks refraksi minyak 1,48 dan kaca 1,52.
- Cahaya datang pada plat transparan dengan sudut  $\theta_1$ . Ketebalan pelat  $t$  dan indeks refraksinya  $n$ . Jika jarak antara dua garis normal sinar datang dan sinar yang keluar dari pelat sejauh  $d$ . Tunjukkan bahwa  $n = \sin(\theta_1) / \sin[\tan^{-1}(d/t)]$ .

8. Sebuah prisma segitiga sama kaki dengan sudut pembias  $\beta = 60,0^\circ$  memiliki indeks refraksi  $n = 1,50$  seperti Gambar 2.16. Berapa sudut datang terkecil  $\theta_1$  untuk sinar cahaya yang datang dari sisi lainnya?



Gambar 2.16

9. Seberkas laser diarahkan ke sisi kiri  $A$  balok kaca dengan sudut datang  $20,0^\circ$  seperti gambar. Balok kaca memiliki indeks refraksi 1,55 yang terletak di atas meja laboratorium. Sisi kanan kaca bersudut  $60,0^\circ$  terhadap sisi horizontal. Hitunglah sudut sinar yang keluar dari kaca pada permukaan  $B$ .



Gambar 2.17 soal 9

## **2.5 Lampiran Percobaan Refleksi dan Refraksi**

### **2.5.1 Mengukur Dispersi dan Indeks Refraksi Prisma**

#### **Tugas Studi Lanjut**

Bacalah eksperimen ini dan jawablah pertanyaan berikut.

1. Apa yang dimaksud dengan disperse?
2. Apakah indeks refraksi medium disperse sama untuk semua panjang gelombang? Jelaskan hal ini dalam hal laju cahaya dalam medium
3. Apa yang dimaksud dengan sudut penyimpangan untuk sebuah prisma?
4. Bagaimana kondisi terjadinya sudut deviasi minimum? Pada sudut ini, apa hubungan antara sinar yang datang dengan sinar yang keluar?
5. Apa sajakah empat komponen utama spectrometer prisma dan fungsinya?
6. Warna cahaya tampak mana yang memiliki dispersi prisma terbesar?

#### **Pendahuluan dan Tujuan**

Dalam ruang hampa, laju cahaya,  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s, sama untuk semua panjang gelombang atau warna cahaya. Selanjutnya, jika seberkas cahaya putih jatuh pada permukaan kaca prisma dan diteruskan hingga cahaya keluar akan mengalami dispersi dalam berbagai spektrum warna. Fenomena ini dipercaya bahwa cahaya putih mengandung dari berbagai komponen warna. Terjadi dispersi dalam prisma karena laju gelombang cahaya berbeda-beda untuk panjang gelombang yang berbeda.

Sebuah spectrometer adalah sebuah alat optika yang digunakan untuk mengamati dan mengukur deviasi angular komponen cahaya datang akibat refraksi dan dispersi. Penggunaan hukum Snell, indeks refraksi kaca prisma untuk Panjang gelombang tertentu atau warna dapat ditentukan dengan mudah.

Setelah melakukan eksperimen dan analisis data, Anda harus dapat:

1. Jelaskan disperse cahaya dalam medium dispersive.
2. Jelaskan pengoperasian sebuah spectrometer prisma.
3. Katakana bagaimana indeks refraksi sebuah prisma dapat diukur.

### Komponen yang diperlukan

Spectrometer prisma, Sumber cahaya dan dudukan dukungan, dan Prisma

### Teori

Seberkas cahaya monokromatik di udara, datang secara miring pada permukaan transparan, dan cahaya ditransmisikan melalui medium, dibiaskan dan menyimpang dari arah datang semula sesuai hukum Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\text{atau } n = \frac{c}{v} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

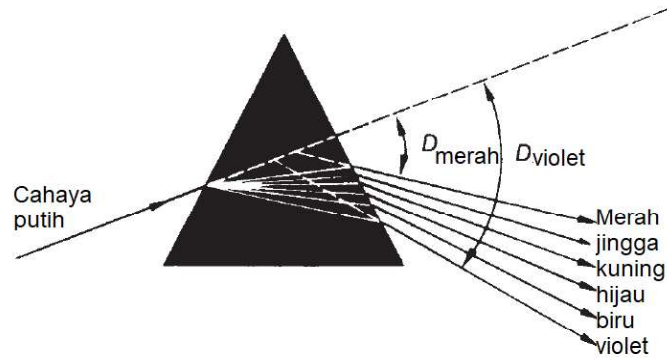
dengan  $n_1$  indeks refraksi medium cahaya datang (medium udara),  $n_2 = n$  indeks refraksi medium yang dituju,  $\theta_1$  sudut cahaya datang di medium pertama,  $\theta_2$  sudut cahaya di medium kedua,  $c$  laju cahaya di udara, dan  $v$  laju cahaya dalam medium kedua.

Jika berkas cahaya datang tidak monokromatik, setiap komponen panjang gelombang (warna) dibiaskan secara berbeda. Inilah sebabnya mengapa cahaya putih yang datang pada kaca prisma membentuk spektrum. Ini menunjukkan terjadi disperse.

Penjelasan efek ini ada hubungannya dengan laju cahaya. Dalam vacuum, laju cahaya sama untuk semua Panjang gelombang cahaya, tetapi dalam medium disperse, laju cahaya berbeda untuk Panjang gelombang yang berbeda. (frekuensi komponen cahaya tidak berubah). Karena indeks refraksi  $n$  sebuah medium merupakan fungsi laju cahaya ( $n = c/v = c/\lambda f$ , dimana laju gelombang dalam medium  $v = \lambda f$ , indeks refraksi akan berbeda untuk panjang gelombang yang berbeda. Ini mengikuti hukum Snell bahwa cahaya Panjang gelombang berbeda akan direfraksikan pada sudut yang berbeda.

Disperse berkas cahaya putih menyebarkan sinar yang ditransmisikan ke dalam spektrum warna, merah melalui violet. Komponen merah memiliki Panjang gelombang terpanjang sehingga, sehingga paling sedikit menyimpang. Sudut antara arah awal sinar dan komponen berkas

yang muncul disebut sudut deviasi  $D$ , ini berbeda untuk setiap warna atau panjang gelombang.

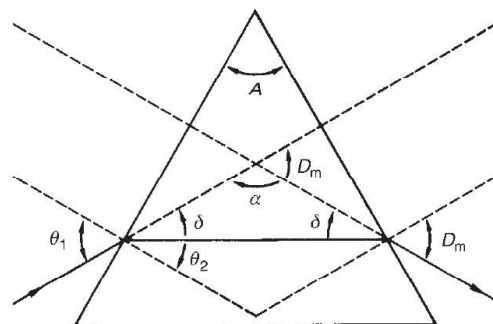


Gambar 2.16 Dispersi. Dispersi cahaya oleh prisma kaca menyebabkan cahaya putih menyebar ke spektrum warna. Sudut antara arah awal prisma dan komponen yang muncul disebut sudut deviasi  $D$  untuk komponen tertentu.

Karena sudut datang menurun dari nilai yang besar, sudut deviasi komponen warna menurun, kemudian meningkat, dan karenanya melewati sudut deviasi minimum,  $D_{\min}$ . Sudut deviasi minimum terjadi untuk komponen tertentu ketika sinar komponen melewati prisma simetris, yaitu, parallel dengan dasar prisma jika prisma adalah sama kaki.

Sudut deviasi minimum dan sudut prisma  $A$  terkait dengan indeks refraksi kaca prisma (untuk komponen warna tertentu) melalui hukum

$$\text{Snell. } n = \frac{\sin \frac{1}{2}(A+D_m)}{\sin \frac{1}{2}A}$$



Gambar 2.17 Sudut minimum penyimpangan. Geometri untuk menentukan sudut minimum deviasi  $D_m$  untuk sinar cahaya. Lihat teks untuk deskripsi.



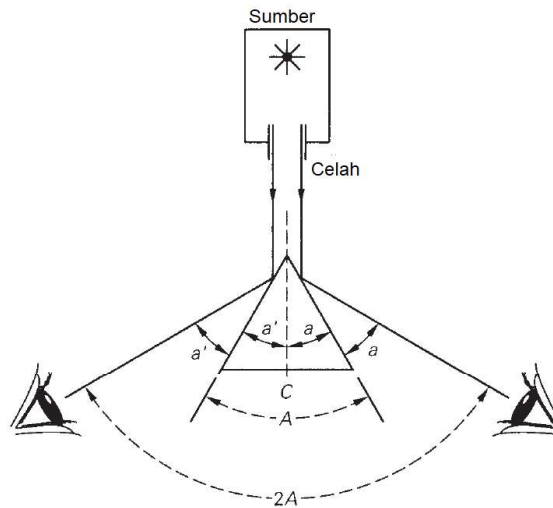
### Prosedur Percobaan



Gambar 2.18 Spektrometer prisma. Cahaya yang diarahkan ke tabung kolimator di sebelah kiri dibiaskan oleh prisma ke teleskop yang dapat disesuaikan di sebelah kanan. Kolimator memiliki sumber cahaya built-in, dan skala pengukuran bersudut memiliki skala lebih tinggi yang dapat dibaca hingga 1 menit busur. (Sumber: Wilson, 2015).

1. Empat bagian dasar spektrometer adalah (a) kolimator dan rakitan celah, (b) prisma, (c) teleskop, dan (d) lingkaran yang dibagi. Kolimator adalah tabung dengan celah lebar yang dapat diatur di satu ujung dan lensa konvergen di ujung lainnya. Cahaya dari sumber cahaya memasuki kolimator. Panjang tabung kolimator dibuat sama dengan panjang fokus lensa sehingga membuat sinar dari berkas cahaya yang muncul paralel. Simpangan prisma dan dispersi berkas ke dalam spektrum. Lensa objektif teleskop mengarahkan sinar melalui celah menuju prisma, yang dapat dilihat melalui lensa okuler teleskop. Lensa okuler dilengkapi dengan garis salib, yang dapat diperbaiki pada warna spektral tertentu. Busur lingkaran memungkinkan untuk mengukur sudut deviasi.
2. Setelah instruktur/asisten memberikan instruksi, pelajari berbagai klem dan sekrup penyesuaian spektrometer Anda. Secara khusus, pelajari skala busur lingkaran. Beberapa spektrometer dilengkapi dengan skala Vernier yang memungkinkan pembacaan hingga 1 menit busur. **Catatan:** Hati-hati, karena pengaturan dan keberpihakan spektrometer sangat penting, dan itu bisa memakan waktu untuk memulihkan penyesuaian yang tepat.

3. Pengukuran sudut prisma  $A$ . Pasang prisma di tengah meja spektrometer, dan sesuaikan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Dengan mata telanjang, cari bayangan putih dari celah yang dipantulkan dari satu sisi prisma di kedua sisi sudut prisma  $A$ . Prisma mungkin harus sedikit disesuaikan. (Anda mungkin juga memperhatikan spektrum warna dalam prisma yang berhadapan dengan  $A$ .) Pindahkan teleskop di depan mata, dan sesuaikan garis salib di tengah gambar celah (dengan sekrup penyesuaian halus, jika tersedia). Buat celah sesempit mungkin sehingga pengaturan terbaik dapat dilakukan. Baca sudut dari lingkaran yang terbagi, dan catat dalam Laporan Laboratorium. Ulangi prosedur ini untuk sisi lain prisma. Seperti ditunjukkan pada Gambar. 2.19, sudut antara posisi sama dengan  $2A$ . Hitunglah sudut  $A$  dari pembacaan lingkaran.



Gambar 2.19 Penentuan sudut prisma. Ilustrasi menyesuaikan prisma prosedur eksperimental dalam menentukan sudut prisma  $A$ .

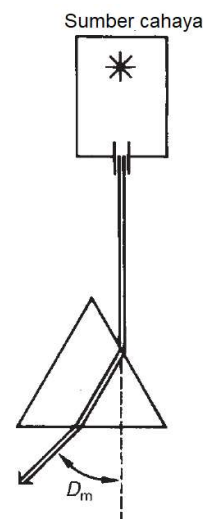
4. Pengukuran sudut deviasi minimum. Lepaskan prisma dan gerakkan teleskop ke garis pandang celah secara garis lurus. (Akan lebih mudah, tetapi tidak perlu, untuk menyesuaikan pengaturan sehingga teleskop memiliki pembacaan nol pada busur lingkaran. Hal ini mudah menemukan sudut deviasi dengan membaca langsung.) Sesuaikan teleskop sehingga bayangan tajam dari celah yang diterangi akan

terlihat pada garis salib. Perhatikan dan catat pembacaan dari busur lingkaran. Ganti dan putar prisma ke posisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20, dan dengan mata telanjang, temukan spektrum warna yang muncul. Pindahkan teleskop di depan mata dan periksa spektrumnya. (Ubah lebar celah, jika ada, dan catat perbedaannya.) Buat daftar urutan warna, dimulai dengan warna merah, di Laporan Laboratorium.

5. Atur celah sesempit mungkin, putar prisma bolak-balik sedikit, dan perhatikan pembalikan arah gerakan spektrum ketika prisma diputar ke satu arah. Berhenti memutar prisma pada posisi pembalikan gerakan komponen kuning dari spektrum. Ini adalah posisi untuk penyimpangan minimum dari komponen ini.
6. Berhati-hatilah agar tidak mengganggu prisma, pusatkan teleskop garis salib di tengah-tengah pita warna kuning, dan catat pembacaan busur lingkaran. Ukur pula pembacaan sudut untuk setiap ujung spektrum yang terlihat [yaitu, ujung merah dan biru atau ungu]. Lakukan ini dengan mengatur garis salib teleskop di mana ujung spektrum hanya terlihat (bukan di tengah-tengah garis ekstrim).
7. Hitung indeks bias untuk cahaya kuning menggunakan persamaan

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(A+D_m)}{\sin \frac{1}{2}A}$$

Gambar 2.20 Penentuan sudut deviasi minimum. Ilustrasi penyesuaian prisma untuk prosedur eksperimen untuk menentukan sudut deviasi minimum.



### 2.5.2 Menyelidiki Peristiwa Refleksi dan Refraksi

#### Tugas Studi Lanjut

Bacalah eksperimen dan jawablah pertanyaan berikut.

1. Apakah itu hukum refleksi, dan dapatkah diterapkan pada semua permukaan yang memantulkan?
2. Bedakan antara refleksi teratur dan tidak teratur. Berikan contoh masing-masing.
3. Mengapa cahaya yang direfraksikan ketika melewati dari satu medium ke medium lain berbeda secara optis?
4. Tunjukkan melalui hukum Snell jika laju cahaya lebih kecil berada dalam medium tertentu akan direfraksikan ke arah normal ketika memasuki medium itu. Apa yang terjadi jika lajunya lebih tinggi dalam medium itu?
5. Apa perbedaan antara indeks refraksi relatif dan indeks refraksi absolut? Jelaskan mengapa indeks refraksi absolut dapat ditentukan secara eksperimen dengan cukup akurat menggunakan udara sebagai medium.

#### Pendahuluan dan Tujuan

Peristiwa refleksi dan refraksi adalah dua sifat cahaya yang biasa diamati. Refleksi cahaya dari permukaan halus seperti cermin memungkinkan kita dapat melihat bayangan objek. Ketika cahaya berpindah dari satu medium ke medium lain dengan cara tidak tegak lurus, cahaya akan direfraksikan seperti Gambar 2.21. Sebagai bagian dari optik geometris, fenomena ini dijelaskan oleh perilaku sinar cahaya. Melalui penelusuran sinar, hukum refleksi dan refraksi dapat dengan mudah diselidiki di laboratorium. Dalam percobaan ini, cermin datar dan kaca piala parallel akan digunakan untuk mempelajari hukum-hukum ini dan parameter yang digunakan dalam menggambarkan refleksi dan refraksi cahaya.

Gambar 2.21 Refraksi karena pembiasan, pensil tampak bengkok. (Wilson, 2015)



Setelah melakukan percobaan ini dan menganalisis data, Anda harus dapat:

1. Menjelaskan hukum refleksi dan bagaimana hukum itu dapat diverifikasi secara eksperimental.
2. Menjelaskan hukum Snell dan penerapannya pada materi yang transparan.
3. Menjelaskan indeks refraksi pada bahan transparan dan bagaimana mengukurnya secara eksperimen.

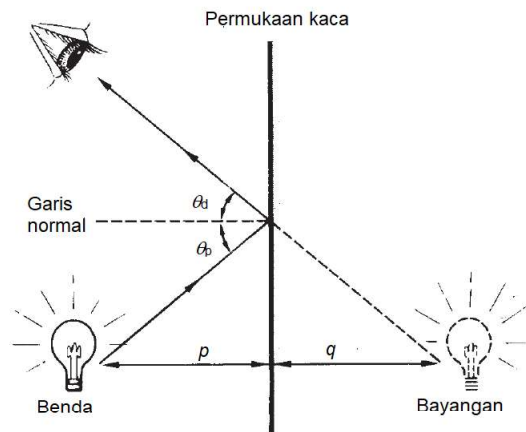
### **Peralatan yang Diperlukan**

Lembar kertas putih A4, Penggaris dan busur derajat, Sumber cahaya (kotak sinar parallel), Cermin datar (dan pegangan jika tersedia), Kaca plan parallel, dan jarum pentul

### **Teori**

#### **A. Refleksi**

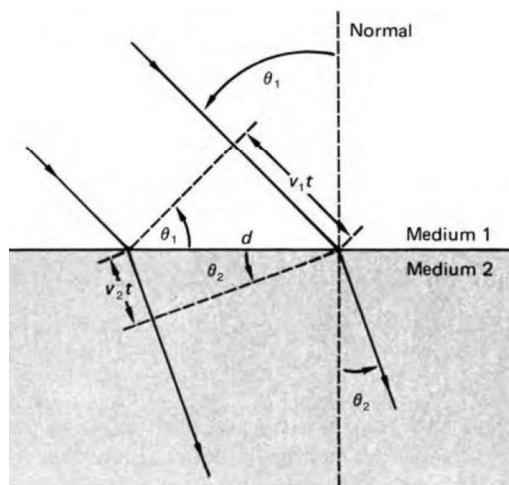
Ketika cahaya datang pada permukaan suatu medium, sebagian cahaya biasanya direfleksikan/dipantulkan. Pantulan sinar cahaya dari permukaan bidang seperti pelat kaca atau cermin datar dijelaskan oleh hukum refleksi: Sudut datang sinar ( $\theta_i$ ) sama dengan sudut pantulan ( $\theta_p$ ), yaitu,  $\theta_i = \theta_p$ . Sudut-sudut ini diukur dari garis normal ke sinar datang dan sinar pantul di titik pertemuan batas kedua medium, Gambar 2.22. Sinar datang, garis normal, dan sinar pantul berada dalam satu bidang datar. Sinar dari benda dipantulkan oleh permukaan batas dua medium. Karena sinar-sinar pantul tidak dapat saling memotong secara langsung, maka perpotongan hanya terjadi jika sinar-sinar pantul diperpanjang ke belakang dan membentuk bayangan yang disebut bayangan maya. Jika permukaan batas dua medium adalah kasar maka pantulannya akan secara difus atau menyebar secara tidak teratur dan tidak ada bayangan yang terbentuk.



Gambar 2.22 Hukum refleksi dan pembentukan bayangan maya dari benda di depan cermin

### B. Refraksi

Ketika cahaya datang dari satu medium ke medium lain secara miring di batas dua medium, maka cahaya yang masuk ke medium kedua akan mengalami pembiasan/refraksi. Berdasarkan Gambar 2.23 dua sinar paralel datang ke batas dua medium dengan sudut datang  $\theta_1$  dan mengalami refraksi dalam medium sebesar  $\theta_2$ . Hukum refraksi ditulis  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ .



Gambar 2.23 memperlihatkan dua sinar paralel memasuki batas dua medium yang berbeda. Jika laju cahaya di medium 2 adalah  $v_2 < v_1$ , maka sinar akan direfraksikan mendekati normal;  $\theta_1 > \theta_2$ , dan jika laju cahaya  $v_1 > v_2$ , maka sinar direfraksikan menjauhi norma;  $\theta_1 < \theta_2$ .

## Prosedur Eksperimen

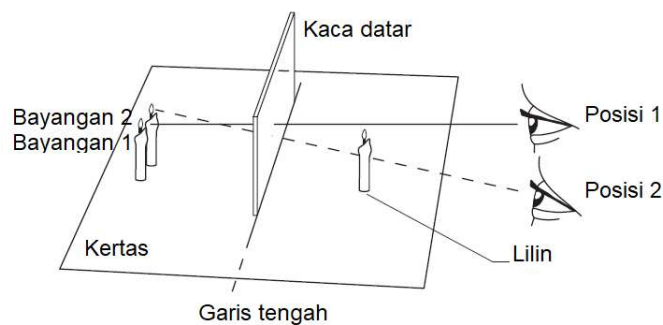
### A. Refleksi

#### Kaca Datar sebagai Cermin

1. Letakkan selembar kertas putih di atas meja. Asumsikan seperti Gambar 2.24. Gambar garis lurus untuk meletakkan kaca datar. Garis lurus itu parallel dengan sisi kertas sekitar 3 cm sampai 4 cm dari ujung kertas. Buatlah sebuah tanda dekat garis tengah dan letakkan lilin di atas tanda itu.

Letakkan kaca datar dekat pusat kertas seperti Gambar 2.24. Usahakan lilin berada secara parallel dengan kaca, dan gambar garis sepanjang kaca (sisi menuju lilin). Nyalakan lilin

Perhatian: jangan sampai membakar diri Anda selama percobaan ini.



Gambar 2.24

Melihat langsung di atas lilin dengan mata Anda sebagai posisi 1, Anda mengamati gambar lilin di piring kaca. Kaca memantulkan cahaya dan berfungsi sebagai cermin. (pengamatan dilakukan dengan satu mata terbuka).

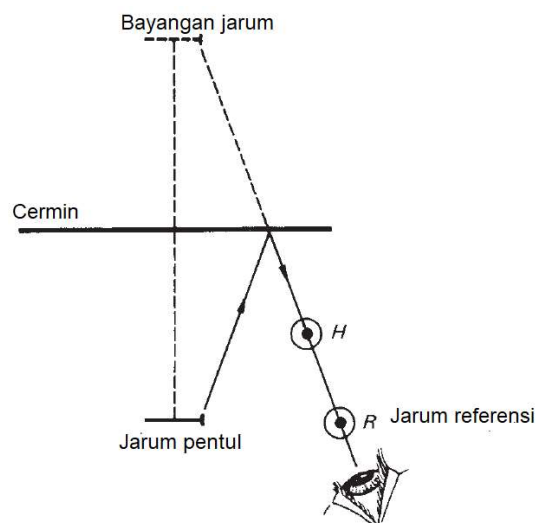
2. Mengamati bagian atas nyala lilin dari posisi samping (posisi 2), Anda akan melihat gambar ganda, satu lebih dekat dari yang lainnya. Jelaskan mengapa ini terjadi?

Tancapkan jarum pentul dekat plat kaca tepat di garis pandang depan kaca atau bayangan 2 pada gambar. Tancapkan jarum lain dekat Anda atau ke tepi kertas sehingga kedua jarum dan gambar lilin segaris. Tandai lokasi jarum. Ulangi prosedur ini, lihat dari posisi lain lilin.

3. Keluarkan peralatan dari kertas. Gambar garis lurus melalui jarum pentul yang ditancapkan melalui garis pelat kaca. Garis akan memotong sisi yang berlawanan dari garis pelat kaca di lokasi gambar lilin. Gambar garis dari posisi lilin yang sebenarnya atau tandai ke titik-titik persimpangan sebelumnya garis yang ditarik dan garis pelat. Garis-garis ini dari lilin ke garis pelat kaca dan kembali ke posisi pengamat adalah penelusuran sinar cahaya.
4. Gambar garis normal ke garis pelat kaca di titik persimpangan garis sinar. Beri label dan ukur sudut-sudut datang  $\theta_i$  dan refleksi  $\theta_r$ . Rekam data dalam Laporan praktikum.  
Juga, ukur jarak tegak lurus dari kaca pelat ke tanda lilin dan posisi gambar lilin. Hitung persentase perbedaan jarak antara lilin ke pelat kaca dengan gambar lilin ke pelat kaca.

### Cermin Datar

5. (a) Tempatkan cermin dekat pusat kertas seperti garis yang dilakukan pada pelat kaca. Gambar garis di sepanjang sisi perak cermin, kemudian letakkan jarum pentul sebagai benda sekitar 10 cm di depan cermin dan sejajar dengan panjangnya seperti Gambar 2.25. Tandai ujung-ujung benda di atas kertas dengan pensil atau pulpen.



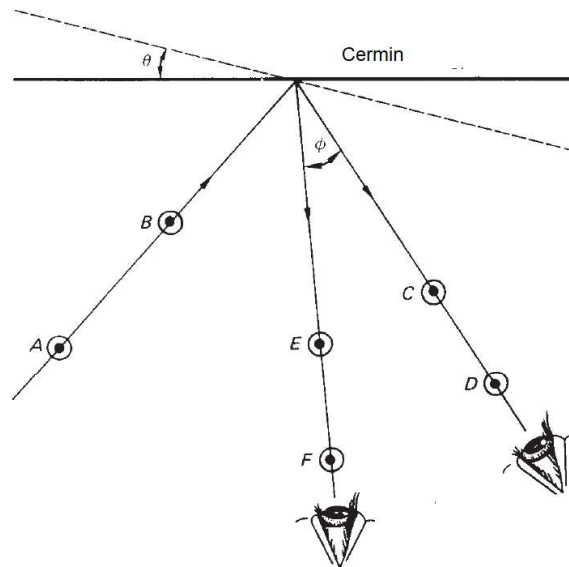
Gambar 2.25



- (b) tempel jarum referensi di papan landasan ke satu sisi jarum benda dekat tepi kertas dan tandai lokasinya.
  - (c) Tempatkan jarum lebih dekat ke cermin sehingga sejajar secara visual dengan jarum referensi dan kepala gambar jarum pentul di cermin. Tandai posisi jar mini dan beri label dengan huruf H. Kemudian pindahkan jarum ini sehingga sejajar dengan jarum referensi dan ujung jarum di gambar. Tandai lokasi ini dan beri label dengan T
  - (d) Ulangi prosedur ini di sisi yang berlawanan dari jarum benda dengan jarum referensi lain.
6. Keluarkan peralatan dari kertas, dan gambar garis lurus dari titik referensi melalui masing-masing lokasi H dan T dan garis cermin. Garis H dan garis T akan memotong dan menentukan masing-masing lokasi kepala dan ekor gambar jarum. Gambarlah garis di antara persimpangan garis (panjang gambar jarum). Ukur panjang garis ini dan panjang jarum objek, dan catat. Juga, ukur jarak objek  $p$  dan jarak gambar  $q$  dari garis cermin, dan catat. Hitung selisih persentase dari jumlah yang diukur masing-masing.

### **Rotasi Cermin**

7. Tempatkan cermin dekat bagian tengah kertas, dan buat garis sepanjang sisi perak cermin. Ukur untuk menemukan pusat garis dan tandai lokasi itu. Tempelkan dua jarum ( $A$  dan  $B$ ) pada papan landasan di satu sisi dan di depan dan sejajar dengan pusat cermin, seperti Gambar 2.26. Melihat gambar yang disejajarkan dari jarum ini dari sisi halaman lain tempelkan dua jarum lainnya ( $C$  dan  $D$ ) dalam posisi sejajar. Beri label lokasi jarum.
8. Biarkanlah jarum  $A$  dan  $B$  terpasang, putarlah cermin dengan sudut kecil tapi terukur sebesar  $\theta$  (sekitar  $10^\circ$  sampai  $15^\circ$ ) di titik pusat, dan gambar garis lurus sepanjang sisi perak cermin. Sejajarkan dua jarum ( $E$  dan  $F$ ) dengan gambar yang selaras  $A$  dan  $B$ , dan tandai dan beri label lokasi  $E$  dan  $F$ .



Gambar 2.26

9. Lepaskan peralatan dari kertas, dan gambar sinar datang dan dua sinar refleksi. Ukur sudut rotasi  $\theta$  cermin dan sudut defleksi  $\phi$  antara dua sinar refleksi, dan catat dalam laporan praktikum.

Gandakan  $\theta$ , dan hitung persentase selisih perbedaan antara  $2\theta$  dan  $\phi$ . Buatlah kesimpulan tentang hubungan antara sudut rotasi cermin dan sudut defleksi sinar.

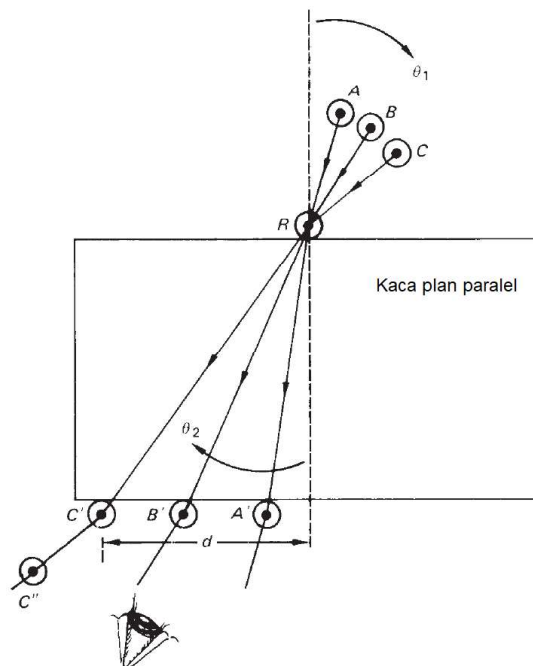
## B. Refraksi

### Indeks Refraksi Kaca Plan Paralel

10. Letakkan kaca plan paralel di tengah selembur kertas, dan buatlah garis sekeliling kaca sesuai bentuknya seperti Gambar 2.27. Buatlah garis normal sepanjang sisi tempat sinar di arahkan. Tempatkan jarum di titik  $R$  di garis normal pada garis sisi kaca plan paralel. Ukur sudut  $\theta_1 = 15^\circ$  relatif terhadap garis normal, dan tempatkan jarum  $A$  sekitar 6 cm hingga 8 cm dari kaca plan paralel. Kemudian, melihat tepi kaca dari posisi mata yang ditunjukkan gambar, tempatkan jarum  $A$  berdekatan dengan permukaan pelat agar sejajar dengan  $R$  dan  $A$ . Tandai dan beri label lokasi jarum ini. Ulangi dengan jarum  $B$  dan  $C$

pada masing-masing sudut  $30^\circ$  dan  $45^\circ$ . Untuk kasus sudut  $45^\circ$  sejajarkan tambahan jarum  $C''$ .

11. Gambarlah sinar untuk titik  $A$  dan  $B$ , dan ukur dan catat sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  untuk setiap kasus. Juga ukur dan catat pergeseran  $d$  sinar  $C'C''$  dari normal dan ketebalan plat. Gunakan persamaan  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  dan hitung indeks refraksi kaca. Bandingkan nilai rata-rata eksperimen indeks refraksi dengan rentang umum refraksi kaca ( $n = 1,5 - 1,7$ , gayut jenis kaca)



Gambar 2.27

## Laporan Praktikum Refleksi dan Refraksi

### A. Refleksi

Pelat kaca sebagai Cermin

	$\theta$	$\theta$	Persentase perbedaan antara $\theta$ dan $\theta$
Sinar 1 .....	.....	.....	$p$ .....
Sinar 2 .....	.....	.....	$q$ .....
			Persentase perbedaan antara $p$ dan $q$
.....			

Cermin Datar

Panjang jarum .....	$p$ .....	Persentase perbedaan antara panjang
panjang bayangan .....	$q$ .....	jarum dan panjang bayangan
.....		
Persentase perbedaan antara $p$ dan $q$		
.....		

Rotasi Cermin

Sudut rotasi $\theta$ .....	$2\theta$ .....
Sudut defleksi sinar $\phi$ .....	
Persentase perbedaan antara $\phi$ dan $2\theta$ .....	
Tunjukkan perhitungannya (jangan lupa konsistensi satuan yang digunakan)	

### B. Refraksi

Indeks Refraksi Kaca Plan Paralel

	$\theta_1$	$\theta_2$	Hasil hitungan $n$
Sinar $ARA'$ .....	.....	.....	.....
Sinar $BRB'$ .....	.....	.....	.....
Sinar $CRC$ .....	.....	.....	.....
Rata-rata $n$ .....			
Rentang umum indeks refraksi kaca .....			
Pergeseran $d$ sinar $C'C''$ .....			
Ketebalan kaca plan parallel .....			
Tunjukkan perhitungannya			

### Pertanyaan

- Mengapa ada dua bayangan yang terlihat dalam pelat kaca jika dilihat dari posisi 2 dal bagian A percobaan? Mengapa hanya satu bayangan yang terlihat jika dilihat dari posisi 1?
  - Jelaskan mengapa bayangan hasil refleksi mudah dilihat pada malam hari dari panel jendela dari dalam rumah, sedangkan pada siang hari tidak.
- Berdasarkan data percobaan, buatlah kesimpulan tentang (a) hubungan jarak benda di depan cermin dan jarak bayangannya di belakang cermin, (b) perbesaran bayangan terhadap bendanya.
- Jelaskan situasi yang ditunjukkan Gambar 2.28. Bagaimana ini bisa dilakukan tanpa melukai tangan? (petunjuk: tangan yang tak kenal rasa takut menjulur ke dalam pintu kaca dari lemari laboratorium)



Gambar 2.28

- Buktikan secara matematis bahwa ketika cermin diputar dengan sudut  $\theta$  terhadap pusat cermin (bagian dari percobaan A), sudut defleksi  $\phi$  sinar cahaya sama dengan  $2\theta$ . Gambarlah diagram dan tunjukkan yang terlibat dalam perhitungan ini.
- Mengacu pada Gambar 2.27, tunjukkan secara teoretis bahwa sinar  $C'C''$  sejajar dengan sinar  $CR$ . Hitung perpindahan sinar yang melewati kaca. Bandingkan ini dengan perpindahan yang telah diukur.
- Menggunakan  $n$  yang ditentukan dari percobaan dari kaca plan parallel, hitung kecepatan cahaya pada pelat kaca.

## BAB 3 CERMIN



Bayangan yang dibentuk oleh dua cermin datar

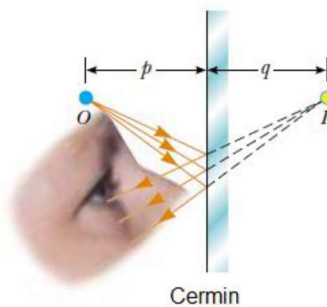
### 3.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah

Setelah mengikuti perkuliahan mahasiswa diharapkan dapat menguasai konten Cermin Datar, Cermin Lengkung, dan Percobaan Cermin dan Cermin Lengkung

### 3.2 Topik Pembelajaran

#### 3.2.1 Cermin Datar

Objek yang digunakan dalam optika diartikan sebagai sesuatu yang berasal dari benda yang menimbulkan radiasi sinar cahaya.



Gambar 3.1 (a) Benda  $O$  memancarkan/memantulkan cahaya menuju mata, (b) Bayangan benda  $I$  dalam cermin datar (Sumber; Serway, 2004)

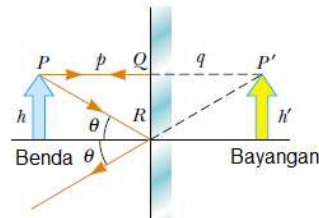
Benda yang terletak di depan cermin datar (Gambar 3.1) dapat membentuk bayangan melalui hukum refleksi dan mempunyai sifat bayangan: (a) maya (terletak di belakang cermin), (b) sama besar bendanya, jarak benda  $p$  = jarak bayangan  $q$ , dan (c) tegak (bayangan sama tegak dengan bendanya).

$$p = q \quad (3.1)$$

perbesaran bayangan,  $m = 1$

$$m = -\frac{q}{p} = \frac{h'}{h} \quad (3.2)$$

Dengan  $h$  = tinggi benda dan  $h'$  tinggi bayangan



Gambar 3.2 memperlihatkan sifat bayangan pada cermin datar

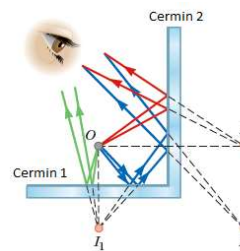
Bayangan yang terbentuk dalam cermin bersifat simetris dengan bendanya sehingga sebelah kanan pada benda seolah-olah menjadi sebelah kiri pada bayangan, begitu pula sebaliknya. Aplikasi bayangan bersifat simetri terhadap bendanya biasanya ada pada tulisan kata terbalik yang terdapat pada mobil ambulance atau tangan Anda.



Gambar 3.3 Bayangan yang terbentuk bersifat simetris dengan bendanya (Sumber: Serway, 2004)

Untuk dua cermin datar bayangan benda  $O$  dapat dilihat seperti Gambar 3.4

Gambar 3.4 Bayangan yang dibentuk oleh dua cermin datar posisi tegak lurus



**Contoh 3.1**

Dua cermin datar tegak lurus satu dengan yang lain seperti tampak pada Gambar 3.4, dan benda diletakkan pada titik  $O$ . Dalam situasi ini, gambar bayangannya diperlihatkan. Jelaskan posisi bayangan-bayangan ini.

**Solusi**

Bayangan benda adalah  $I_1$  berasal dari cermin 1 dan  $I_2$  berasal dari cermin 2. Adapun

bayangan  $I_3$  diperoleh dari bayangan  $I_1$  dalam cermin 2 atau bayangan  $I_2$  diperoleh dalam cermin 1. Dalam hal ini, bayangan dari  $I_1$  atau  $I_2$  membentuk bayangan  $I_3$ .

**Menentukan Jumlah Bayangan di Depan Dua Cermin Datar**

Dua buah cermin datar disusun dalam posisi salah satu ujung-ujungnya bertemu dan membentuk sudut sebesar  $\theta$  seperti Gambar 3.4. Gambar 3.4 memperlihatkan sebuah benda diletakkan di depan kedua cermin yang bersudut  $90^\circ$ . Seorang pengamat melihat ada empat bayangan yang tampak dalam kedua cermin itu. Bagaimana jumlah bayangan yang terjadi jika sudut antara kedua cermin diubah? Jumlah bayangan dalam cermin datar yang memiliki sudut sebesar  $\theta$  dapat dirumuskan:

Rasio jumlah bayangan = rasio sudut cermin

$$\frac{n+1}{1} = \frac{360^\circ}{\theta} \rightarrow n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1$$

dengan  $n$  = jumlah bayangan dalam cermin dan  $\theta$  = sudut antara kedua cermin datar

**Contoh 3.2**

**Tujuan:** Menentukan jumlah bayangan di depan cermin datar.

Dua buah cermin datar membentuk sudut sebesar  $\theta$ . Berapakah jumlah bayangan yang terjadi jika sebuah benda diletakkan di depan cermin yang bersudut (a)  $30^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , dan (d)  $120^\circ$

**Solusi:**

Berdasar persamaan  $n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1$ , jumlah bayangan dalam cermin itu adalah

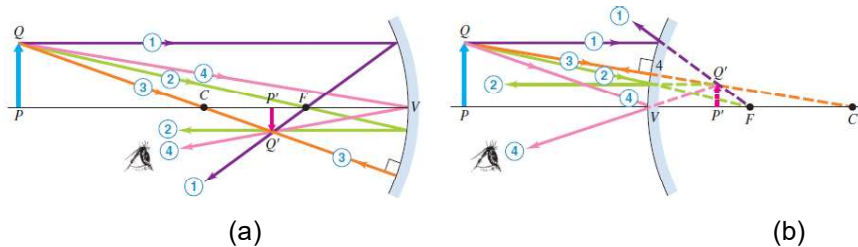


- a)  $30^\circ \rightarrow n = \frac{360^\circ}{30^\circ} - 1 = 11$
- b)  $45^\circ \rightarrow n = \frac{360^\circ}{45^\circ} - 1 = 7$
- c)  $60^\circ \rightarrow n = \frac{360^\circ}{60^\circ} - 1 = 5$
- d)  $120^\circ \rightarrow n = \frac{360^\circ}{120^\circ} - 1 = 2$

### 3.2.2 Cermin Lengkung

#### Cermin Cekung

Cermin lengkung terbagi dua, yakni cermin cembung dan cermin cekung. Jika sinar cahaya didatangkan pada permukaan cermin lengkung akan terjadi refleksi sinar dalam bentuk seperti Gambar 3.5. Dari sekian banyak sinar yang direfleksikan di permukaan cermin lengkung, ada empat sinar yang dapat direfleksikan dengan sifat tetap dalam membentuk bayangan.



Gambar 3.5 (a) Prinsip sinar-sinar untuk cermin cekung dan (b) prinsip sinar-sinar untuk cermin cembung

Karakteristik sinar paraksial pada cermin cekung

1. Sinar datang sejajar sumbu utama direfleksikan melalui titik fokus.
2. Sinar datang melalui titik fokus direfleksikan sejajar sumbu utama.
3. Sinar datang melalui pusat kelengkungan cermin direfleksikan kembali sepanjang lintasan semula.
4. Sinar datang menuju verteks direfleksikan secara simetris terhadap sumbu utama

Karakteristik sinar paraksial pada cermin cembung

1. Sinar datang sejajar sumbu utama direfleksikan seolah-olah dari titik fokus.
2. Sinar datang menuju titik fokus direfleksikan sejajar sumbu utama.

3. Sinar datang menuju pusat kelengkungan cermin direfleksikan kembali sepanjang lintasan semula.
4. Sinar datang menuju verteks direfleksikan secara simetris terhadap sumbu utama

Pembentukan bayangan pada cermin lengkung (cermin cekung dan cembung) dibuat perjanjian tanda:

- a)  $p$  adalah positif bila benda di depan cermin (benda nyata)
- b)  $p$  adalah negatif bila benda di belakang cermin (benda maya)  
 $q$  adalah positif bila bayangan di depan cermin (bayangan nyata)
- c)  $q$  adalah negatif bila bayangan di belakang cermin (bayangan maya).
- d)  $f$  dan  $R$  bertanda positif jika pusat kelengkungan di depan cermin (cermin cekung)
- e)  $f$  dan  $R$  bertanda negatif jika pusat kelengkungan di belakang cermin (cermin cembung)
- f) jika  $m$  positif, bayangan dalam posisi tegak.
- g) Jika  $m$  negatif, bayangan dalam posisi terbalik

**Perbesaran lateral.** Perbesaran lateral  $m$  pada beberapa situasi refleksi dan refraksi didefinisikan sebagai rasio antara tinggi bayangan  $h_i$  dan tinggi benda  $h_o$ . Bila  $m$  positif, bayangan adalah tegak, bila  $m$  negatif, bayangan terbalik,  $m = \frac{h_i}{h_o}$

**Titik fokus dan panjang fokus.** Titik fokus sebuah cermin adalah titik dimana sinar paralel mengumpul setelah refleksi dari sebuah cermin cekung, atau titik dimana sinar itu kelihatan disebarkan setelah refleksi dari sebuah cermin cembung. Sinar-sinar menyebar dari titik fokus cermin cekung akan paralel setelah refleksi; sinar-sinar mengumpul menuju titik fokus cermin cembung akan paralel setelah refleksi. Jarak dari titik fokus ke titik verteks disebut panjang fokus ( $f$ ).

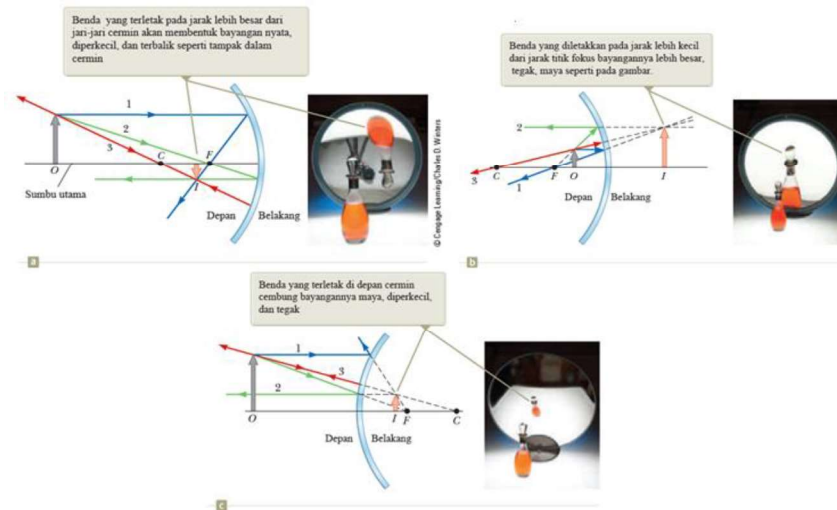
Hubungan antar variabel radius cermin ( $R$ ), fokus cermin ( $f$ ), jarak benda ( $p$ ), jarak bayangan ( $q$ ) adalah

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (3.3)$$

persamaan ini dapat diturunkan. Begitu pula perbesaran lateral bayangan ( $m$ ) dapat dibuktikan dengan

$$m = -\frac{q}{p} = \frac{h'}{h} \quad (3.4)$$

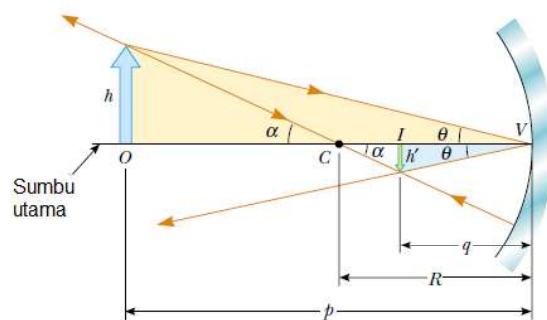
Gambar sinar pembentukan bayangan oleh cermin cekung dan cembung tampak seperti berikut.



Gambar 3.6 Diagram sinar pembentukan bayangan pada cermin cekung dan cembung.

### Bukti:

Cara menentukan jarak bayangan  $q$  dari cermin jika benda terletak pada jarak  $p$  dari cermin adalah melakukan percobaan dan perhitungan seperti:



Gambar 3.7 Bayangan dibentuk oleh cermin cekung jika benda O berada di luar pusat kelengkungan cermin C. Konstruksi geometri ini digunakan untuk menurunkan persamaan

$$\tan \alpha = \frac{h}{p-R} = -\frac{h'}{R-q} \rightarrow \frac{h'}{h} = -\frac{R-q}{p-R}$$

Begitu pula pada

$$\tan \theta = \frac{h}{p} = -\frac{h'}{q} \rightarrow \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

keduanya digabung

$$\frac{R-q}{p-R} = \frac{q}{p} \rightarrow pR - pq = pq - qR \rightarrow R(p+q) = 2pq \rightarrow \frac{p+q}{pq} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \quad (3.5)$$

Jika benda berada di titik terjauh  $p = \infty$ , maka bayangan jatuh di titik fokus  $q = f$ , dan dapat ditulis

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (3.6)$$

Persamaan (5.5) menjadi

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (3.7)$$

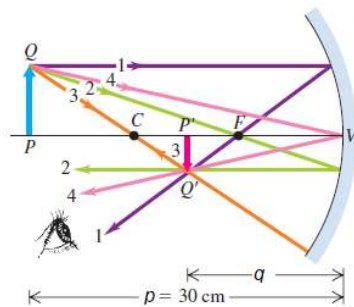
Perbesaran lateral diperoleh dari

Rasio tinggi bayangan terhadap tinggi benda, maka diperoleh

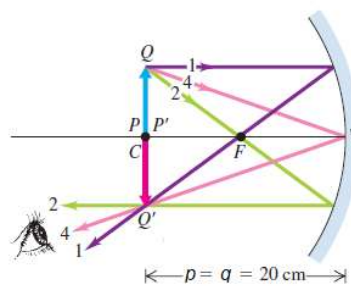
$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (3.8)$$

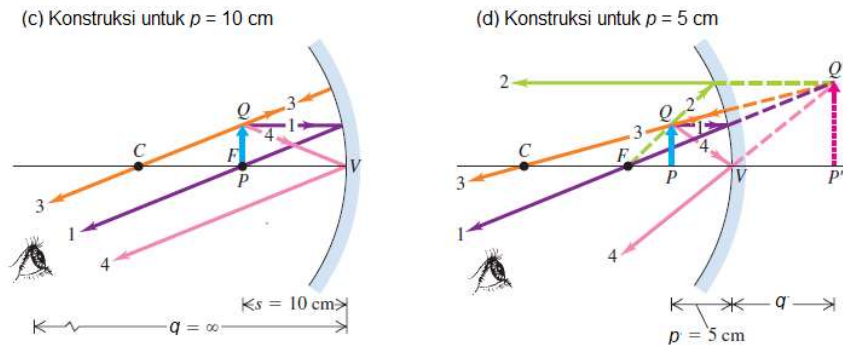
Berikut gambar bayangan untuk benda berbagai posisi di depan cermin cekung.

(a) Konstruksi untuk  $p = 30$  cm



(b) Konstruksi untuk  $p = 20$  cm





Gambar 3.8. (a) benda di luar titik pusat kelengkungan cermin, (b) benda berada di pusat kelengkungan cermin, (c) benda berada di titik fokus, dan (d) benda berada lebih dekat dari titik fokus cermin.

### Contoh 3.3

Sebuah cermin cekung memiliki radius 20,0 cm. Tentukan posisi bayangan untuk benda yang terletak (a) 40,0 cm, (b) 20,0 cm, dan (c) 10,0 cm. Untuk setiap kasus, bayangan mana yang nyata atau maya dan tegak atau terbalik. Tentukan perbesarannya setiap kasus.

#### Solusi

Data:  $R = 20,0 \text{ cm}$ ;

$$(a) \quad p = 40,0 \text{ cm}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \rightarrow \frac{1}{40,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{2}{20,0 \text{ cm}} \rightarrow q = 13,3 \text{ cm};$$

bayangan nyata

$$m = -\frac{q}{p} = -\frac{13,3 \text{ cm}}{40,0 \text{ cm}} = -\frac{1}{3} \text{ kali}; \text{ bayangan terbalik dan diperkecil}$$

$$(b) \quad p = 20,0 \text{ cm}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \rightarrow \frac{1}{20,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{2}{20,0 \text{ cm}} \rightarrow q = 20,0 \text{ cm};$$

bayangan nyata

$$m = -\frac{q}{p} = -\frac{20,0 \text{ cm}}{20,0 \text{ cm}} = -1 \text{ kali}; \text{ bayangan terbalik dan sama besar}$$

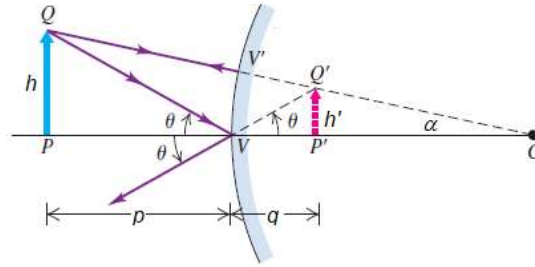
$$(c) \quad p = 10,0 \text{ cm}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \rightarrow \frac{1}{10,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{2}{20,0 \text{ cm}} \rightarrow q = \infty; \text{ tidak ada}$$

bayangan yang dibentuk karena sinar yang direfleksikan sejajar.

### Cermin Cembung

Pada cermin cembung berlaku aturan tanda  $R$ ,  $f$ , dan  $q$  adalah bertanda negatif karena berada pada daerah sebelah kanan.

Mengukur jarak bayangan dalam cermin cembung adalah menggunakan bayangan benda dalam cermin datar kemudian di sejajarkan. Jika dianggap bayangan dalam cermin datar sama jauhnya dalam cermin cembung, maka jarak bayangan dalam cermin = jarak benda di depan cermin datar.



Gambar 3.9 Formasi bayangan oleh cermin cembung

$$\tan \theta = \frac{h}{p} = \frac{h'}{q} \rightarrow \frac{h'}{h} = \frac{q}{p} \text{ dan } \tan \alpha = \frac{h}{p+R} = \frac{h'}{R-q} \rightarrow \frac{h'}{h} = \frac{R-q}{p+R}$$

Kedua persamaan disamakan

$$\frac{q}{p} = \frac{R-q}{p+R} \rightarrow pq + qR = pR - pq \rightarrow 2pq = R(p - q) \rightarrow \frac{2}{R} = \frac{p-q}{pq} = \frac{1}{q} - \frac{1}{p} \rightarrow -\frac{2}{R} = \frac{1}{p} - \frac{1}{q}$$

Untuk  $R$  dan  $q$  bertanda negatif, maka ditulis

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (3.9)$$

Jika benda berada di titik terjauh  $p = \infty$ , maka bayangan terbentuk di titik fokus  $q = f$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (3.10)$$

Ini berarti  $f$  juga bertanda negatif

Persamaan (3.10) menjadi

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (3.11)$$

Perbesaran lateral diperoleh dari

Rasio tinggi bayangan terhadap tinggi benda, maka diperoleh

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (3.12)$$

**Contoh 3.4**

Sebuah cermin cembung yang memiliki radius 40,0 cm. Carilah posisi bayangan maya dan perbesarannya untuk benda berjarak (a) 30,0 cm dan (b) 60,0 cm. (c) apakah bayangannya tegak atau terbalik.

**Solusi**

Data:  $R = -40,0$  cm;

$$(a) p = 30,0 \text{ cm}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \rightarrow \frac{1}{30,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{2}{-40,0 \text{ cm}} \rightarrow q = -12,0 \text{ cm};$$

bayangan maya

$$m = -\frac{q}{p} = -\frac{-12,0 \text{ cm}}{30,0 \text{ cm}} = 0,400 \text{ kali; diperkecil}$$

$$(b) p = 60,0 \text{ cm}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \rightarrow \frac{1}{60,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{2}{-40,0 \text{ cm}} \rightarrow q = -15,0 \text{ cm};$$

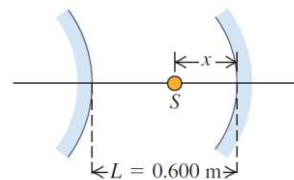
bayangan maya

$$m = -\frac{q}{p} = -\frac{-15,0 \text{ cm}}{60,0 \text{ cm}} = 0,25 \text{ kali; diperkecil}$$

(c) bayangannya tegak

**Contoh 3.5**

Sebuah cermin cembung dan cermin cekung terletak pada sumbu utama yang sama yang dipisahkan oleh jarak  $L = 0,600$  m. Radius kelengkungan cermin besarnya sama masing-masing 0,360 m. Sebuah sumber cahaya berada pada jarak  $x$  dari cermin cekung seperti Gambar 3.10. (a) Berapa jarak sumber sinar ke cermin cekung jika sinar pertama kali mengalami refleksi pada cermin cembung kemudian ke cermin cekung dan bayangan akhir kembali ke posisi sumber sinar? (b) Berapa jarak sumber sinar ke cermin cekung jika sinar pertama kali mengalami refleksi pada cermin cekung kemudian pada cermin cembung dan bayangan akhir pada posisi sumber sinar?



Gambar 3.10

**Solusi**

Data:  $f = -18,0$  cm (cermin cembung);  $f = 18,0$  cm (cermin cekung);  $L = 60,0$  cm

(a)  $x = \dots$ ? Sinar pertama kali ke cermin cembung

jarak sumber ke cermin cembung  $p_1 = L - x = 60,0 - x$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{p_1 - f_1}{f_1 p_1} \rightarrow$$

$$q_1 = \frac{f_1 p_1}{p_1 - f_1} = \frac{(-18,0 \text{ cm})(60,0 \text{ cm} - x)}{(60,0 \text{ cm} - x) + 18,0 \text{ cm}} = -18,0 \text{ cm} \left( \frac{60,0 \text{ cm} - x}{78,0 \text{ cm} - x} \right) < 0$$

Bayangan ini berada di sebelah kiri cermin cembung.

Sebagai benda untuk cermin cekung, maka

$$p_2 = L + q_1 = 60,0 \text{ cm} + \left| -18,0 \text{ cm} \left( \frac{60,0 \text{ cm} - x}{78,0 \text{ cm} - x} \right) \right|$$

$$p_2 = 60,0 \text{ cm} + \frac{1080 \text{ cm}^2 - 18x \text{ cm}}{78,0 \text{ cm} - x}$$

$$p_2 = (60,0 \text{ cm}) \left( \frac{78,0 \text{ cm} - x}{78,0 \text{ cm} - x} \right) + \frac{1080 \text{ cm}^2 - 18x \text{ cm}}{78,0 \text{ cm} - x}$$

$$p_2 = \left( \frac{4680 \text{ cm}^2 - 60,0x \text{ cm}}{78,0 \text{ cm} - x} \right) + \frac{1080 \text{ cm}^2 - 18x \text{ cm}}{78,0 \text{ cm} - x}$$

$$p_2 = \frac{5760 \text{ cm}^2 - 78,0x \text{ cm}}{78,0 \text{ cm} - x}$$

Bayangan yang terbentuk di posisi awal sebesar  $q_2 = x$ , selanjutnya

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} \rightarrow \frac{1}{p_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{q_2} = \frac{q_2 - f_2}{f_2 q_2} \rightarrow p_2 = \frac{f_2 q_2}{q_2 - f_2}$$

$$\frac{5760 \text{ cm}^2 - 78,0x \text{ cm}}{78,0 \text{ cm} - x} = \frac{(18,0 \text{ cm})x}{x - 18,0 \text{ cm}}$$

$$(5760 \text{ cm}^2 - 78,0x \text{ cm})(x - 18,0 \text{ cm}) = (78,0 \text{ cm} - x)(18,0x \text{ cm})$$

$$5760x \text{ cm}^2 - 78,0x^2 \text{ cm} - 103680 \text{ cm}^3 + 1404x \text{ cm}^2 = 1404x \text{ cm}^2 - 18,0x^2 \text{ cm}$$

$$5760x \text{ cm} - 78,0x^2 - 103680 \text{ cm}^2 + 1404x \text{ cm} = 1404x \text{ cm} - 18,0x^2$$

$$60,0x^2 - 5760x \text{ cm} + 103680 \text{ cm}^2 = 0$$

Menggunakan persamaan  $abc$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$x_{1,2} = \frac{-(-5760 \text{ cm}) \pm \sqrt{(-5760 \text{ cm})^2 - 4(60,0)(103680 \text{ cm}^2)}}{2(60,0)}$$

$$x_{1,2} = \left( \frac{5760 \text{ cm} \pm 2880}{120} \right) \text{ cm} \rightarrow x_1 = 72,0 \text{ cm} \text{ dan } x_2 = 24,0 \text{ cm}$$

Berdasarkan jarak antara kedua cermin 60,0 cm, maka jarak sumber cahaya  $x_1 = 72,0 \text{ cm}$  (mustahil), dan yang benar adalah  $x_2 = 24,0 \text{ cm}$

(b)  $x = \dots$ ? Sinar pertama kali ke cermin cekung kemudian ke cermin cembung dan  $f_1 = 18,0 \text{ cm}$  dan  $f_2 = -18,0 \text{ cm}$ ;  $p_1 = x$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{p_1 - f_1}{f_1 p_1} \rightarrow$$



$$q_1 = \frac{f_1 p_1}{p_1 - f_1} = \frac{(18,0 \text{ cm})x}{x - 18,0 \text{ cm}}$$

$$p_2 = L - q_1$$

$$= 60,0 \text{ cm} - \frac{(18,0 \text{ cm})x}{x - 18,0 \text{ cm}} = (60,0 \text{ cm}) \left( \frac{x - 18,0 \text{ cm}}{x - 18,0 \text{ cm}} \right) - \frac{(18,0 \text{ cm})x}{x - 18,0 \text{ cm}}$$

$$p_2 = \frac{60,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2}{x - 18,0 \text{ cm}} - \frac{(18,0 \text{ cm})x}{x - 18,0 \text{ cm}} = \frac{42,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2}{x - 18,0 \text{ cm}}$$

$$q_2 = L - x = 60,0 \text{ cm} - x$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} \rightarrow \frac{1}{-18,0 \text{ cm}} = \frac{x - 18,0 \text{ cm}}{42,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2} + \frac{1}{60,0 \text{ cm} - x}$$

$$- \left( \frac{1}{18,0 \text{ cm}} + \frac{1}{60,0 \text{ cm} - x} \right) = \frac{x - 18,0 \text{ cm}}{42,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2}$$

$$- \left( \frac{60,0 \text{ cm} - x + 18,0 \text{ cm}}{1080 \text{ cm}^2 - 18,0x \text{ cm}} \right) = \frac{x - 18,0 \text{ cm}}{42,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2}$$

$$\frac{x - 78,0 \text{ cm}}{1080 \text{ cm}^2 - 18,0x \text{ cm}} = \frac{x - 18,0 \text{ cm}}{42,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2}$$

$$(x - 78,0 \text{ cm})(42,0x \text{ cm} - 1080 \text{ cm}^2) = (1080 \text{ cm}^2 - 18,0x \text{ cm})(x - 18,0 \text{ cm})$$

$$42,0x^2 \text{ cm} - 3276x \text{ cm}^2 - 1080x \text{ cm}^2 + 84240 \text{ cm}^3 = 1080x \text{ cm}^2 - 18,0x^2 \text{ cm} - 19440 \text{ cm}^3 + 324x \text{ cm}^2$$

$$42,0x^2 - 3276x \text{ cm} - 1080x \text{ cm} + 84240 \text{ cm}^2 = 1080x \text{ cm} - 18,0x^2 - 19440 \text{ cm}^2 + 324x \text{ cm}$$

$$60,0x^2 - 5760x \text{ cm} + 103680 \text{ cm}^2 = 0$$

Persamaan ini mirip dengan jawaban (a) dan dengan menggunakan persamaan *abc* juga diperoleh  $x = 24,0 \text{ cm}$ .

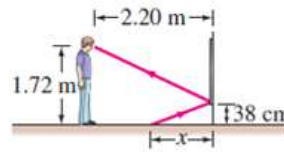
### 3.3 Rangkuman

- Bayangan merupakan reproduksi objek oleh sinar. Bayangan nyata terbentuk dari perpotongan langsung sinar-sinar pantul dan bayangan maya terbentuk dari perpotongan perpanjangan sinar-sinar pantul.
- Sifat bayangan cermin datar adalah maya, tegak, dan sama besar dengan objeknya
- Persamaan untuk cermin berlaku  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$  dan  $m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$ , dengan ketentuan  $f$  dan  $R$  cermin cembung bertanda negatif, sedangkan cermin datar berlaku  $f$  dan  $R$  bernilai  $\infty$ .

### 3.4 Soal-Soal

1. Hitunglah tinggi minimum vertikal cermin datar jika seorang yang tingginya 178 cm dapat melihat seluruh bayangannya.

2. Seseorang yang matanya berada 172 cm di atas lantai yang berjarak 2,20 m di depan cermin datar vertikal yang ujung bawahnya berada 38 cm di atas lantai (Gambar 3.11). Berapa jarak horizontal  $x$  agar dapat dilihat dari cermin?



3. Sebuah cermin cukur cekung mempunyai jari-jari kelengkungan 35,0 cm. Cermin itu diletakkan sedemikian rupa sehingga bayangan (bagian atas) wajah seorang pria diperbesar 2,5 kali ukuran wajah aslinya. Seberapa jauh cermin itu berada dari wajah?
4. Seekor kaki seribu berada 1,0 m di depan bagian terdekat dari bola yang mengkilap dengan diameter 0,70 m. (a) Berapa jauh dari permukaan bayangan kaki seribu terbentuk? (b) Bila tinggi kaki seribu adalah 2,0 mm, berapakah tinggi bayangannya? (c) Apakah bayangannya terbalik?
5. Sebuah objek terletak 30 cm dari cermin sferis, sejajar dengan sumbu utama cermin. Cermin menghasilkan sebuah bayangan terbalik dengan perbesaran lateral pada nilai absolut 0,500 berapakah panjang fokus dari cermin?
6. Sebuah cermin cekung mempunyai jari-jari kurva 24 cm. Berapa jauh sebuah objek dari cermin bila bayangan yang terbentuk (a) maya dan 3,0 kali lebih besar dari objek (b) nyata dan 3,0 lebih besar dari objek, dan (c) nyata dan  $\frac{1}{3}$  ukuran objek?
7. Sebuah objek yang lurus namun pendek dengan panjang  $L$  terbaring sepanjang sumbu utama dari cermin sferis, berjarak  $p$  dari cermin. (a) Tunjukkan bahwa bayangannya di cermin mempunyai panjang  $L'$ , di mana:

$$L' = L \left( \frac{f}{p-f} \right)^2$$

(*Petunjuk*: Carilah kedua ujung dari objek). (b) Tunjukkan bahwa perbesaran longitudinal  $m' = L'/L$  adalah sama dengan  $m^2$  di mana  $m$  adalah perbesaran lateral.

8. Sebuah ornament bola metalik di pohon natal memiliki diameter 8,00 cm. Jika seorang berada 1,56 m dari bola itu, dimanakah dia melihat dirinya terefleksi dalam ornament? Apakah bayangannya nyata atau maya?
9. Jika Anda ingin membuat cermin cairan dengan panjang focus 2,50 m. Berapa kecepatan angular yang diperlukan untuk memutar cairan itu?

### **3.5 Lampiran Percobaan Cermin**

#### **3.5.1 Cermin Cembung dan Cekung**

##### **Permasalahan**

Bagaimana karakteristik bayangan dalam cermin cekung dan cembung jika jarak benda berubah?

##### **Perlatan yang digunakan**

Sendok makan mengkilap dan bahan gambar

##### **Prosedur**

1. Tempatkan sendok mengkilap bagian cekungnya dekat hidung Anda dan perlahan-lahan tarik menjauh dari wajah Anda sambil memperhatikan bayangan hidung Anda yang ada di dalam sendok.
2. Diagramlah sinar secara lengkap untuk bayangan jika hidung Anda berada lebih kecil dari  $F$ , di  $F$ , di  $C$ , dan lebih jauh dari  $C$ . Gunakan tanda panah untuk mewakili hidung Anda dalam diagram sinar.
3. Balikkan sendok sehingga bagian cembungnya menghadap hidung Anda dan gerakkan menjauh secara perlahan.
4. Diagramlah sinar secara lengkap untuk bayangan jika hidung Anda berada lebih kecil dari  $F$ , di  $F$ , di  $C$ , dan lebih jauh dari  $C$ . (Ingat bahwa cermin diverging memiliki panjang fokus virtual, jadi  $F$  dan  $C$  terletak di sisi berlawanan sendok ke wajahmu.)

##### **Pertanyaan**

1. Bagaimana perubahan bentuk bayangan jika cermin cekung digerakkan semakin mendekati sebuah benda?
2. Bagaimana perubahan bentuk bayangan saat benda digerakkan mendekati permukaan cermin cembung?
3. Apa karakteristik semua bayangan yang terbentuk dalam cermin cembung untuk jarak yang berbeda-beda?
4. Bayangan Anda menghilang saat wajah Anda berada di titik fokus cermin cekung. Buat sketsa diagram sinar untuk benda yang terletak di titik fokus cermin cekung.
5. Mungkinkah menempatkan benda di titik  $F$  pada cermin cembung?

### **3.5.2 Menggunakan Cermin Cekung untuk memanaskan air (Menentukan panjang Fokus Cermin Cekung)**

Cermin cekung dapat digunakan untuk memfokuskan energi matahari ke titik tertentu untuk menangkap energi, untuk memanaskan air, atau menghasilkan energi listrik menggunakan sel surya.

#### **Permasalahan**

Mendesain peralatan secara efektif untuk menghasilkan radiasi untuk memanaskan air.

#### **Kriteria Kesuksesan**

Mengamati kenaikan maksimum suhu air dalam periode tertentu.

#### **Gagasan**

Untuk mendesain sebuah pemanas air yang efisien digunakan cahaya matahari sebagai energi, dibutuhkan beberapa pertanyaan berikut:

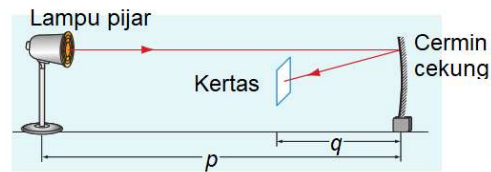
- Dimana wadah air akan diletakkan terhadap cermin cekung agar pantulan energi matahari dapat diserap oleh wadah air.
- Apa warna wadah air itu?
- Apa efek ukuran cermin pada suhu air?
- Efek positif dan negatif apa yang akan dihasilkan dari isolasi wadah air?

#### **Membuat Sebuah Prototipe**

Bangunlah sebuah versi miniatur pemanas air menggunakan wadah volume 50 ml, thermometer, dan bangku optik tempat meletakkan cermin cekung

#### **Tes dan Evaluasi**

Menentukan panjang fokus cermin cekung menggunakan lampu pijar, batang meteran, dan selembar kertas seperti Gambar 3.11. Usahakan sinar yang merambat sejajar sumbu utama dan direfleksikan pada titik fokus.



Gambar 3.11

1. Letakkan lampu pijar pada jarak jauh agar sinar yang datang merambat sejajar sumbu utama. Posisikan kertas sehingga cahaya difokuskan pada sebuah titik kecil. Berhati-hatilah agar tidak menghalangi cahaya menuju cermin.
2. Catat jarak antara kertas dan vertex cermin. Perkirakan panjang fokus cermin dan juga jarak bayangannya.
3. Ukur jarak antara lampu dan cermin. Ini jarak benda-cermin. Gunakan persamaan cermin, dengan bayangan dan jarak benda, hitung dan perkirakan panjang fokus cermin.
4. Menggunakan lampu pijar dalam letak cahaya matahari, ukurlah suhu air untuk periode tertentu ketika wadah air berada di titik fokus pada sisi dalam cermin cekung.
5. Tentukan hasil posisi yang menghasilkan kenaikan tertinggi suhu air, jelaskan mengapa.



## BAB 4 PERMUKAAN LINGKUNG DAN LENSA

Kelereng yang berada di balik permukaan lengkung tampak lebih besar daripada kelereng lainnya.



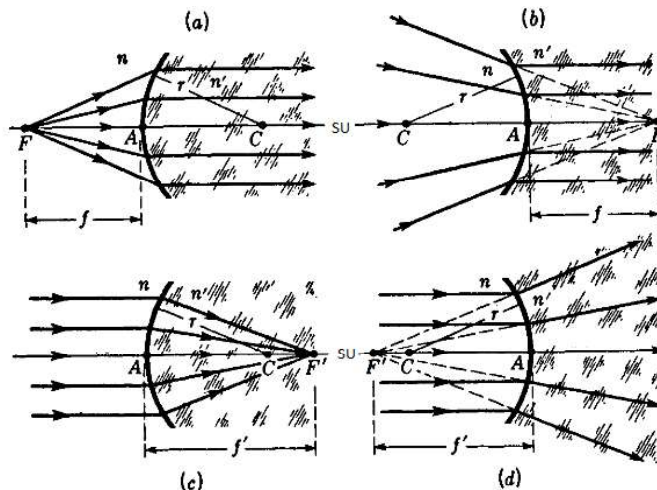
### 4.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah

Setelah mengikuti perkuliahan mahasiswa diharapkan dapat menguasai konten Permukaan Lengkung, Lensa Tipis, Kombinasi Lensa Tipis, Lensa Tebal, dan Percobaan Permukaan Lengkung dan Lensa.

### 4.2 Topik Pembelajaran

#### 4.2.1 Permukaan Lengkung

Dua medium berbeda dapat dibatasi dengan permukaan datar dan lengkung yang berbentuk cekung maupun cembung.



Gambar 4.1 Titik fokus  $F$  dan  $F'$  dan panjang fokus  $f$  dan  $f'$  pada permukaan lengkung berjari  $r$  yang berada pada batas medium  $n$  dan  $n'$ .



Untuk permukaan lengkung, sumbu utama setiap diagram merupakan garis lurus melalui pusat kurva  $C$ . Titik  $A$  merupakan sumbu yang melalui permukaan disebut verteks. Dalam diagram (a) sinar-sinar divergen dari sumber titik  $F$  pada medium pertama dan mengalami refraksi secara paralel pada medium kedua. Diagram (b) menunjukkan berkas konvergen pada medium pertama menuju titik  $F$  dan mengalami refraksi secara paralel pada medium kedua. Titik  $F$  dalam dua kasus ini disebut titik fokus pertama, dan jaraknya  $f$  disebut panjang fokus pertama.

Diagram (c) memperlihatkan sinar datang paralel pada medium pertama akan direfraksikan secara konvergen pada medium kedua menuju titik  $F'$ , dan diagram (d) memperlihatkan sinar datang paralel direfraksikan secara divergen pada medium kedua seakan sinar berasal dari titik  $F'$ .  $F'$  pada setiap kasus ini disebut titik fokus kedua, dan jaraknya  $f'$  disebut panjang fokus kedua.

Kesimpulan: diagram (a) dan (b) menunjukkan titik fokus pertama  $F$  pada sumbu memiliki sifat sebagai sinar datang atau menuju  $F$  yang menghasilkan sinar paralel terhadap sumbu setelah direfraksikan. Adapun diagram (c) dan (d) menunjukkan titik fokus kedua  $F'$  pada sumbu memiliki sifat dimana sinar datang paralel akan direfraksikan menuju atau seakan berasal dari titik fokus  $F'$  setelah sinar direfraksikan.

Penting bagi Gambar 4.1 bahwa panjang fokus pertama  $f$  untuk permukaan konveks (diagram a) tidak sama panjang fokus kedua  $f'$  permukaan sama (diagram c). Ratio panjang fokus  $f'/f$  adalah sama dengan ratio indeks refraksi  $n'/n$  sehingga

$$\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n} \quad (4.1)$$

Dalam optika secara umum dinyatakan bahwa sinar cahaya yang datang merambat dari kiri ke kanan. Permukaan konveks pusat kelengkungannya  $C$  berada di sebelah kanan verteks, dan permukaan konkaf pusat kelengkungannya berada di sebelah kiri verteks.

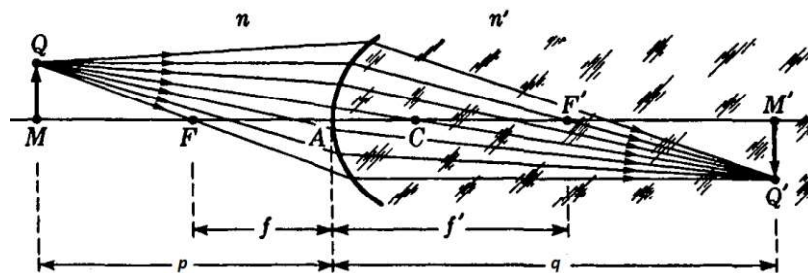
Jika diterapkan sinar merambat kembali (reversibel), maka Gambar 4.1a adalah permukaan cekung dengan sifat konvergen sinar cahaya setelah refraksi, sedangkan Gambar 4.1b permukaan cembung

dengan sifat divergen sinar cahaya setelah refraksi. Catatan, sinar yang datang ini berada dalam medium berindeks bias lebih besar.

Gambar 4.2 memperlihatkan ilustrasi sebuah benda titik  $Q$  yang terletak di  $M$  depan permukaan cembung yang berindeks bias  $n = 1$  dan sinar dari titik  $Q$  menuju permukaan dan mengalami refraksi ke medium kedua berindeks bias  $n' = 1,60$ . Panjang fokus  $f$  dan  $f'$  merupakan rasio 1:1,60. Jika benda digerakkan ke kanan menuju titik fokus pertama  $F$ , maka bayangan akan bergerak menjauhi  $F'$  di sebelah kanan dan membentuk bayangan sangat besar. Jika benda digerakkan ke kiri menjauhi titik  $F$ , maka bayangan akan mendekati titik  $F'$  dan membentuk bayangan berukuran kecil.

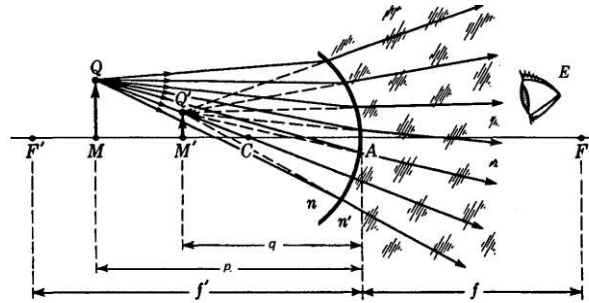
Semua sinar cahaya datang dari benda  $Q$  dan membentuk bayangan di titik  $Q'$ . Sinar-sinar dari benda di titik  $M$  akan membentuk bayangan di titik  $M'$ . Jika cahaya merambat secara paraksial, maka terbentuk bayangan tajam dengan cahaya monokromatik. **Sinar paraksial** didefinisikan sebagai sinar yang membuat sudut sangat kecil terhadap sumbu (karena dekatnya sinar merambat terhadap sumbu utama).

Bayangan  $M'Q'$  pada Gambar 4.2 adalah bayangan nyata dan dapat dilihat jika ada layar di titik ini. Tidak semua bayangan dapat ditangkap oleh layar. Sebagai ilustrasi Gambar 4.3. Sinar cahaya dari benda titik  $Q$  mengalami refraksi pada permukaan sferis cekung yang dipisahkan oleh dua medium  $n = 1,0$  dan  $n' = 1,50$ . Ratio fokus adalah 1 : 1,50.



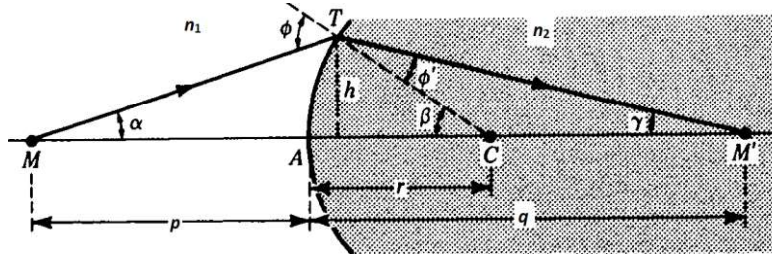
Gambar 4.2 Semua sinar dari benda titik  $Q$  mengalami refraksi pada permukaan cembung dan membentuk bayangan di titik  $Q'$ .

Karena sinar yang direfraksikan divergen, maka sinar tidak membentuk di satu titik di sebelah kanan. Namun, bayangan terbentuk di sebelah kiri di titik  $Q'$ , yang merupakan perpanjangan sinar divergen. Dalam hal ini bayangan yang terbentuk adalah maya.



Gambar 4.3 Semua sinar yang berasal dari titik  $Q$  mengalami refraksi di permukaan cekung secara divergen dan membentuk bayangan maya di titik  $Q'$

Penurunan persamaan refraksi pada permukaan lengkung.



Gambar 4.4 Geometri untuk penurunan persamaan paraksial menggunakan posisi bayangan.

Pada titik  $T$  hukum Snell ditulis

$n_1 \sin \phi = n_2 \sin \phi'$  secara paraksial ditulis

$$n_1 \phi = n_2 \phi' \quad (4.2)$$

Untuk segitiga  $MTC$ ,  $M'TC$  berturut-turut ditulis

$$\phi = \alpha + \beta \quad \text{dan} \quad \beta = \phi' + \gamma \rightarrow \phi = \beta - \gamma$$

Kemudian disubstitusi ke dalam

$$n_1 (\alpha + \beta) = n_2 (\beta - \gamma)$$

$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$

untuk sudut  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  diperoleh

$$\tan \alpha = \frac{h}{p}, \quad \tan \beta = \frac{h}{r}, \quad \text{dan} \quad \tan \gamma = \frac{h}{q}$$

Karena sinar datang secara paraksial, maka

$$\alpha = \frac{h}{p}, \beta = \frac{h}{r}, \text{ dan } \gamma = \frac{h}{q}$$

Masing-masing sudut  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  dapat disusun menjadi

$$\frac{n_1 h}{p} + \frac{n_2 h}{q} = \frac{(n_2 - n_1) h}{r}$$

Dan menjadi

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{r} \quad (4.3)$$

Jika bayangan terbentuk di jauh tak berhingga, maka benda terletak di  $p = f$  atau ditulis

$$\frac{n_1}{f} + \frac{n_2}{\infty} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

$$\frac{n_1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{r} \quad (4.4)$$

Jika benda terletak di tak berhingga, maka bayangan terletak di titik  $f'$  atau ditulis

$$\frac{n_1}{\infty} + \frac{n_2}{f'} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

Atau

$$\frac{n_2}{f'} = \frac{n_2 - n_1}{r} \quad (4.5)$$

Hubungan semua persamaan ini dapat ditulis

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_1}{f} = \frac{n_2}{f'} = \frac{n_2 - n_1}{r} \quad (4.6)$$

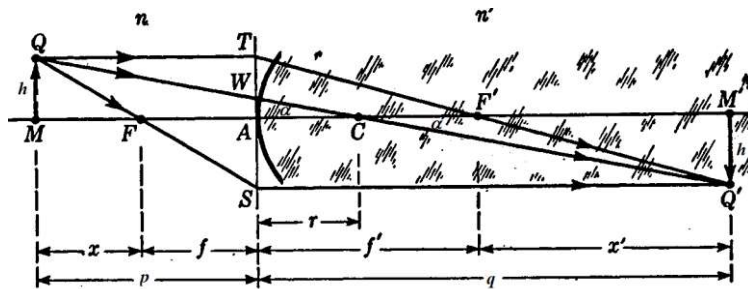
### Perbesaran bayangan

Gambar 4.5 memperlihatkan pembentukan bayangan pada permukaan lengkung tunggal. Segitiga  $CQM$  dan  $CQ'M'$ .

$$\tan \alpha = \frac{h}{p+r} = -\frac{h'}{q-r} \text{ atau}$$

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q-r}{p+r} \quad (4.7)$$

Jika  $m$  positif, bayangan adalah maya dan tegak, dan jika negatif, bayangan nyata dan terbalik.



Gambar 4.5 Pembentukan bayangan pada permukaan lengkung tunggal

### Konvensi Aturan

Berikut ini akan disusun konvensi tanda untuk menjelaskan semua pembahasan dalam optika geometris, yakni:

1. Pada semua gambar sinar merambat dari kiri ke kanan.
2. Semua benda berjarak  $p$  dinyatakan positif jika diukur sebelah kiri verteks dan negatif jika di sebelah kanan verteks.
3. Semua jarak bayangan  $q$  dinyatakan positif jika diukur sebelah kanan verteks dan negatif jika diukur sebelah kiri verteks.
4. Panjang kedua fokus adalah positif untuk sistem konvergen dan negatif untuk sistem divergen.
5. Dimensi benda dan bayangan adalah positif jika diukur tegak (atas) dari sumbu dan negatif jika diukur terbalik (bawah) dari sumbu.
6. Semua permukaan cembung memiliki radius positif dan semua permukaan cekung memiliki radius negatif.

### Contoh 4.1

Salah satu ujung batang kaca berdiameter 4,0 cm berbentuk semi silinder. Sebuah sumber cahaya kecil berjarak 6,0 cm dari ujung batang. Dimanakah (a) lokasi bayangan sumber cahaya itu, (b) jarak fokus pertama, dan (c) jarak fokus kedua permukaan itu?

### Solusi

Data:  $p = 6,0$  cm;  $r = 2,0$  cm;  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,50$ ;  $q = \dots?$

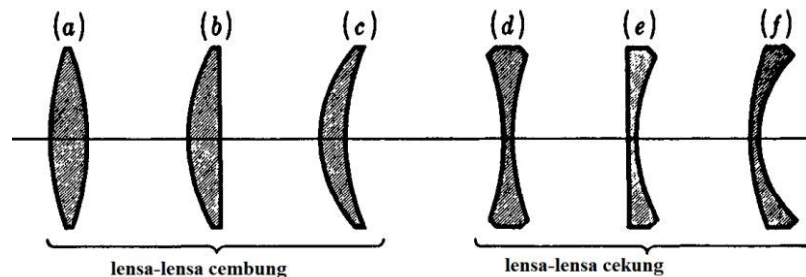
$$(a) \frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{r} \rightarrow \frac{1,00}{6,0 \text{ cm}} + \frac{1,50}{q} = \frac{1,50 - 1,00}{2,0 \text{ cm}} \rightarrow q = 18 \text{ cm}$$

$$(b) \frac{n_1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{r} \rightarrow f = 4,0 \text{ cm}$$

$$(c) \frac{n_2}{f'} = \frac{n_2 - n_1}{r} \rightarrow f' = 6,0 \text{ cm}$$

#### 4.2.2 Lensa Tipis

Sebuah lensa tipis dapat didefinisikan ketebalannya sangat kecil dibanding dengan sifat optisnya, seperti radius, kurva kedua permukaan sferisnya, panjang fokus pertama dan kedua, dan jarak objek dan bayangan yang dibentuk. Bentuk-bentuk lensa telah diperlihatkan pada Gambar 7.6

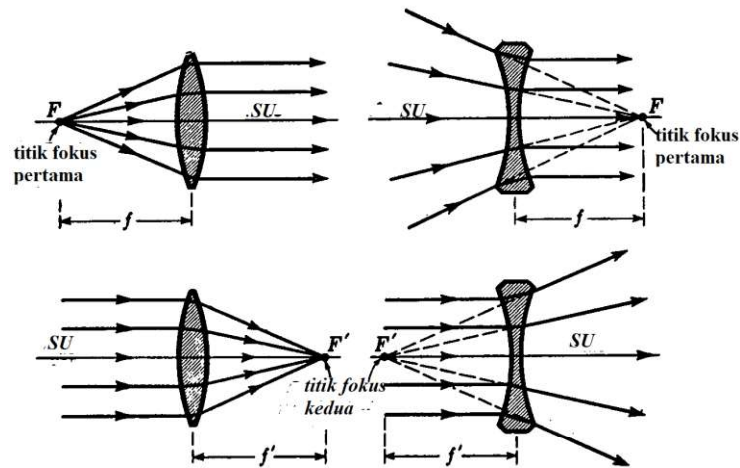


Gambar 4.6 Jenis-jenis lensa cembung dan cekung (a) cembung dua, (b) cembung datar, (c) cembung cekung, (d) cekung dua, (e) cekung datar, dan (f) cekung cembung.

#### Titik Fokus dan Panjang Fokus

Gambar 4.7 menggambarkan sumbu utama berupa garis lurus melalui pusat lensa dan tegak lurus dua muka kelengkungan pada titik persimpangan. **Titik fokus pertama**  $F$  merupakan titik pada sumbu yang memiliki sifat bahwa cahaya datang atau menuju titik  $F$  yang mengakibatkan sinar yang direfraksikan merambat secara paralel.

Setiap lensa memiliki dua titik fokus yang jaraknya sama dari pusat lensa. Dengan demikian dapat ditulis  $f = f'$ . **Titik fokus kedua**  $F'$  merupakan titik pada sumbu yang memiliki sifat sinar datang paralel akan menuju atau seakan dari titik fokus setelah direfraksikan.

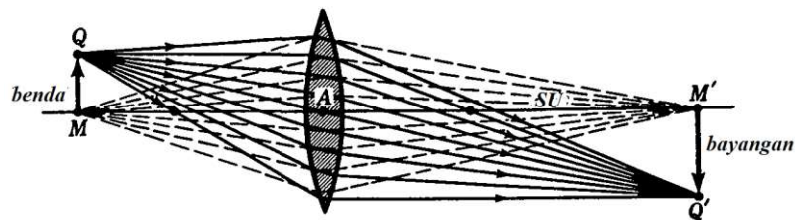


Gambar 4.7 memperlihatkan terbentuknya fokus di daerah bidang fokus karena sinar datang secara miring terhadap sumbu utama.

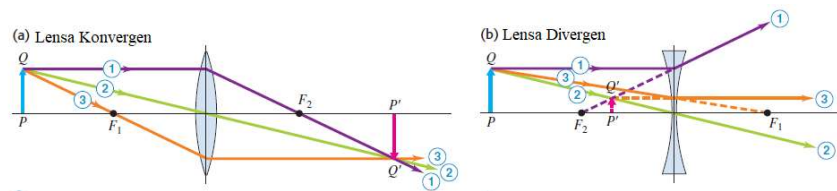
### Formasi Bayangan

Jika benda diletakkan pada salah satu sisi atau lainnya dari lensa konvergen dan di luar bidang fokus, sebuah bayangan akan terbentuk pada sisi lainnya, seperti Gambar 4.8. Jika benda digerakan mendekati bidang fokus pertama, sebuah bayangan akan terbentuk lebih jauh dari bidang fokus kedua dan lebih besar bayangannya. Jika benda digerakan menjauhi bidang fokus pertama  $F$ , sebuah bayangan terbentuk mendekati  $F'$  dan bayangannya lebih kecil.

Dalam Gambar 4.8 semua sinar datang dari titik benda  $Q$  dan membentuk bayangan di titik  $Q'$ , dan sinar yang datang dari titik  $M$  akan membentuk sebuah fokus di titik  $M'$ . Kondisi ideal dan persamaan yang diberikan dalam bab ini hanya terjadi pada sinar praksial.



Gambar 4.8 Formasi bayangan nyata dari lensa tipis. Semua sinar yang keluar dari titik  $M$  dan  $Q$  pada benda dan membentuk bayangan pada titik  $M'$  dan  $Q'$ .



Gambar 4.9 Sinar-sinar pembentuk bayangan pada lensa cembung dan cekung

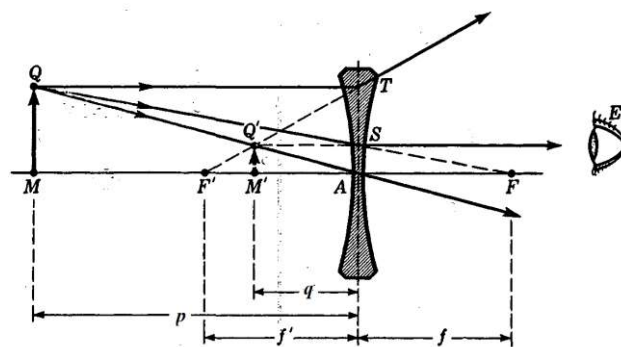
Sinar-sinar pembentuk bayangan pada lensa cembung adalah:

- 1) Sinar datang sejajar sumbu utama direfraksikan melalui titik fokus kedua
- 2) Sinar datang menuju pusat lensa akan ditransmisikan tanpa refraksi
- 3) Sinar datang melalui titik fokus pertama akan direfraksikan sejajar sumbu utama

Sinar-sinar pembentuk bayangan pada lensa cekung adalah:

- 1) Sinar datang sejajar sumbu utama direfraksikan seolah-olah dari fokus kedua
- 2) Sinar datang menuju pusat lensa akan ditransmisikan tanpa refraksi
- 3) Sinar datang menuju titik fokus pertama akan direfraksikan sejajar sumbu utama

Benda yang terletak di depan lensa cekung akan selalu membentuk bayangan maya seperti Gambar 4.10

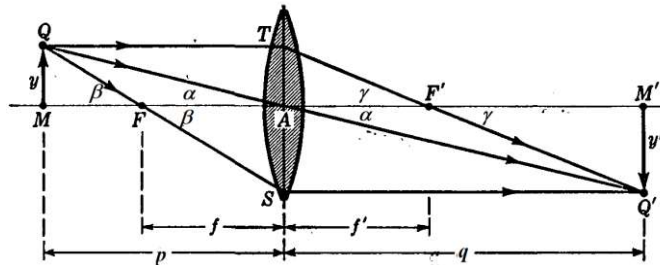


Gambar 4.10 Pembentukan bayangan dari lensa cekung.



### Persamaan lensa tipis

Persamaan lensa tipis diperoleh dari gabungan tangen  $\alpha$  dan  $\beta$  atau  $\alpha$  dan  $\gamma$  secara paraksial. Persamaan lensa diturunkan dari sinar paraksial tangen  $\alpha$  dan  $\beta$ .



Gambar 4.11 Tiga sinar pembentuk bayangan pada lensa

$$\tan \beta = \frac{y}{p-f} = -\frac{y'}{f} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f}{p-f} \text{ dan}$$

$$\tan \alpha = \frac{y}{p} = -\frac{y'}{q} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{q}{p}$$

Keduanya digabung

$$-\frac{q}{p} = -\frac{f}{p-f} \Rightarrow \frac{p-f}{pf} = \frac{1}{q} \text{ dan dapat ditulis}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (4.8)$$

Adapun perbesaran lateral yang terjadi adalah

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{q}{p} \quad (4.9)$$

### Contoh 4.2

Jika benda diletakkan 6,0 cm di depan lensa yang memiliki jarak titik fokus +10,0 cm, dimana (a) bayangan terbentuk, (b) Perbesaran bayangannya?

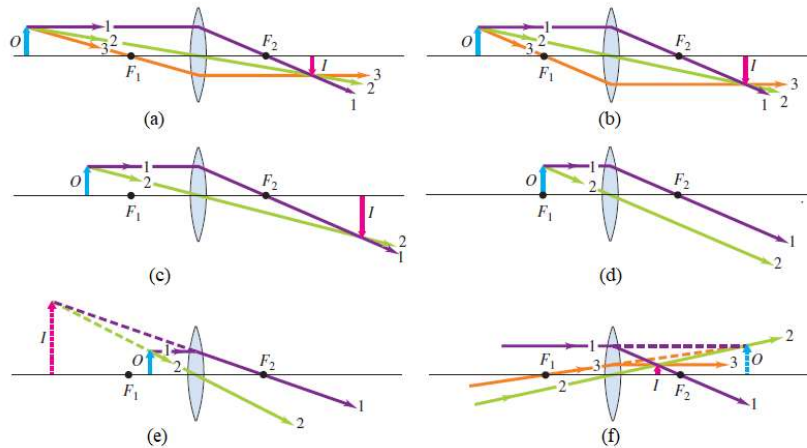
### Solusi

Data:  $p = 6,0$  cm;  $f = 10,0$  cm; (a)  $q = \dots?$ ; (b)  $m = \dots?$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \rightarrow \frac{1}{10,0 \text{ cm}} = \frac{1}{6,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} \rightarrow q = 15 \text{ cm}$$

$$m = -\frac{q}{p} = -\frac{15 \text{ cm}}{6,0 \text{ cm}} = -2,5 \text{ kali}$$

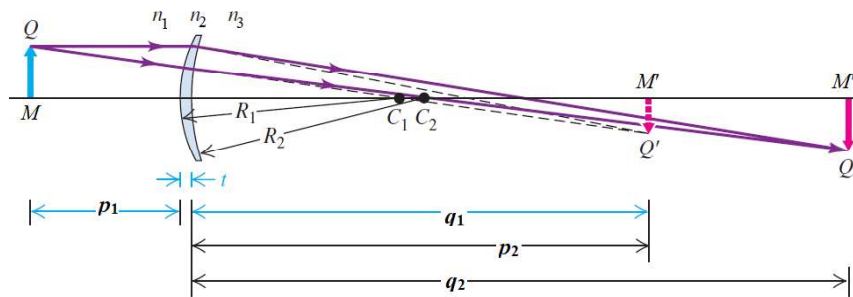
Variasi letak benda dan bayangan pada lensa cembung



Gambar 4.12 Variasi letak benda dan bayangan pada lensa cembung

**Persamaan Pembuat Lensa**

Secara geometri penurunan persamaan pembuat lensa dapat dilakukan dengan bantuan Gambar 4.13



Gambar 4.13 Pembentukan bayangan pertama dan kedua oleh permukaan lengkung.

Persamaan permukaan lengkung dapat ditulis pada permukaan pertama yang cembung dengan medium n1 dan n2

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{q_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} \quad (4.10)$$

Untuk permukaan kedua yang cembung, berlaku

$$\frac{n_2}{p_2} + \frac{n_3}{q_2} = \frac{n_3 - n_2}{R_2} \Rightarrow \frac{n_2}{-q_1} + \frac{n_1}{q_2} = \frac{n_1 - n_2}{R_2} \quad (4.11)$$

karena lensa tipis, maka  $p_2 = -q_1$ , dan  $n_1 = n_3$  jumlah kedua persamaan

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_1}{q_2} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_1 - n_2}{R_2} = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.13)$$

Catatan:  $n_1$  = indeks bias medium lensa berada,  $n_2$  = indeks bias lensa,  $R_1$  = jejari permukaan pertama,  $R_2$  = jejari permukaan kedua,  $p_1$  = jarak benda,  $q_2$  = jarak bayangan. Berlaku aturan konvensi sinar dan tanda.

Jika lensanya tipis maka berlaku

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.14)$$

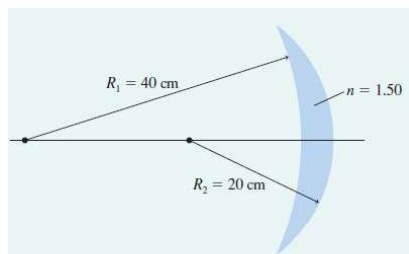
### Konvensi persamaan pembuat lensa

Jari-jari  $R_1$  dan  $R_2$  bertanda positif jika permukaan cembung menuju benda dan negatif jika cekungnya menuju benda. Jarak fokus  $f$  bertanda positif untuk lensa cembung, tengahnya tebal dan negatif untuk lensa cekungnya, tengahnya tipis.

### Contoh 4.3

Berapa panjang fokus kaca lensa meniskus yang ditunjukkan Gambar 4.14. Apakah lensa ini cembung atau cekung?

Gambar 4.14



### Solusi

Data:  $R_1 = -40$  cm;  $R_2 = -20$  cm;  $n_1 = 1,00$ ;  $n_2 = 1,50$ ;  $f = \dots?$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow \frac{1}{f} = \left( \frac{1,50 - 1,00}{1,00} \right) \left( \frac{1}{-40 \text{ cm}} - \frac{1}{-20 \text{ cm}} \right) \Rightarrow$$

$$f = 80 \text{ cm}$$

Lensa tersebut adalah cembung karena jarak fokus bertanda positif.

### Daya Lensa Tipis

Daya lensa dirumuskan dalam satuan diopiter dengan persamaan

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow P = \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Satuan panjang yang digunakan dalam meter.

### Contoh 4.4

Berapakah daya lensa untuk Gambar 4.14?

#### Solusi

Data:  $f = 80 \text{ cm}$ ;  $P = \dots?$

$$P = \frac{1}{f(\text{m})} = \frac{1}{0,80 \text{ m}} = 1,25 \text{ diopiter}$$

### 4.2.3 Kombinasi Lensa Tipis

Jika terdapat dua atau lebih lensa tipis, dapat diketahui bayangan akhir yang dihasilkan oleh sistem lensa itu. Sistem lensa dapat dilakukan dengan dua lensa terpisah atau sistem lensa disatukan. Persamaan lensa yang digunakan adalah sistem lensa tipis dengan menggunakan aturan konvensi yang telah disepakati sebelumnya.

### Contoh 4.5

Sebuah benda tingginya 1,2 cm diletakkan 4,0 cm dari lensa cembung dua yang memiliki jarak fokus 12 cm. Sebuah lensa kedua memiliki panjang fokus 6,0 cm yang ditempatkan 12 cm di belakang lensa pertama. Bagaimanakah sifat bayangan akhir yang terbentuk?

#### Solusi

Data:  $h_1 = 1,2 \text{ cm}$ ;  $p_1 = 4,0 \text{ cm}$ ;  $f_1 = 12 \text{ cm}$ ;  $f_2 = 6,0 \text{ cm}$ ;  $d = 12 \text{ cm}$ .

Bagaimana sifat bayangan akhir benda

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \rightarrow \frac{1}{12 \text{ cm}} = \frac{1}{4,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q_1} \rightarrow q_1 = -6,0 \text{ cm}$$

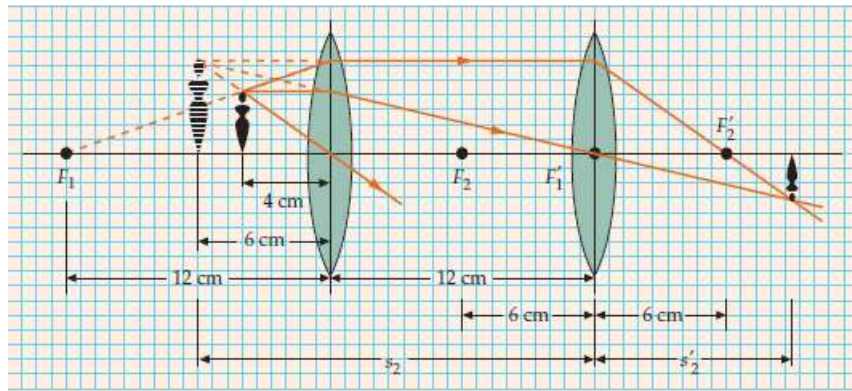
bayangan terbentuk di depan lensa pertama

$$m = \frac{h'_1}{h_1} = -\frac{q_1}{p_1} \rightarrow m = \frac{h'_1}{1,2 \text{ cm}} = -\frac{-6,0 \text{ cm}}{4,0 \text{ cm}} \rightarrow m = 1,5 \text{ kali lebih besar dan } h'_1 =$$

1,8 cm

Bayangan  $q_1$  bertindak sebagai benda untuk lensa kedua dan berada pada jarak  $p_2 = d - q_1 = 12 \text{ cm} - (-6,0 \text{ cm}) = 18 \text{ cm}$  dan  $h_2 = h'_1 = 1,8 \text{ cm}$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \rightarrow \frac{1}{6,0 \text{ cm}} = \frac{1}{18 \text{ cm}} + \frac{1}{q_2} \rightarrow q_2 = 9,0 \text{ cm}$$



Gambar 4.15 Pembentukan bayangan sistem dua lensa

$$m = \frac{h'_2}{h_2} = -\frac{q_2}{p_2} \rightarrow m = \frac{h'_2}{1,8 \text{ cm}} = -\frac{9,0 \text{ cm}}{18 \text{ cm}} \rightarrow m = -0,5 \text{ kali lebih besar dan } h'_2 =$$

0,9 cm

Sifat bayangan akhir benda: diperkecil, nyata, berada 9,0 cm di belakang lensa kedua.

Untuk dua lensa yang memiliki jarak fokus  $f_1$  dan  $f_2$  diletakkan bersama dalam satu tempat akan diperoleh besar jarak fokus efektif gabungan keduanya dengan persamaan

$$\frac{1}{f_{ef}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (4.15)$$

Daya efektif lensa gabungannya adalah

$$P_{ef} = P_1 + P_2 \quad (4.16)$$

Bukti persamaan

Untuk dua lensa saling menyatu, pada lensa pertama berlaku persamaan

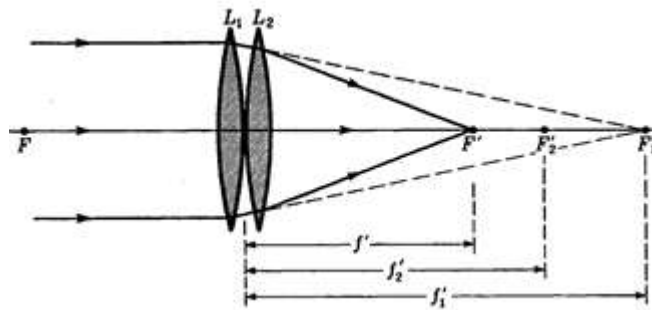
$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \quad (4.17)$$

Pada lensa kedua berlaku,  $p_2 = -q_1$  persamaannya

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{-q_1} + \frac{1}{q_2} \quad (4.18)$$

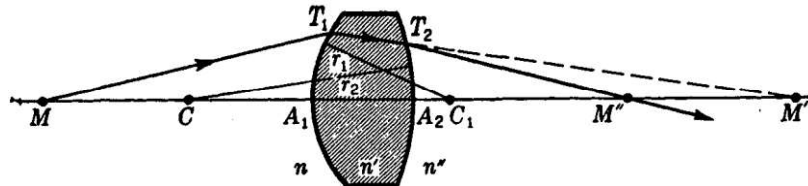
Jika kedua persamaan dijumlahkan diperoleh

$$\frac{1}{f_{ef}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} \quad (4.19)$$



Gambar 4.16 Kombinasi dua lensa tipis saling kontak

#### 4.2.4 Lensa Tebal



Gambar 4.17 Refraksi sinar pada kedua permukaan lensa

Jika ketebalan lensa tidak dianggap kecil dibanding jarak fokus seperti lensa tipis, maka lensa itu dikatakan lensa tebal. Berdasarkan gambar di atas persamaan lengkung untuk tiap permukaan dirumuskan:

Untuk permukaan pertama

$$\frac{n}{p_1} + \frac{n'}{q_1} = \frac{n' - n}{r_1} \quad (4.20)$$

Untuk permukaan kedua

$$\frac{n'}{p_2} + \frac{n''}{q_2} = \frac{n'' - n'}{r_2} \quad (4.21)$$

Untuk benda jauh atau bayangan jauh maka persamaan di atas dapat ditulis

$$\frac{n}{f_1} = \frac{n'}{f_1'} = \frac{n'-n}{r_1} \quad (4.22)$$

dan

$$\frac{n'}{f_2'} = \frac{n''}{f_2''} = \frac{n''-n'}{r_2} \quad (4.23)$$

Adapun persamaan untuk lensa tebal adalah

$$\frac{n}{f} = \frac{n'}{f_1'} + \frac{n''}{f_2''} - \frac{dn''}{f_1' f_2''} = \frac{n''}{f''} \quad (4.24)$$

Keterangan

$n$  = indeks refraksi medium di depan lensa

$n'$  = indeks refraksi lensa

$n''$  = indeks refraksi medium di belakang lensa

$f$  = jarak fokus pertama lensa

$f_1'$  = jarak fokus kedua permukaan pertama

$f_2'$  = jarak fokus pertama permukaan kedua

$f_2''$  = jarak fokus kedua permukaan kedua

$f''$  = jarak fokus kedua lensa

$d$  = ketebalan lensa

#### Contoh 4.6

Sebuah lensa bikonveks dengan ketebalan 2,00 cm memiliki radius 2,00 cm salah satu permukaannya berada dalam tanki yang berisi air. Sebuah benda di udara diletakkan pada sumbu utama lensa sejauh 5,00 cm dari verteks. Tentukan posisi bayangan akhir benda. Asumsikan indeks refraksi udara 1,00; lensa 1,50; dan air 1,33.

#### Solusi

Data:  $d = 2,00$  cm;  $r_1 = 2,00$  cm;  $r_2 = -2,00$  cm;  $p_1 = 5,00$  cm;  $n = 1,00$ ;  $n' = 1,50$ ;  $n'' = 1,33$

$$\frac{n}{p_1} + \frac{n'}{q_1} = \frac{n'-n}{r_1} \rightarrow \frac{1,00}{5,00 \text{ cm}} + \frac{1,50}{q_1} = \frac{1,50-1,00}{2,00 \text{ cm}} \rightarrow q_1 = 30,0 \text{ cm}$$

$$p_2 = d - q_1 = 2,00 \text{ cm} - 30,0 \text{ cm} = -28,0 \text{ cm}$$

$$\frac{n'}{p_2} + \frac{n''}{q_2} = \frac{n''-n'}{r_2} \rightarrow \frac{1,50}{-28,0 \text{ cm}} + \frac{1,33}{q_2} = \frac{1,33-1,50}{-2,00 \text{ cm}} \rightarrow q_2 = 9,60 \text{ cm di dalam air}$$

#### Contoh 4.7

Sebuah lensa memiliki spesifikasi  $r_1 = +1,5 \text{ cm}$ ;  $r_2 = +1,5 \text{ cm}$ ; dan  $d = 2,0 \text{ cm}$ ;  $n = 1,00$ ;  $n' = 1,60$ ; dan  $n'' = 1,30$ . Tentukan (a) panjang fokus pertama dan kedua tiap permukaan, dan (b) panjang fokus pertama dan kedua sistem.

#### Solusi

Data:  $r_1 = +1,5 \text{ cm}$ ;  $r_2 = +1,5 \text{ cm}$ ; dan  $d = 2,0 \text{ cm}$ ;  $n = 1,00$ ;  $n' = 1,60$ ; dan  $n'' = 1,30$ .

(a) panjang fokus pertama dan kedua tiap permukaan

$$\frac{n}{f_1} = \frac{n'}{f_1'} = \frac{n'-n}{r_1} \rightarrow \frac{1,00}{f_1} = \frac{1,60}{f_1'} = \frac{1,60-1,00}{1,5 \text{ cm}} \rightarrow f_1 = 2,5 \text{ cm, dan } f_1' = 4,0$$

cm

$$\frac{n'}{f_2'} = \frac{n''}{f_2''} = \frac{n''-n'}{r_2} \rightarrow \frac{1,60}{f_2'} = \frac{1,30}{f_2''} = \frac{1,30-1,60}{1,5 \text{ cm}} \rightarrow f_2' = -8,0 \text{ cm dan } f_2'' = -$$

6,5 cm

(b) panjang fokus pertama dan kedua sistem

$$\frac{n}{f} = \frac{n'}{f_1'} + \frac{n''}{f_2''} - \frac{dn''}{f_1' f_2''} = \frac{n''}{f''} \rightarrow \frac{1,00}{f} = \frac{1,60}{4,0 \text{ cm}} + \frac{1,30}{-6,5 \text{ cm}} - \frac{(2,0 \text{ cm})(1,30)}{(4,0 \text{ cm})(-6,5 \text{ cm})} =$$

$$\frac{1,30}{f''} \rightarrow f = 3,33 \text{ cm dan } f'' = 4,33 \text{ cm}$$

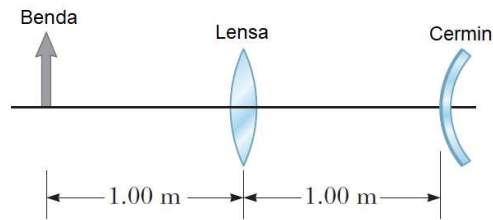
#### Contoh-contoh Kombinasi Lensa dan Cermin

#### Contoh 4.8

Lensa dan cermin dalam Gambar 4.18 terpisah sejauh  $d = 1,00 \text{ m}$  dan panjang fokusnya berurutan  $+80,0 \text{ cm}$  dan  $-50,0 \text{ cm}$ . Sebuah benda diletakkan  $p = 1,00 \text{ m}$  di sebelah kiri lensa seperti gambar. (a) Tentukan



posisi akhir bayangan yang dibentuk cahaya setelah melewati lensa dua kali. (b) Tentukan perbesaran bayangan dan (c) apakah bayangannya tegak atau terbalik



Gambar 4.18

**Solusi**

Data:  $f_l = +80,0$  cm;  $f_c = -50,0$  cm;  $d = 100$  cm

(a) Bayangan yang dibentuk lensa

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{80,0 \text{ cm}} = \frac{1}{100 \text{ cm}} + \frac{1}{q_1} \rightarrow$$

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{80,0 \text{ cm}} - \frac{1}{100 \text{ cm}} = \frac{1}{400 \text{ cm}} \rightarrow q_1 = 400 \text{ cm}$$

Bayangan lensa berada di belakang cermin dan bertindak sebagai benda untuk cermin dengan jarak

$$p_2 = d - q_1 = 100 \text{ cm} - 400 \text{ cm} = -300 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} \rightarrow \frac{1}{-50,0 \text{ cm}} = \frac{1}{-300 \text{ cm}} + \frac{1}{q_2} \rightarrow$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{-50,0 \text{ cm}} + \frac{1}{300 \text{ cm}} = \frac{-5}{300 \text{ cm}} \rightarrow q_2 = -60,0 \text{ cm}$$

Bayangan berada di belakang cermin dan bertindak sebagai benda untuk lensa dengan jarak  $p_3 = d - q_2 = 100 \text{ cm} - (-60,0 \text{ cm}) = 160 \text{ cm}$

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_3} + \frac{1}{q_3} \rightarrow \frac{1}{80,0 \text{ cm}} = \frac{1}{160 \text{ cm}} + \frac{1}{q_3} \rightarrow$$

$$\frac{1}{q_3} = \frac{1}{80,0 \text{ cm}} - \frac{1}{160 \text{ cm}} = \frac{2-1}{160 \text{ cm}} \rightarrow q_3 = 160 \text{ cm}$$

Bayangan berada di sebelah kiri lensa

(b) Perbesaran bayangan

$$m_1 = -\frac{q_1}{p_1} = -\frac{400 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = -4 \text{ kali}$$

$$m_2 = -\frac{q_2}{p_2} = -\frac{-60,0 \text{ cm}}{-300 \text{ cm}} = -\frac{1}{5} \text{ kali}$$

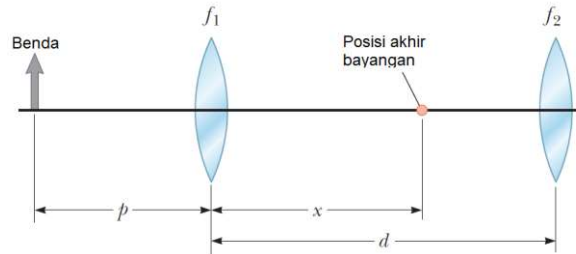
$$m_3 = -\frac{q_3}{p_3} = -\frac{160 \text{ cm}}{160 \text{ cm}} = -1 \text{ kali}$$

$$m_t = m_1 m_2 m_3 = (-4)\left(-\frac{1}{5}\right)(-1) = -\frac{4}{5} = -0,800$$

(c) Bayangan terbalik

**Contoh 4.9**

Dua lensa konvergen memiliki panjang fokus  $f_1 = 10,0$  cm dan  $f_2 = 20,0$  cm ditempatkan pada jarak terpisah  $d = 50,0$  cm seperti Gambar 4.19.



Gambar 4.19

Bayangan yang dibentuk oleh kedua lensa berada di antara keduanya dengan jarak  $x = 31,0$  cm. (a) Berapa nilai  $p$  posisi benda dari lensa pertama? (b) Berapa perbesaran bayangan akhir? (c) Bayangan akhir tegak atau terbalik? (d) Bayangan akhir maya atau nyata?

**Solusi**

Data:  $f_1 = 10,0$  cm;  $f_2 = 20,0$  cm;  $d = 50,0$  cm;  $x = 31,0$  cm

(a)  $p = \dots?$

Perhitungan dimulai dari lensa kedua karena informasi data ada pada posisi akhir bayangan yang maya karena berada di depan lensa kedua.

$$q_2 = -(d - x) = -(50,0 \text{ cm} - 31,0 \text{ cm}) = -19,0 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} \rightarrow \frac{1}{20,0 \text{ cm}} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{-19,0 \text{ cm}} \rightarrow \frac{1}{20,0 \text{ cm}} + \frac{1}{19,0 \text{ cm}} = \frac{1}{p_2}$$

$$\frac{1}{p_2} = \frac{19,0 + 20,0}{380 \text{ cm}} = \frac{39,0}{380 \text{ cm}} \rightarrow p_2 = 9,74 \text{ cm}$$

Jarak bayangan dari lensa pertama

$$d = q_1 + p_2 \rightarrow 50,0 \text{ cm} = q_1 + (9,74 \text{ cm}) \rightarrow q_1 = 40,3 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{10,0 \text{ cm}} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{40,3 \text{ cm}} \rightarrow$$

$$\frac{1}{p_1} = \frac{1}{10,0 \text{ cm}} - \frac{1}{40,3 \text{ cm}} = \frac{40,3 - 10,0}{403 \text{ cm}} \rightarrow p_1 = 13,3 \text{ cm}$$

(b)  $m_t = \dots?$

$$m_1 = -\frac{q_1}{p_1} = -\frac{40,3 \text{ cm}}{13,3 \text{ cm}} = -3,03 \text{ kali dan } m_2 = -\frac{q_2}{p_2} = -\frac{-19,0 \text{ cm}}{9,74 \text{ cm}} = 1,95 \text{ kali}$$

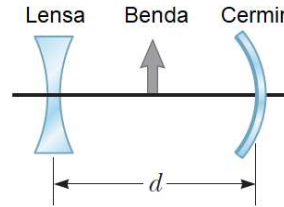
$$m_t = m_1 m_2 = (-3,03)(1,95) = -5,91 \text{ kali}$$

(c) Tanda minus artinya bayangan terbalik

(d) Tanda minus artinya bayangan maya

**Contoh 4.10**

Sebuah benda terletak tepat di tengah antara lensa dan cermin yang dipisahkan dengan jarak  $d = 25,0$  cm seperti Gambar 4.20. Cermin memiliki radius  $20,0$  cm dan panjang fokus lensa  $-16,7$  cm. (a) Jika cahaya beral dari benda dan merambat pertama ke cermin kemudian ke lensa, di mana bayangan akhir terbentuk dalam system ini? (b) Apakah bayangan akhir nyata atau maya? (c) Apakah akhir tegak atau terbalik? (d) Berapakah perbesarannya?



Gambar 4.20

**Solusi**

Data:  $d = 25,0$  cm;  $f_c = 10,0$  cm;  $f_l = -16,7$  cm;  $p_1 = 12,5$  cm

(a)  $q_2 = \dots?$

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{10,0 \text{ cm}} = \frac{1}{12,5 \text{ cm}} + \frac{1}{q_1} \rightarrow$$

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{10,0 \text{ cm}} - \frac{1}{12,5 \text{ cm}} = \frac{12,5 - 10,0}{125 \text{ cm}} = \frac{2,50}{125 \text{ cm}} \rightarrow q_1 = 50,0 \text{ cm}$$

$p_2 = d - q_1 = 25,0 \text{ cm} - 50,0 \text{ cm} = -25,0 \text{ cm}$  berada di kiri lensa artinya di belakang lensa

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} \rightarrow \frac{1}{-16,7 \text{ cm}} = \frac{1}{-25,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q_2} \rightarrow$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{-16,7 \text{ cm}} - \frac{1}{-25,0 \text{ cm}} = \frac{-25,0 - (-16,7)}{418 \text{ cm}} = \frac{-8,30}{418 \text{ cm}} \rightarrow q_2 = -50,3 \text{ cm}$$

Artinya bayangan akhir berada di sebelah kanan lensa sejauh  $50,3$  cm dari lensa atau  $25,3$  cm di kanan cermin.

(b) Bayangan akhir adalah maya (tanda minus pada  $q_2$ )

(c) Bayangan akhir adalah tegak

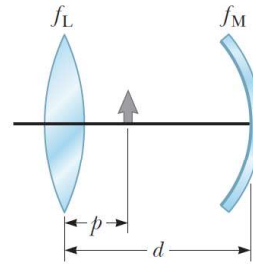
(d) Perbesaran bayangan

$$m_t = m_1 m_2 = \left(-\frac{q_1}{p_1}\right) \left(-\frac{q_2}{p_2}\right) = \left(-\frac{50,0 \text{ cm}}{12,5 \text{ cm}}\right) \left(-\frac{-50,3 \text{ cm}}{-25,0 \text{ cm}}\right) = 8,05 \text{ kali}$$

**Contoh 4.11**

Perhatikan kombinasi lensa cermin pada Gambar 4.21. Lensa memiliki panjang fokus  $20,0$  cm dan cermin memiliki panjang fokus  $50,0$  cm. Lensa dan cermin terpisah pada jarak  $130$  cm dan benda berada pada jarak  $30,0$

cm dari lensa. Layar ditempatkan di sebelah kiri lensa. Siswa mengamati dan memperoleh dua posisi layar untuk mengamati bayangan benda dengan tajam. Posisi pertama layar disebabkan benda memancarkan cahaya langsung ke lensa. Posisi kedua layar disebabkan benda memancarkan cahaya menuju cermin dan direfleksikan ke lensa.



Gambar 4.21

### Solusi

Data:  $f_l = 20,0$  cm;  $f_c = 50,0$  cm;  $d = 130$  cm;  $p = 30,0$  cm

Untuk posisi pertama layar dengan benda memancarkan cahaya langsung ke lensa. Posisi benda dinyatakan ruang nyata.

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{20,0 \text{ cm}} = \frac{1}{30,0 \text{ cm}} + \frac{1}{q_1} \rightarrow q_1 = 60,0 \text{ cm}$$

Posisi pertama layar berada pada jarak 60,0 cm di kiri lensa.

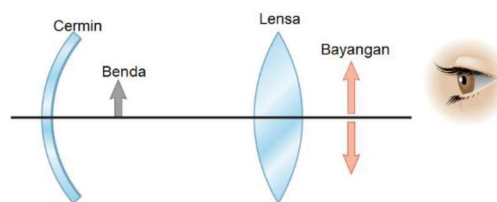
Posisi kedua layar,  $p_1 = d - p = 130 \text{ cm} - 30,0 \text{ cm} = 100 \text{ cm}$

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{50,0 \text{ cm}} = \frac{1}{100 \text{ cm}} + \frac{1}{q_1} \rightarrow q_1 = 100 \text{ cm}$$

Posisi bayangan kembali ke posisi benda sehingga bayangan akhir yang dibentuk pada layar tetap berada pada jarak 60,0 cm sebelah kiri dari lensa. Jadi tidak benar bahwa ada dua posisi letak layar untuk mendapatkan bayangan di kiri lensa.

### Contoh 4.12

Seorang pengamat di kanan system lensa cermin seperti Gambar 4.22 melihat dua bayangan nyata sam besar di posisi



yang sama. Satu bayangan tegak dan satunya terbalik. Kedua bayangan besarnya 1,50 kali besar bendanya. Lensa memiliki panjang fokus 10,0 cm. Lensa dan cermin terpisah sejauh 40,0 cm. Tentukan panjang fokus cermin.

### Solusi

Data:  $m = 1,50$  kali;  $f_l = 10,0$  cm;  $d = 40,0$  cm;  $f_c = \dots$  ?

Benda memancarkan cahaya langsung ke lensa dan membentuk bayangan di belakang lensa dengan posisi terbalik

$$m = -\frac{q}{p} \rightarrow -1,5 = -\frac{q}{p} \rightarrow q = 1,5p$$

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \rightarrow \frac{1}{10,0 \text{ cm}} = \frac{1}{p} + \frac{1}{1,5p} = \frac{1,5+1}{1,5p} = \frac{2,5}{1,5p} \rightarrow p = 16,7 \text{ cm}$$

Jarak bayangan ke lensa  $q = 1,5(16,7 \text{ cm}) = 25,1$  cm sebelah kanan lensa.

Jarak benda ke cermin =  $d - p = 40,0 \text{ cm} - 16,7 \text{ cm} = 23,3$  cm

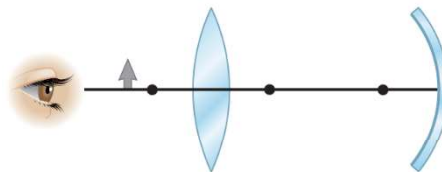
Untuk mendapatkan posisi bayangan di belakang lensa oleh bayangan sebagai benda dari cermin harus berada pada posisi semula. Jadi bayangan dari cermin memiliki perbesaran 1,00 kali dengan kata lain jarak bayangan yang dihasilkan cermin sama dengan jarak bendanya. Jarak fokus cermin adalah

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \rightarrow \frac{1}{f_c} = \frac{1}{23,3 \text{ cm}} + \frac{1}{23,3 \text{ cm}} = \frac{2}{23,2 \text{ cm}} \rightarrow f_c = \frac{23,3 \text{ cm}}{2} = 11,7 \text{ cm}$$

Jarak fokus cermin 11,7 cm

#### Contoh 4. 13

Gambar 4.23 memperlihatkan sebuah lensa tipis dengan radius permukaan 9,00 cm dan 11,0 cm. Lensa berada di depan cermin cekung dengan radius 8,00 cm. Asumsikan panjang fokus  $f_1$  dan  $f_2$  lensa 5,00 cm dari pusat lensa. (a) Tentukan indeks refraksi lensa. Lensa dan cermin terpisah sejauh 20,0 cm dan benda diletakkan 8,00 cm di sebelah kiri lensa. Tentukan (b) posisi bayangan akhir dan (c) besar bayangan yang dilihat oleh pengamat. (d) apakah bayangan akhir tegak atau terbalik? Jelaskan



Gambar 4.23

#### Solusi

Data:  $R_1 = 9,00$  cm;  $R_2 = 11,0$  cm;  $R_c = 8,00$  cm;  $f_1 = f_2 = 5,00$  cm;  $d = 20,0$  cm;  $p = 8,00$  cm

(a)  $n = \dots$  ?

$$\frac{1}{f_1} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \rightarrow \frac{1}{5,00 \text{ cm}} = (n - 1) \left( \frac{1}{9,00 \text{ cm}} - \frac{1}{-11,0 \text{ cm}} \right)$$

$$\frac{1}{5,00 \text{ cm}} = (n - 1) \left( \frac{20,0}{99,0 \text{ cm}} \right) \rightarrow n = 1,99$$

(b)  $q_3 = \dots ?$

Mula-mula lensa membentuk bayangan

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{5,00 \text{ cm}} = \frac{1}{8,00 \text{ cm}} + \frac{1}{q_1}$$

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{5,00 \text{ cm}} - \frac{1}{8,00 \text{ cm}} = \frac{3}{40,0 \text{ cm}} \rightarrow q_1 = 13,3 \text{ cm}$$

Bayangan ini bertindak sebagai benda pada cermin dengan jarak

$$p_2 = d - q_1 = 20,0 \text{ cm} - 13,3 \text{ cm} = 6,70 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} \rightarrow \frac{1}{4,00 \text{ cm}} = \frac{1}{6,70 \text{ cm}} + \frac{1}{q_2}$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{4,00 \text{ cm}} - \frac{1}{6,70 \text{ cm}} = \frac{2,70}{26,8 \text{ cm}} \rightarrow q_2 = 9,93 \text{ cm}$$

Bayangan benda berada di depan cermin sejauh 9,93 cm. Bayangan ini bertindak sebagai benda untuk lensa dengan jarak dari lensa

$$p_3 = d - q_2 = 20,0 \text{ cm} - 9,93 \text{ cm} = 10,1 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_3} + \frac{1}{q_3} \rightarrow \frac{1}{5,00 \text{ cm}} = \frac{1}{10,1 \text{ cm}} + \frac{1}{q_3}$$

$$\frac{1}{q_3} = \frac{1}{5,00 \text{ cm}} - \frac{1}{10,1 \text{ cm}} = \frac{5,10}{50,5 \text{ cm}} \rightarrow q_3 = 9,90 \text{ cm}$$

Berada di kiri lensa

(c)  $m = \dots ?$

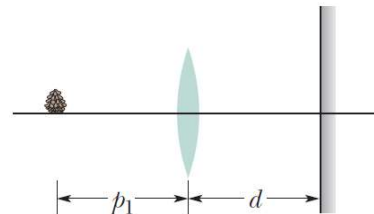
$$m_t = m_1 m_2 m_3 = \left( -\frac{q_1}{p_1} \right) \left( -\frac{q_2}{p_2} \right) \left( -\frac{q_3}{p_3} \right) = \left( -\frac{13,3 \text{ cm}}{8,00 \text{ cm}} \right) \left( -\frac{9,93 \text{ cm}}{6,70 \text{ cm}} \right) \left( -\frac{9,90 \text{ cm}}{10,1 \text{ cm}} \right)$$

$$m_t = -2,42 \text{ kali}$$

(d) Sifat bayangan terbalik dan nyata

#### Contoh 4.14

Sebuah benda kecil berada pada jarak  $p_1 = 1,0 \text{ m}$  di depan lensa yang panjang fokusnya  $f_1 = 0,50 \text{ m}$ ; cermin datar berada pada jarak  $d = 2,0 \text{ m}$  di belakang lensa seperti Gambar 4.24. Cahaya dari benda kecil melewati



lensa dan direfleksikan oleh cermin ke kiri melewati lensa dan membentuk

bayangan akhir. Berapa (a) jarak antara lensa dan bayangan dan (b) perbesaran lateral bayangan? Apakah bayangan (c) nyata atau maya, (d) di sebelah kiri atau kanan lensa, dan (e) tegak atau terbalik?

### Solusi

Data:  $p_1 = 1,0 \text{ m}$ ;  $f_1 = 0,50 \text{ m}$ ;  $d = 2,0 \text{ m}$

(a) Bayangan yang dibentuk lensa

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{0,50 \text{ m}} = \frac{1}{1,0 \text{ m}} + \frac{1}{q_1} \rightarrow \frac{1}{q_1} = \frac{1}{0,50 \text{ m}} - \frac{1}{1,0 \text{ m}} = \frac{1}{1,0 \text{ m}}$$

$$q_1 = 1,0 \text{ m}$$

Bayangan bertindak sebagai benda yang memiliki jarak  $p_2 = d - q_1 = 2,0 \text{ m} - 1,0 \text{ m} = 1,0 \text{ m}$ . Setelah refleksi dengan cermin datar bayangan dibentuk pada jarak  $q_2 = -p_2 = -1,0 \text{ m}$  di belakang cermin. Bayangan ini menjadi benda untuk lensa dengan jarak  $p_3 = d - q_2 = 2,0 \text{ m} - (-1,0 \text{ m}) = 3,0 \text{ m}$ . Bayangan yang terjadi setelah mengalami refraksi dengan lensa sejauh  $p_3 = 3,0 \text{ m}$  adalah

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{p_3} + \frac{1}{q_3} \rightarrow \frac{1}{0,50 \text{ m}} = \frac{1}{3,0 \text{ m}} + \frac{1}{q_3} \rightarrow \frac{1}{q_3} = \frac{1}{0,50 \text{ m}} - \frac{1}{3,0 \text{ m}} = \frac{1}{q_3} = \frac{5}{3,0 \text{ m}}$$

$$q_3 = 0,60 \text{ m}$$

(b)  $m_t = \dots ?$

$$m_t = m_1 m_2 m_3 = \left(-\frac{q_1}{p_1}\right) \left(-\frac{q_2}{p_2}\right) \left(-\frac{q_3}{p_3}\right)$$

$$m_t = \left(-\frac{1,0 \text{ m}}{1,0 \text{ m}}\right) \left(-\frac{-1,0 \text{ m}}{1,0 \text{ m}}\right) \left(-\frac{0,60 \text{ m}}{3,0 \text{ m}}\right) = 0,2 \text{ kali}$$

(c) Bayangannya nyata

(d) Di sebelah kiri lensa

(e) Bayangan tegak

### 4.3 Rangkuman

- Objek dan bayangan pada permukaan lengkung memenuhi persamaan

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{q_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}$$

- Objek dan bayangan pada lensa tipis memenuhi persamaan

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}; \quad m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad \text{dan} \quad P = \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1}\right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

- Kombinasi lensa tipis yang disatukan dihasilkan jarak fokus efektif dengan persamaan  $\frac{1}{f_{ef}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2}$
- Lensa tebal merupakan lensa yang ketebalannya tidak diabaikan dan dapat dihitung dengan persamaan

$$\frac{n}{f_1} = \frac{n'}{f_1'} = \frac{n' - n}{r_1}; \quad \frac{n'}{f_2'} = \frac{n''}{f_2''} = \frac{n'' - n'}{r_2}; \quad \text{dan}$$

$$\frac{n}{f} = \frac{n'}{f_1'} + \frac{n''}{f_2''} - \frac{dn''}{f_1' f_2''} = \frac{n''}{f''}$$

#### 4.4 Soal-Soal

1. Seekor ikan emas berada dalam wadah berbentuk silinder berdiameter 50 cm. Jika ikan berada pada 10 cm dari sisi terdekat wadah, dimanakah letak bayangan ikan tersebut jika dilihat dari sisi luar wadah?
2. Bagian belakang batang kaca padat dengan indeks bias 1,50 bentuk permukaan semisferis dengan radius 1,00 cm. Sebuah benda kecil ditempatkan di udara pada sumbu 4,00 cm di depan verteks. Temukan posisi bayangan. Anggap  $n = 1,00$  untuk udara.
3. Sebuah permukaan konkaf dengan radius 4,00 cm dipisahkan dua medium dengan indeks bias  $n = 1,00$  dan  $n' = 1,50$ . Sebuah benda ditempatkan di medium pertama pada jarak 10 cm dari verteks. Tentukan (a) panjang fokus pertama, (b) panjang fokus kedua, dan (c) jarak bayangan
4. Ujung kiri batang kaca panjang yang berindeks bias 1,64 memiliki permukaan cembung beradius 2,50 cm. Sebuah benda kecil diletakkan dalam udara pada sumbu 9,00 cm dari verteks. Tentukan (a) panjang fokus pertama dan kedua, (b) daya lensa, (c) jarak bayangan, dan (d) perbesaran lateralnya.
5. Ujung kiri sebuah bak air mempunyai permukaan transparan dengan radius -2,00 cm. Sebuah benda kecil tinggi 2,50 cm berada di udara



- dan terletak pada sumbu sejauh 10,0 cm dari verteks. Tentukan (a) panjang fokus pertama dan kedua, (b) daya permukaan, (c) jarak bayangan, dan (d) ukuran bayangan. Anggap air berindeks 1,3330
6. Sebuah benda diletakkan 12,0 cm di depan lensa divergen yang panjang fokusnya 6,0 cm. Tentukan sifat bayangannya.
  7. Sebuah lensa plan konveks memiliki panjang fokus 25,0 cm, lensa dibuat dari bahan kaca berindeks bias  $n = 1,520$ . Hitunglah radius kelengkungan lensa dan bagaimana jika lensa dibalik.
  8. Dua lensa, setiap lensa mempunyai panjang fokus sama 10 cm dan terpisah 15 cm satu sama lain. Tentukan letak bayangan akhir jika benda terletak 15 cm dari lensa pertama dan 30 cm dari lensa lainnya.
  9. Sebuah benda terletak 15,0 cm di depan lensa cembung yang memiliki jarak fokus 15,0 cm. Sebuah lensa cekung memiliki jarak fokus 15,0 cm ditempatkan di belakang lensa pertama sejauh 20,0 cm. Di mana letak bayangan akhir benda dan bagaimana sifat bayangannya.
  10. Dua lensa dengan panjang fokus  $f_1 = 5,00$  cm dan  $f_2 = 10,0$  cm terpisah sejauh 5,00 cm. Jika benda tingginya 2,50 cm dan berada 15,0 cm di depan lensa pertama, tentukan (a) posisi dan (b) ukuran bayangan akhir.
  11. Sebuah benda tingginya 2,50 cm berada 15,0 cm di depan lensa yang panjang fokusnya 5,00 cm. Sebuah lensa dengan panjang fokus -12,0 cm diletakkan 2,50 cm di belakang lensa konvergen. Tentukan (a) posisi dan (b) ukuran bayangan akhir.
  12. Sebuah benda berada di depan lensa sejauh 17,5 cm yang memiliki panjang fokus 8,50 cm. Lensa kedua panjang fokusnya -30,0 cm berada 5,00 cm di belakang lensa pertama. (a) tentukan jarak antara benda dan bayangan akhir yang dibentuk oleh lensa kedua. (b) berapa perbesaran total? (c) bayangan akhir nyata atau maya? Bayangan akhir tegak atau terbalik?
  13. Sebuah lensa memiliki indeks refraksi 1,50 dengan ketebalan 2,0 cm, dan radiusnya  $r_1 = +3,0$  cm dan  $r_2 = -5,0$  cm berada di udara dengan

$n = 1,00$ . tentukan masing-masing jarak fokus permukaan lengkungnya?

14. Sebuah lensa memiliki spesifikasi  $r_1 = +1,50$  cm;  $r_2 = +1,50$  cm;  $d = 2,00$  cm;  $n = 1,00$ ;  $n' = 1,60$ ;  $n'' = 1,30$ . Tentukan (a) panjang fokus pertama dan kedua setiap permukaan lengkung, dan (b) panjang fokus pertama dan kedua lensa
15. Sebuah lensa tebal dengan radius  $r_1 = -4,50$  cm dan  $r_2 = -3,60$  cm memiliki ketebalan 3,0 cm dengan indeks refraksi 1,560. Hitunglah (a) panjang fokus dan (b) daya lensa
16. Dua lensa tipis di udara, dengan panjang fokus +8,0 cm dan 10,0 cm, keduanya berjarak 3,0 cm. Untuk kombinasi lensa ini, tentukan (a) panjang fokus, dan (b) daya lensa.

## 4.5 Lampiran Percobaan Permukaan Lengkung dan Lensa

### 4.5.1 Hukum-hukum Lensa

#### Tujuan

1. Menghitung panjang fokus lensa cembung yang tidak diketahui dengan mengukur jarak bayangan dan jarak benda (menggunakan metode persamaan lensa tipis)
2. Menghitung panjang fokus lensa cembung menggunakan metode Bessel

#### Prinsip dan Tugas

Panjang fokus lensa yang tidak diketahui dapat dihitung dengan mengukur jarak bayangan dan jarak benda dan dengan metode Bessel.

#### Teori

Panjang fokus sebuah lensa dapat ditentukan dengan beberapa cara. Beberapa diantaranya sedikit sulit untuk menggunakan cara lain dan lebih akurat. Berikut dua acara yang akan dilakukan.

#### Persamaan Lensa Tipis

Hubungan antara panjang fokus  $f$  lensa, jarak benda  $p$ , dan jarak bayangan  $q$  diperoleh dari optic geometri. Tiga sinar pembentuk bayangan, sinar melalui titik fokus, sinar paralel, dan sinar ke pusat lensa.

Persamaan lensa tipis yang digunakan adalah

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

#### Metode Bessel

Metode Bessel adalah metode dengan menetapkan jarak benda dan bayangan yang konstan. Namun syarat yang harus dipenuhi untuk mendapat hasil yang baik adalah jarak keduanya tidak boleh lebih kecil dari 4 kali panjang fokus lensa yang digunakan. Ciri jarak benda-layar lebih besar 4 kali panjang fokus lensa yang digunakan adalah terbentuknya bayangan yang jelas pada layar. Jika jarak benda dan bayangan adalah  $L$  bernilai tetap, maka posisi 1 lensa menempatkan jarak benda-lensa sebagai  $p_1$  serta jarak bayangan-lensa sebagai  $q_1$ . Jika lensa digerakkan

dan diperoleh posisi 2, maka jarak benda-lensa sebagai  $p_2$  serta jarak bayangan-lensa sebagai  $q_2$ . Jika jarak posisi 1 dan posisi 2 lensa sebesar  $d$ , maka persamaan yang memenuhi adalah

$$f = \frac{L^2 - d^2}{4L}$$

### Peralatan yang Diperlukan

Lensa-lensa,  
 Sumber cahaya,  
 Benda transparan gambar anak panah,  
 Layar  
 Landasan optik

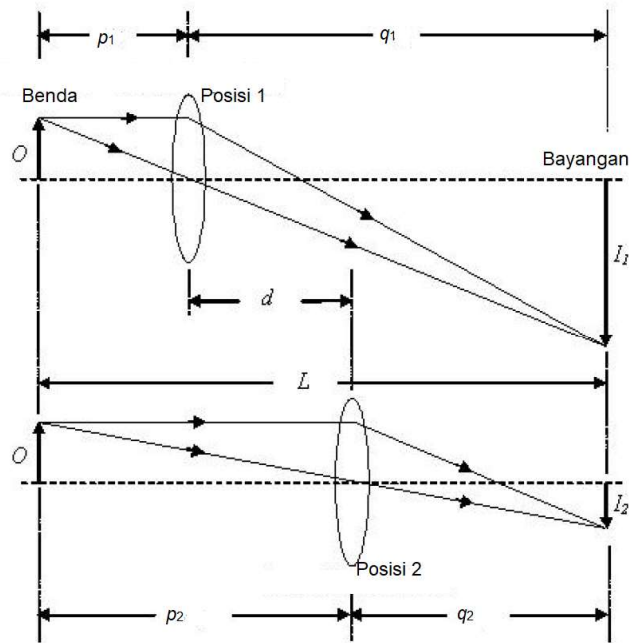
### Prosedur

#### (a) Metode persamaan lensa tipis

1. Susunlah alat sesuai kebutuhan percobaan.
2. Letakkan benda di depan lensa pada jarak tertentu (jarak benda dan lensa jangan terlalu dekat) dan ukurlah jarak tersebut sebagai  $p$ .
3. Carilah bayangan di belakang lensa dengan cara menggerak-gerakkan layar menjauhi atau mendekati lensa hingga terbentuk bayangan yang jelas dan ukurlah jarak tersebut sebagai  $q$ .
4. Ulangi langkah 2 dan 3 dengan jarak benda-lensa yang bervariasi.
5. Carilah panjang fokus lensa.

#### (b) Metode Bessel

1. Aturlah jarak antara benda dan layar,  $L$ , buatlah dengan perkiraan lebih besar 4 kali jarak panjang fokusnya seperti Gambar 4.18.
2. Aturlah posisi lensa agar terbentuk bayangan di layar dan catat sebagai  $p_1$  dan  $q_1$ .
3. Carilah posisi lain lensa agar terbentuk kembali bayangan di layar dan catat sebagai  $p_2$  dan  $q_2$ .
4. Ulangi langkah 1 – 3 dengan jarak  $L$  yang bervariasi.
5. Carilah panjang fokus lensa.



Gambar 4.18

## BAB 5 ALAT-ALAT OPTIKA



Teleskop Keplerian yang tersusun dari dua lensa cembung

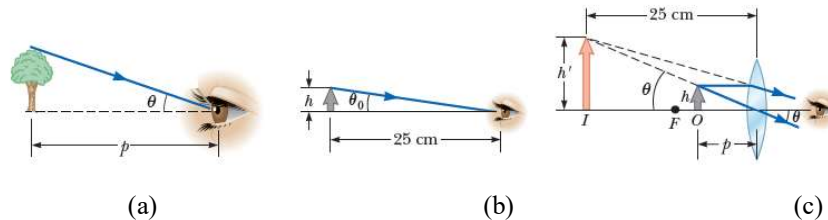
### 5.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah

Setelah mengikuti perkuliahan ini, mahasiswa diharapkan dapat menguasai konten Lup, Mata, Kamera, Mikroskop, Teleskop, dan Percobaan Alat-Alat Optika.

### 5.2 Topik Pembelajaran

#### 5.2.1 Lup

Lup digunakan untuk melihat bayangan benda kecil menjadi lebih besar. Lup terbuat dari lensa cembung.



Gambar 5.1 (a) sebuah objek yang dilihat langsung oleh mata pada jarak  $p$ , (b) sebuah benda diletakkan pada titik dekat mata, (c) sebuah benda diletakkan lebih kecil dari titik fokus lensa cembung dan membentuk bayangan pada jarak 25 cm.

Perbesaran bayangan yang dihasilkan oleh lup merupakan rasio sudut penglihatan melalui lensa dengan sudut melihat langsung benda. Perbesaran ini disebut perbesaran angular ( $M$ ).

Sudut bayangan dalam retina melihat langsung benda adalah  $\theta_o = h/25$  dan sudut penglihatan melalui lensa adalah  $\theta = h'/25 = h/p$ .

Yang terlihat di dalam lup adalah bayangan jadi  $q = -25$  cm, maka

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{p} + \frac{1}{-25 \text{ cm}} = \frac{1}{p} - \frac{1}{25 \text{ cm}} \rightarrow \frac{1}{p} = \frac{1}{f} + \frac{1}{25 \text{ cm}} = \frac{25+f}{25f}$$

Perbesaran angularnya

$$M = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{h/p}{h/25} = \frac{25}{p} = 25 \left( \frac{25+f}{25f} \right) = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

Perbesaran ini disebut perbesaran maksimum karena dilihat lebih dekat dari titik fokus, maka ditulis

$$M_{\text{maks}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (5.1)$$

Walaupun mata dapat melihat pada jarak lebih dekat dari titik fokus namun mata dapat melihat bayangan jarak tak berhingga yakni benda diletakkan pada titik fokus  $f$ . Maka perbesarannya adalah

$$M = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{h/f}{h/25} = \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

$$M = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (5.2)$$

### Contoh 5.1

Berapakah perbesaran maksimum pada lensa yang jarak fokusnya 10 cm, dan perbesaran jika dilihat secara rileks?

#### Solusi

Data:  $f = 10$  cm

$M_{\text{maks}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 3,5$  perbesaran sudut dengan akomodasi maksimum.

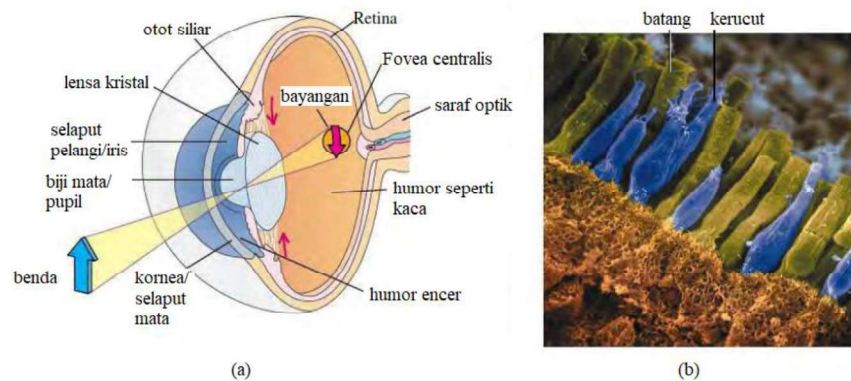
$M = \frac{25 \text{ cm}}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 2,5$  perbesaran dengan mata rileks.

## 5.2.2 Mata

### Anatomi mata

Bentuk mata hampir menyerupai bentuk bola dengan diameter sekitar 2,5 cm. Bagian-bagian mata adalah:

- Kornea (indeks bias 1,3771), berupa selaput tipis yang kuat, tembus pandang, dan berfungsi sebagai pelindung mata dari gangguan luar.
- Aqueous humor (indeks bias 1,3374), yaitu cairan pengisi antara kornea dan lensa mata. Aqueous humor berfungsi memberi bentuk dan kekakuan pada mata.



Gambar 5.2 (a) anatomi mata, (b) batang dan kerucut dalam fovea (Sumber: Young, 2012)

- Lensa kristalin atau lensa mata (indeks bias 1,4200), yaitu berupa bahan bening, berserat, dan kenyal yang berbentuk cembung. Lensa mata berfungsi untuk membiaskan cahaya sehingga menghasilkan bayangan yang tajam dan jatuh tepat di retina. Bentuk lensa mata dapat menebal atau memipih, tergantung jarak benda yang diamati.
- Iris atau selaput pelangi, yaitu lapisan tipis di depan lensa mata. Iris berfungsi mengatur besar-kecilnya celah pupil. Iris juga berfungsi memberi warna pada mata.
- Pupil, yaitu celah lingkaran yang dibentuk iris dan tempat masuk cahaya ke retina melewati lensa.



- Vitreous humor (indeks bias 1,3360), yaitu cairan bening pengisi bola mata yang terletak di antara lensa mata dan retina. Vitreous humour berfungsi yang sama dengan aqueous humour, yaitu memberi bentuk dan kekakuan pada mata.
- Retina atau selaput jala, yaitu bagian belakang dinding dalam bola mata yang berisi dua jenis sel yang sensitif terhadap cahaya dan berfungsi sebagai layar penerima cahaya.
- fovea centralis, yakni tempat terjadinya penglihatan paling tajam di retina berdiameter sekitar 0,25mm.
- Saraf optik, yaitu saraf yang meneruskan sinyal optik ke otak untuk diproses sebagai sinyal penglihatan.

Dua jenis sel sensitif di retina, yakni batang (*rod*) dan kerucut (*cone*). Batang lebih sensitif pada cahaya dari pada kerucut, jumlahnya sekitar  $1,3 \times 10^8$  batang dan kerucut lebih sensitif akan perubahan warna daripada batang dan jumlahnya sekitar  $7 \times 10^6$  kerucut. Berdasarkan kepekaan yang dimiliki maka batang lebih banyak berfungsi di malam hari dan dikatakan sebagai penglihatan malam sedangkan kerucut lebih banyak berfungsi di siang hari sehingga dikatakan penglihatan siang.

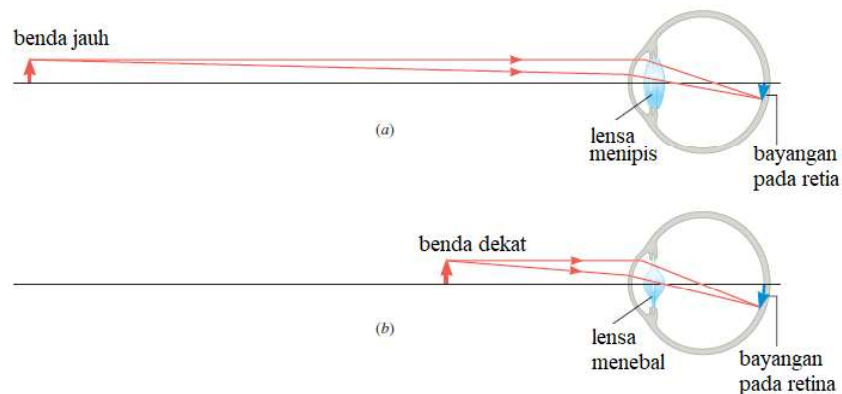
Menyesuaikan berbagai jarak benda yang dilihat agar menghasilkan bayangan tajam pada retina dilakukan oleh otot siliar. Otot ini menjepit lensa mata yang mengakibatkan lensa mata dapat mengembung atau memipih untuk mengubah jarak fokusnya. Adanya kemampuan lensa mata dapat mengembung dan memipih bertujuan untuk menyesuaikan jarak fokus lensa mata  $f$  agar jarak bayangan tetap. Proses ini dinamakan *penyesuaian* atau *akomodasi*.

### **Penglihatan normal**

Mata normal adalah mata yang dapat melihat benda dalam jarak dekat maupun jauh. Bayangan benda dekat atau benda jauh tepat dibentuk di retina.

Orang yang tidak mampu melihat benda jauh dengan jelas karena terbatasnya titik jauh (titik jauh matanya kurang dari  $\infty$ ) yang dimiliki, mata orang tersebut dikatakan miopia (berpenglihatan dekat). Bayangan benda

jauh yang jaraknya melebihi titik jauhnya berada di depan retina disebabkan kornea matanya terlalu cembung. Adapun orang yang tidak dapat melihat benda dekat dengan jelas karena terbatasnya titik dekat (titik dekat matanya berada lebih 25 cm) yang dimiliki, mata orang tersebut dikatakan hiperopia (berpenglihatan jauh). Bayangan dari benda yang lebih dekat dari titik dekatnya berada di belakang retina disebabkan kornea matanya kurang cembung. Adapun mata yang tidak mampu melihat benda dengan jelas pada jarak dekat (berada di 25 cm) maupun jarak jauh (berada di  $\infty$ ) dikenal sebagai presbiopia (mata tua). Keadaan ini disebabkan kemampuan kornea matanya untuk berakomodasi sudah berkurang seiring bertambah tuanya seseorang.



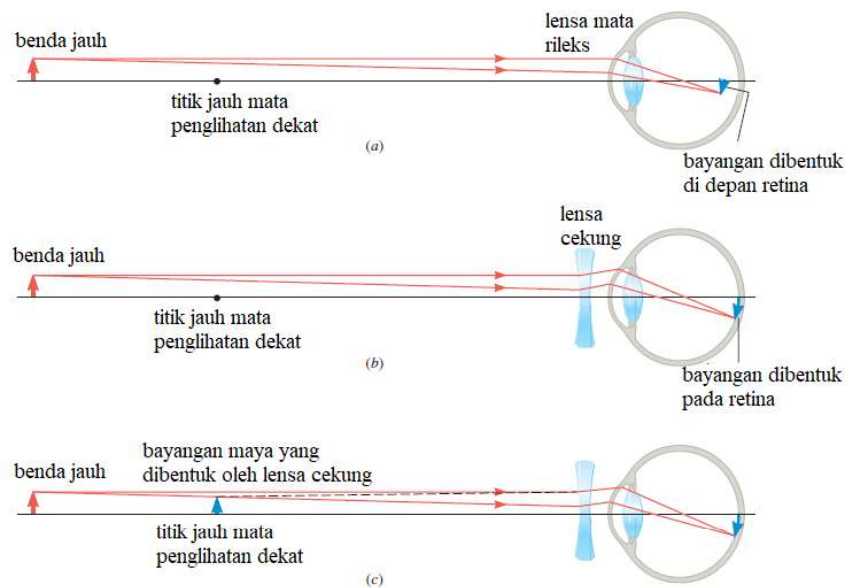
Gambar 5.3 Mata normal membentuk bayangan nyata di retina untuk benda (a) jauh dan (b) dekat.

### Penglihatan dekat (miopia)

Mata miopia merupakan cacat mata yang hanya mampu melihat benda dekat dengan tajam. Untuk benda yang cukup jauh bayangannya jatuh di depan retina. Cacat miopia diakibatkan karena lensa mata menebal. Untuk membantu agar bayangan benda jatuh tepat di retina, maka orang tersebut harus ditolong dengan menggunakan kacamata berlensa cekung. Setelah menggunakan kacamata berlensa cekung benda jauh yang dilihat oleh mata miopia akan terlihat bayangannya di titik terjauh matanya.

### Penglihatan jauh (hiperopia)

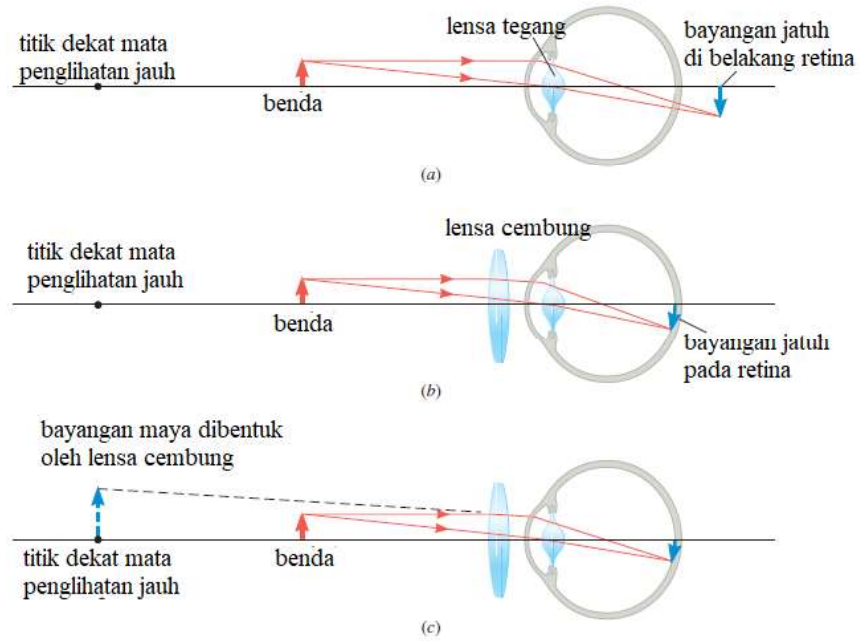
Mata hiperopia merupakan cacat mata yang hanya mampu melihat benda jauh dengan tajam. Untuk benda yang cukup dekat bayangannya jatuh di belakang retina. Cacat hiperopia diakibatkan karena lensa mata memipih. Untuk membantu agar bayangan benda jatuh tepat di retina, maka orang tersebut harus ditolong dengan menggunakan kacamata berlensa cembung. Setelah menggunakan kacamata berlensa cembung benda dekat yang dilihat oleh mata hiperopia akan terlihat bayangannya di titik terdekat matanya.



Gambar 5.4 (a) ketika benda jauh dilihat oleh mata berpenglihatan dekat, maka bayangannya jatuh di depan retina, (b) bayangan jatuh pada retina jika mata dibantu dengan lensa cembung, (c) bayangan maya terlihat pada jarak terjauh penglihatan dekat.

Posisi benda terjauh yang masih dapat dilihat dengan jelas disebut titik jauh dan posisi benda terdekat yang dapat dilihat dengan jelas disebut titik dekat. Jarak ini biasanya meningkat dengan bertambahnya usia seseorang yang memiliki nilai rata-rata 25 cm. Pada usia 10 tahun, titik dekat mata biasanya sekitar 18 cm. Jarak ini meningkat menjadi sekitar 25

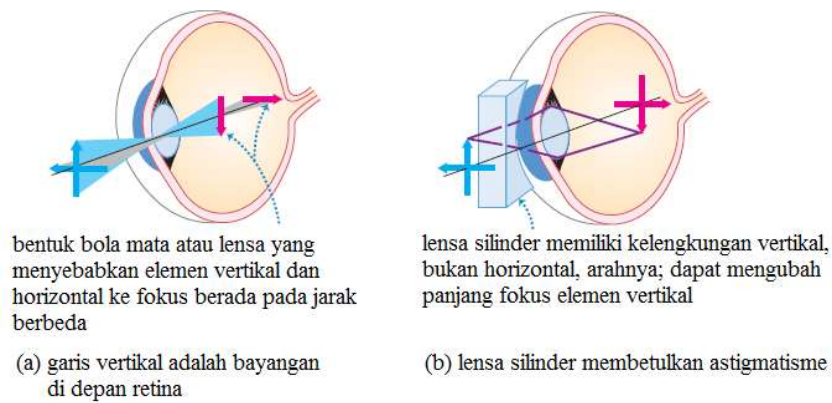
cm pada usia 20 tahun, 50 cm pada usia 40 tahun, dan 500 cm atau lebih pada usia 60 tahun.



Gambar 5.5 (a) ketika benda dekat dilihat oleh mata berpenglihatan jauh, maka bayangannya jatuh di belakang retina, (b) bayangan jatuh pada retina jika mata dibantu dengan lensa cembung, (c) bayangan maya terlihat pada jarak terdekat penglihatan jauh.

### Astigmatism

Astigmatism adalah kesalahan bias, merupakan masalah bagaimana mata memfokuskan cahaya. Bagi mata astigmatism, cahaya yang datang tidak ke titik fokus tunggal pada retina untuk menghasilkan penglihatan jelas. Sebaliknya, titik fokus terjadi di depan atau di belakang retina (atau keduanya). Penyebab astigmatism adalah bola mata yang korneanya tidak teratur seperti bola bisbol, dalam beberapa kasus disebabkan oleh lensa matanya. Bola mata yang korneanya teratur disebut stigmatism. Astigmatism yang disebabkan oleh kornea disebut astigmatism kornea, sedangkan yang disebabkan oleh lensa disebut atigmatisme lenticular. Ada tiga jenis astigmatism; (a) astigmatism miopia, (b) astigmatism hiperopia, dan (c) astigmatism presbiopia.



Gambar 5.6 Jenis astigmatisme miopia dan cara membetulkannya.

Ukuran fokus lensa kacamata yang untuk mata miopia dan

$$\text{hiperopia dirumuskan } \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}; \quad (5.3)$$

dan ukuran daya kacamata adalah

$$P = \frac{1}{f(m)}, \quad (5.4)$$

$P$  = daya kacamata (satuan dioptri),  $f$  = fokus lensa kacamata,  $p$  = jarak benda,  $q$  = jarak bayangan benda (jarak penglihatan tanpa kacamata) bertanda minus.

Dalam bentuk sederhana persamaan lain untuk cacat mata miopia dan hiperopia adalah:

$$P_{\text{mata}} + P_{\text{kacamata}} = P_{\text{penglihatan}} \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{f_{\text{mata}(m)}} + \frac{1}{f_{\text{lensa}(m)}} = \frac{1}{f_{\text{tujuan}(m)}} \quad (5.6)$$

Keterangan:

$P$  = daya (dioptri)

$f_{\text{mata}}$  = jarak penglihatan mata (m)

$f_{\text{kacamata}}$  = jarak fokus lensa kacamata (m)

$f_{\text{tujuan}}$  = jarak penglihatan yang diinginkan (m)

**Contoh 5.2**

Titik dekat mata seseorang adalah 60,0 cm. Untuk melihat benda dengan jelas pada jarak 25 cm, berapa (a) panjang fokus dan (b) daya lensa kacamata? (sangat dekat jarak lensa dengan mata)

**Solusi**

Data:  $f_{\text{mata}} = 60,0 \text{ cm}$ ;  $f_{\text{tujuan}} = 25 \text{ cm}$ ;  $f_{\text{lensa}} = \dots?$   $P_{\text{lensa}} = \dots?$

$$\frac{1}{f_{\text{mata(m)}}} + \frac{1}{f_{\text{lensa(m)}}} = \frac{1}{f_{\text{tujuan(m)}}} \rightarrow \frac{1}{0,600 \text{ m}} + \frac{1}{f_{\text{lensa(m)}}} = \frac{1}{0,25 \text{ m}} \rightarrow f_{\text{lensa}} = 0,429 \text{ m}$$

$$P_{\text{lensa}} = \frac{1}{f_{\text{lensa(m)}}} = \frac{1}{0,429 \text{ m}} = 2,33 \text{ diopiter}$$

Jika menggunakan persamaan (8.3)

Data:  $q = -60,0 \text{ cm}$ ;  $p = 25 \text{ cm}$ ; (a)  $f = \dots?$ ; (b)  $P = \dots?$

$$(a) \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{25 \text{ cm}} + \frac{1}{-60,0 \text{ cm}} \rightarrow f = 42,9 \text{ cm}$$

$$(b) P = \frac{1}{f(\text{m})} = \frac{1}{0,429} = 2,33 \text{ diopiter}$$

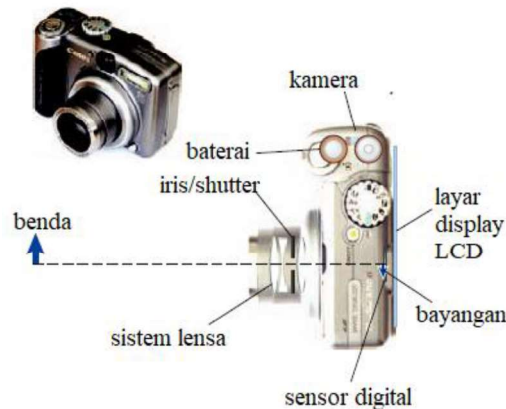
**5.2.3 Kamera**

Kamera merupakan peralatan optik yang paling lazim. Kamera adalah kata latin yang berarti sebuah kamar atau ruangan tertutup. Kamera menghasilkan bayangan dari benda dan merekam benda itu pada film. Elemen dasar dari kamera adalah sebuah lensa konvergen. Jumlah cahaya yang menumbuk film dikontrol oleh laju penutup (*shutter*) dan celah lensa (*lens aperture*).

Intensitas cahaya yang mencapai film sebanding dengan luas yang dipandang oleh lensa kamera dan sebanding dengan luas efektif dari lensa itu. Ukuran luas yang "dilihat" oleh lensa itu sebanding dengan  $1/f^2$ . Luas efektif lensa itu dikontrol dengan bantuan sebuah celah lensa yang dapat diatur, atau diafragma, yakni sebuah lubang yang hampir berbentuk lingkaran dengan diameter  $D$  yang berubah-ubah; maka luas efektif itu sebanding dengan  $D^2$ .

Dengan memasukkan faktor-faktor ini secara bersamaan, kita melihat bahwa intensitas cahaya yang mencapai film dengan lensa tertentu sebanding dengan  $D^2/f^2$ . Kemampuan mengumpulkan cahaya

dari sebuah lensa biasanya dinyatakan oleh fotografer dalam rasio  $f/D$ , yang dinamakan bilangan- $f$  (f-number) dari lensa itu.



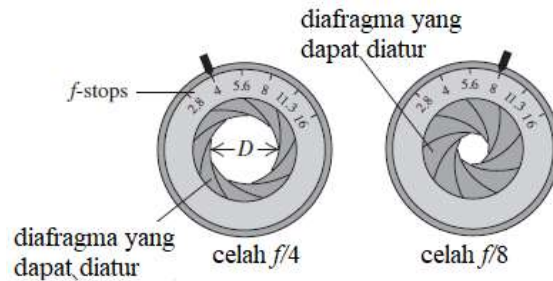
Gambar 5.7 Sebuah kamera digital yang menghasilkan bayangan pada sensor digital (Sumber: Bauer, 2011)

$$\text{bilangan-}f = \frac{\text{panjang fokus}}{\text{diameter celah}} = \frac{f}{D} \quad (5.7)$$

Misalnya, sebuah lensa dengan panjang fokus  $f = 50$  mm dan diameter celah  $D = 25$  mm dikatakan mempunyai bilangan- $f$  sebesar 2, atau "sebuah celah sebesar  $f/2$ ". Intensitas cahaya yang mencapai film itu berbanding terbalik dengan kuadrat dari bilangan- $f$ .

Untuk sebuah lensa dengan celah yang diameternya berubah-ubah, penambahan diameter oleh sebuah faktor sebesar  $\sqrt{2}$  akan mengubah bilangan- $f$  sebesar  $1/\sqrt{2}$  dan menambah intensitas di film itu oleh sebuah faktor sebesar 2. Celah yang dapat diatur biasanya mempunyai skala yang ditandai dengan bilangan-bilangan yang berturutan [seringkali dinamakan perhentian- $f$  ( $f$ -stop)] yang dikaitkan dengan faktor sebesar  $\sqrt{2}$ . seperti  $f/2$ ;  $f/2,8$ ;  $f/4$ ;  $f/5,6$ ;  $f/8$ ;  $f/11$ ;  $f/16$  dan seterusnya. Bilangan yang lebih besar menyatakan celah dan bukaan (*exposure*) yang lebih kecil, dan setiap langkah bersesuaian dengan sebuah faktor dua dalam intensitasnya Gambar 20.2. Bukan sesungguhnya (jumlah total cahaya yang mencapai film itu) sebanding dengan luas celah dan waktu bukaan. Jadi  $f/4$  dan  $1/500$

s,  $f/5,6$  dan  $1/250$  s, dan  $f/8$  dan  $1/125$  s, semuanya menyatakan bukaan yang sama.



Gambar 5.8 Dalam kamera bilangan- $f$  besar memiliki diameter celah yang kecil.

### Contoh 5.3

Lensa kamera digital memiliki panjang fokus 55 mm dan lajunya  $f/1,8$ . Waktu bukaan untuk laju ini diketahui  $1/500$  s. Hitung (a) diameter lensa, (b) waktu bukaan jika  $f/4$  dalam kondisi cahaya yang sama.

### Solusi

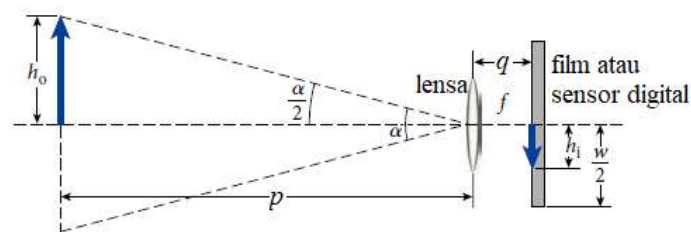
Data:  $f = 55$  mm;  $f/1,8$ ;  $f/4$ ;

$$(a) D = \dots? \text{ persamaan bilangan } - f = \frac{f}{D} \Rightarrow 1,8 = \frac{55 \text{ mm}}{D} \Rightarrow D = 31 \text{ mm}$$

$$(b) \Delta t_2 = \dots? \text{ persamaan } I_1 \Delta t_1 = I_2 \Delta t_2 \Rightarrow \frac{\Delta t_1}{(\text{bilangan } - f)_1^2} = \frac{\Delta t_2}{(\text{bilangan } - f)_2^2}$$

$$\Rightarrow \frac{1/500 \text{ s}}{(1,8)^2} = \frac{\Delta t_2}{(4)^2} \Rightarrow \Delta t_2 \approx \frac{1}{100} \text{ s}$$

Untuk kamera digital



Gambar 5.9 Gambar skema sebuah kamera pada sudut pandang.



Berdasarkan Gambar 5.9 perbesaran bayangan adalah

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p} \quad (5.8)$$

Dengan  $h_i$  tinggi bayangan,  $h_o$  tinggi benda,  $q$  jarak bayangan, dan  $p$  jarak benda. Lebar sensor adalah  $w$ , lebar yang ditunjukkan benda adalah  $\alpha/2$  dari sudut pandang  $\alpha$ . tinggi bayangan pada sensor adalah  $h_i = w/2$ . Berdasarkan definisi perbesaran diperoleh

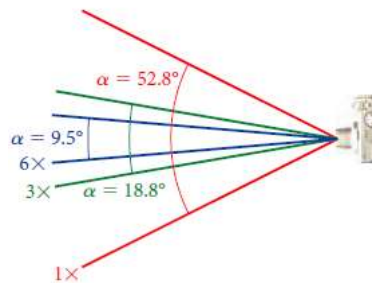
$$\frac{w/2}{h_o} = \frac{q}{p} \approx \frac{f}{p} \Rightarrow \frac{h_o}{p} = \frac{w}{2f} \quad (5.9)$$

Sudut pandang benda

$$\frac{h_o}{p} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5.10)$$

Kombinasinya

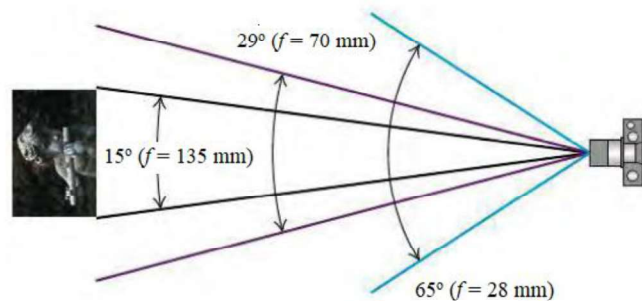
$$\frac{h_o}{p} = \frac{w}{2f} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \Rightarrow \alpha = 2 \tan^{-1}\left(\frac{w}{2f}\right) \quad (5.11)$$



Gambar 5.10 Sudut pandang horizontal untuk kamera digital kecil dengan zoom 1x, 3x, dan 6x.



Gambar 5.11 Efek dari penggunaan lensa-lensa yang berbeda panjang fokusnya. Tiga gambar yang berbeda diambil dari posisi yang sama dengan panjang fokus  $f = 28$  mm,  $f = 70$  mm, dan  $f = 135$  mm.



Gambar 5.12 Penambahan panjang fokus akan menambah ukuran bayangan. Film berukuran 35 mm (luas bayangan 24 mm x 36 mm)

**Catatan:**

Jika jarak benda,  $p$ , dan jarak bayangan,  $q$ , diperlukan dalam kamera maka persamaan kamera masih berlaku untuk

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (5.12)$$

dengan  $f$  = jarak fokus lensa kamera.

**Contoh 5.4**

Sebuah kamera menggunakan film ukuran 35-mm (36 mm lebar dan 24 mm tinggi). Jika Anda juga menggunakan kamera versi lain dengan ukuran gambar 4,0 mm lebar dan tinggi 3,0 mm. Berapa panjang fokus lensa untuk kamera jika kamera ini memiliki sudut pandang  $\alpha = 46^\circ$ .

**Solusi**

Data:  $\alpha = 46^\circ$ ;  $f = \dots?$

$$\text{Saat horizontal } \alpha = 2 \tan^{-1} \left( \frac{w}{2f} \right) \Rightarrow f = \frac{w}{2 \tan(\alpha/2)}$$

Panjang fokus lensa untuk film 35 mm adalah

$$f = \frac{w}{2 \tan(\alpha/2)} = \frac{36 \text{ mm}}{2 \tan(46^\circ/2)} = 42 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang fokus kamera versi lain } f = \frac{4,0 \text{ mm}}{2 \tan(46^\circ/2)} = 4,7 \text{ mm}$$

### 5.2.4 Mikroskop

Mikroskop; alat yang digunakan untuk melihat benda-benda ukuran kecil. Jika lup menggunakan sebuah lensa cembung maka mikroskop menggunakan dua buah lensa cembung. Lensa yang berada dekat benda dikatakan lensa objektif dan lensa yang berada dekat mata dikatakan lensa okuler. Perbesaran bayangan benda pada mikroskop diperoleh dari perbesaran lensa objektif ( $m_o$ ) dan perbesaran lensa okuler ( $M_e$ ).

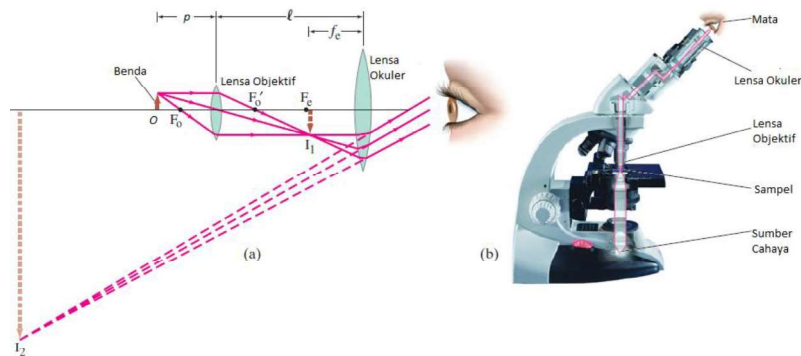
Perbesaran lensa objektif adalah

$$m_o = -\frac{q}{p} = -\frac{l-f_e}{p}, \quad (5.13)$$

dan Perbesaran okuler

$$M_e = \frac{N}{f_e} \text{ untuk mata rileks} \quad (5.14)$$

$$M_e = \frac{N}{f_e} + 1 \text{ untuk mata berakomodasi} \quad (5.15)$$



Gambar 5.13 Susunan mikroskop (a) diagram sinar, (b) fotografi mikroskop, garis merah menunjukkan rambatan sinar dari sumber cahaya melewati sampel, lensa objektif, dan lensa okuler menuju mata.

Perbesaran mikroskop secara total adalah

$$M = M_e m_o = -\frac{N}{f_e} \frac{(l-f_e)}{p} \approx -\frac{N}{f_e} \frac{(l-f_e)}{f_o} \quad \text{atau} \quad (5.16)$$

$$M = M_e m_o = -\left(\frac{N}{f_e} + 1\right) \left(\frac{l-f_e}{p}\right) \approx -\left(\frac{N}{f_e} + 1\right) \left(\frac{l-f_e}{f_o}\right) \quad (5.17)$$

Keterangan:

$m_o$  = perbesaran lateral lensa objektif;  $M_e$  = perbesaran lensa okuler;  $M$  = perbesaran mikroskop;  $N$  = jarak baca normal pengamat;  $f_o$  = jarak fokus lensa objektif;  $f_e$  = jarak fokus lensa okuler;  $l$  = jarak lensa objektif dengan lensa okuler;  $p$  = jarak benda dari lensa objektif;  $q$  = jarak bayangan dari lensa objektif

### Contoh 5.5

Panjang fokus lensa objektif mikroskop  $f_o = 0,40$  cm, dan panjang fokus okulernya  $f_e = 3,0$  cm. Jarak kedua lensa  $L = 20,0$  cm. Seorang dengan mata normal  $N = 25$  cm menggunakan mikroskop. (a) Perbesaran angular mikroskop. (b) Bandingkan perbesaran angular maksimum jika lensa okuler dijadikan sebagai lup? (c) dimanakah benda harus diletakkan agar bayangan akhir terletak di titik jauh takberhingga

### Solusi

Data:  $f_o = 0,40$  cm;  $f_e = 3,0$  cm;  $L = 20,0$  cm;  $N = 25$  cm;

$$(a) M \approx -\frac{(l-f_e) N}{f_o f_e} = -\frac{(20,0 \text{ cm}-3,0 \text{ cm}) 25 \text{ cm}}{0,40 \text{ m} \cdot 3,0 \text{ cm}} = -350$$

$$(b) M = \frac{N}{f_e} + 1 = \frac{25 \text{ cm}}{3,0 \text{ cm}} + 1 = 9,3$$

Perbandingan perbesaran antara keduanya adalah  $\frac{350}{9,3} = 38$  kali

(c) Agar bayangan akhir jatuh di takberhingga, maka bayangan dari lensa objektif berada di titik fokus lensa okuler, yakni  $q = L - f_e = 20,0 \text{ cm} - 3,0 \text{ cm} = 17 \text{ cm}$ , jarak bendanya dari lensa objektif adalah  $\frac{1}{f_o} = \frac{1}{p_o} + \frac{1}{q}$

$$\frac{1}{q} \rightarrow \frac{1}{0,40 \text{ cm}} = \frac{1}{p_o} + \frac{1}{17 \text{ cm}} \rightarrow p_o = 0,41 \text{ cm}$$

### Contoh 5.6

Sebuah mikroskop pada lensa okulernya tertulis perbesaran 10x dan pada lensa objektif tertulis 50 x dan keduanya terpisah 17,0 cm. (a) Hitunglah perbesaran maksimum mikroskop, (b) panjang fokus setiap lensa, dan (c) posisi benda jika bayangan akhir dilihat secara rileks? Asumsikan dilihat dengan mata normal  $N = 25$  cm

### Solusi

Data:  $M_e = 10x$ ;  $M_o = 50x$ ;  $L = 17,0$  cm;  $N = 25$  cm

(a)  $M_t = \dots? M_t = M_o M_e = (50)(10) = 500$  kali

(b)  $f_e = \dots? M = \frac{N}{f_e} \rightarrow 10 = \frac{25 \text{ cm}}{f_e} \rightarrow f_e = 2,5 \text{ cm}$

$$M_o = -\frac{q_o}{p_o} \rightarrow 50 = -\frac{(17,0 \text{ cm} - 2,5 \text{ cm})}{p_o} \rightarrow p_o = 0,29 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_o} = \frac{1}{p_o} + \frac{1}{q_o} \rightarrow \frac{1}{f_o} = \frac{1}{0,29 \text{ cm}} + \frac{1}{17,0 \text{ cm}} \rightarrow f_o = 0,28 \text{ cm}$$

(c)  $p_o = \dots?$  telah diperoleh di atas sebesar  $p_o = 0,29 \text{ cm}$

### 5.2.5 Teleskop

Ada dua jenis teleskop, keduanya didesain untuk membantu mengamati benda jarak jauh seperti planet dalam sistem tata surya, yakni: (1) teleskop refrakting, yang mana menggunakan kombinasi lensa untuk membentuk bayangan, dan (2) teleskop reflektif, yang mana menggunakan cermin cekung dan lensa untuk membentuk bayangan.

Pada teleskop refraksi, dua lensa yang tersusun, lensa objektif  $f_o$  membentuk bayangan nyata  $I_1$  dan terbalik yang sangat dekat atau pada titik fokus lensa okuler  $f_e$ . Jarak kedua lensa atau panjang teleskop adalah  $f_e + f_o$ , bayangan akhir yang terbentuk  $I_2$  berasal dari bayangan  $I_1$ .

Perbesaran angular yang dihasilkan teleskop diperoleh  $\theta/\theta_o$ , yang mana  $\theta_o$  adalah sudut objek pada lensa objektif dan  $\theta$  adalah sudut bayangan akhir. Berdasarkan Gambar 5.14 diperoleh:

$$\tan \theta_o \approx \theta_o \approx -\frac{h'}{f_o} \quad (5.18)$$

$$\tan \theta \approx \theta \approx \frac{h'}{f_e} \quad (5.19)$$

$$M = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{-h'/f_e}{h'/f_o} = -\frac{f_o}{f_e} \quad (5.20)$$

Panjang teleskop  $L$  adalah

$$L = f_e + f_o \quad (5.21)$$

#### Contoh 5.7

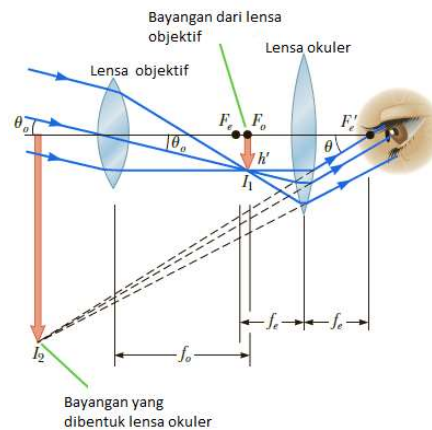
Lensa mata sebuah teleskop refrakting yang merefraksikan sinar mempunyai panjang fokus sebesar 9,00cm. Jarak antara objektif dan lensa mata 1,80 m, dan bayangan akhir berada di takberhingga. Berapakah perbesaran sudut teleskop itu?

#### Solusi

Data:  $f_e = 9,00 \text{ cm}$ ;  $L = 1,80 \text{ m}$ ;  $M = \dots?$

$$L = f_e + f_o \rightarrow 1,80 \text{ m} = 0,0900 \text{ m} + f_o \rightarrow f_o = 1,71 \text{ m}$$

$$M = -\frac{f_o}{f_e} = -\frac{1,71 \text{ m}}{0,0900 \text{ m}} = -19,0 \text{ kali}$$



Gambar 5.14 Diagram teleskop refrakting

### 5.3 Rangkuman

- Lensa pembesar sederhana (lup) yang menghasilkan perbesaran sudut  $M$  yang diberikan oleh  $M = \frac{25 \text{ cm}}{f}$  untuk mata rileks dan

$$M_{\text{maks}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \text{ untuk mata maksimum dengan } f \text{ adalah panjang}$$

fokus lensa.

- Pada mata bayangan dibentuk pada retina dan ditransmisikan ke saraf optik. Penyesuaian jarak benda dilakukan oleh otot siliar sehingga lensa mata dapat menebal atau memipih dalam menyesuaikan panjang fokusnya. Penglihatan miopia disebabkan bayangan jatuh di depan retina dan penglihatan hiperopia disebabkan bayangan jatuh di belakang retina. Mata miopia dapat dibantu dengan kacamata lensa cekung dan mata hiperopia dapat dibantu dengan kacamata lensa cembung.
- Astigmatism disebabkan kornea mata tidak cembung sempurna sehingga bayangan jatuh tidak tunggal dalam retina. Mata astigmatism

dapat dibantu dengan kacamata lensa silinder.

- Sebuah kamera membentuk bayangan nyata terbalik, biasanya diperkecil (pada film) dari benda yang dipotret. Jumlah cahaya yang menumbuk film itu dikontrol oleh laju penutup dan oleh celah.

$$\text{bilangan-}f = \frac{\text{panjang fokus}}{\text{diameter celah}} = \frac{f}{D}$$

- Dalam mikroskop, gabungan lensa objektif membentuk bayangan pertama dalam tabung instrumen itu, dan lensa mata membentuk bayangan maya akhir dari bayangan pertama, seringkali di jarak tak berhingga. Perbesaran mikroskop adalah

$$M = M_e m_o \approx -\frac{N}{f_e} \frac{(l - f_e)}{f_o} \text{ untuk mata rileks}$$

$$M = M_e m_o \approx -\left(\frac{N}{f_e} + 1\right) \left(\frac{l - f_e}{f_o}\right) \text{ untuk mata berakomodasi}$$

- Teleskop beroperasi dengan prinsip yang sama, tetapi bendanya sangat jauh. Dalam sebuah teleskop ada yang bersifar refrakting dan reflektif. Perbesaran teleskop adalah  $M = -\frac{f_o}{f_e}$

#### 5.4 Soal-Soal

1. Sebuah lensa memiliki panjang fokus 5,00 cm digunakan sebagai lup. (a) untuk mendapatkan perbesaran maksimum, dimana benda diletakkan? (b) berapa perbesaran bayangannya?
2. Seseorang dengan titik dekat  $p_n$  25 cm melihat pelindung jari melalui lensa pembesar sederhana yang memiliki panjang fokus 10 cm dengan menempatkan lensa di dekat matanya. Berapa perbesaran sudut pelindung jari jika ia diletakkan sedemikian rupa sehingga bayangannya muncul pada (a)  $P_n$  dan (b) tak hingga?
3. Sebuah lensa tipis yang panjang fokusnya 6,00 cm digunakan sebagai lup. (a) berapakah perbesaran sudut yang dapat diperoleh

dengan lensa itu jika benda berada di titik fokus? (b) bila sebuah benda diperiksa melalui lensa itu, berapa dekatkah benda itu dapat dibawa ke lensa? Anggaplah bahwa bayangan yang dipandang oleh mata di titik dekat 25,0 cm dari mata dan bahwa lensa itu sangat dekat ke mata.

4. Anda ingin memandangi seekor serangga yang panjangnya 2,00 mm melalui sebuah lup. Jika serangga itu harus berada di titik fokus lup itu, berapakah panjang fokus yang akan memberikan bayangan serangga itu ukuran sudut sebesar 0,025 radian?
5. Anda memeriksa seekor kutu dengan sebuah lup yang panjang fokusnya 4,00 cm. Jika bayangan kutu itu adalah 6,50 kali ukuran kutu, berapa jauhkah kutu itu dari lensa? Relatif terhadap lensa, di manakah letaknya bayangan itu?
6. Jarak titik dekat mata seseorang 75 cm. Menggunakan lensa kacamata yang diletakkan dekat mata, titik dekatnya menjadi sistem lensa-mata adalah 25 cm. Bayangan terbentuk di retina jika benda diletakkan 25 cm di depan lensa. (a) Berapa daya lensa kacamata dan (b) Berapa perbesaran lateral yang dibentuk lensa?
7. Dalam sebuah model yang disederhanakan dari mata manusia, humor yang seperti kaca dan lensa semuanya mempunyai indeks refraksi 1,40 dan semua refraksi terjadi pada biji mata, yang memiliki verteks 2,60 cm dari retina. Berapakah seharusnya jari-jari kelengkungan biji mata sehingga bayangan sebuah benda 40,0 cm dari verteks biji mata difokuskan pada retina?
8. Anggap jarak terjauh yang dapat dilihat seseorang tanpa alat bantu adalah 50 cm. (a) Berapa panjang fokus lensa kacamata yang akan digunakan untuk melihat benda terjauh? (b) Lensa apa yang digunakan? (c) daya lensa?
9. Seorang berpenglihatan dekat memiliki titik jauh hanya 521 cm dari mata. Anggaplah bahwa kacamata berada 2 cm di depan mata, tentukan daya dan panjang fokus lensa yang dibutuhkan untuk melihat benda terjauh.



10. Seorang berpenglihatan jauh memiliki titik dekat 210 cm dari mata. Berapa daya dan panjang fokus lensa konvergen yang dibutuhkan agar dapat membaca buku berjarak 25 cm dari mata.
11. Sebuah lensa kamera mempunyai panjang fokus 200 mm. Berapa jauhkah benda itu seharusnya dari lensa untuk foto itu jika lensa itu berada 20,4 cm dari film?
12. Panjang fokus sebuah lensa kamera  $f/4$  adalah 300 mm. (a) Berapakah diameter celah lensa itu? (b) Jika bukaan yang betul dari sebuah pemandangan tertentu adalah  $1/250$  s pada  $f/4$ , berapakah bukaan yang tepat pada  $f/8$ ?
13. Panjang fokus lensa mata dari mikroskop tertentu adalah 18,0 mm. Panjang fokus objektif adalah 8,00 mm. Jarak antara lensa objektif dan lensa mata 19,7 cm. Bayangan akhir yang dibentuk lensa mata itu berada di tak berhingga. Perlakukanlah semua lensa sebagai lensa tipis. (a) Berapakah jarak benda ke lensa objektif diletakkan? (b) Berapakah perbesaran linear yang dihasilkan oleh lensa objektif itu? (c) Berapakah perbesaran sudut keseluruhan dari mikroskop itu?
14. Jarak antara lensa mata dan objektif sebuah mikroskop adalah 23,0 cm. Panjang fokus lensa mata 2,50 cm dan lensa objektif 0,400 cm. Berapakah perbesaran total mikroskop itu?
15. Sebuah teleskop dibangun dari dua lensa dengan panjang fokus sebesar 95,0 cm dan 15,0 cm. Dan lensa yang panjang fokusnya 95,0 cm digunakan sebagai lensa objektif. Benda yang sedang dipandang dan bayangan akhir berada di takberhingga. (a) Cari perbesaran sudut untuk teleskop itu. (b) Carilah tinggi bayangan yang dibentuk oleh objektif dari sebuah gedung yang tingginya 60,0 m, dan jauhnya 3,00 km. (c) Berapakah ukuran sudut dari bayangan akhir seperti yang dipandang oleh sebuah mata yang sangat dekat ke lensa mata itu?

## **5.5 Lampiran: Percobaan Alat-Alat Optika**

### **5.5.1 Percobaan Teleskop**

Dalam percobaan ini akan membandingkan teleskop Galilean dengan satu lensa konvergen dan satu lensa divergen dan teleskop Keplerian dengan dua lensa konvergen.

#### **Pertanyaan**

Apa perbedaan antara teleskop Keplerian dan Galilea?

#### **Variabel**

Bebas: jenis lensa yang digunakan

Terikat: perbesaran gambar

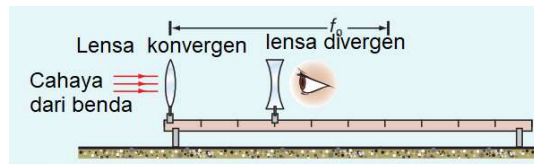
Kontrol: panjang fokus lensa cekung dan lensa cembung

#### **Bahan dan Peralatan**

Lensa konvergen fokus panjang, Lensa konvergen fokus pendek, Lensa divergen fokus pendek, Bangku optik, Lampu, Pemegang lensa, Kertas, penggaris, pensil, dan pita

#### **Prosedur untuk Teleskop Galilea**

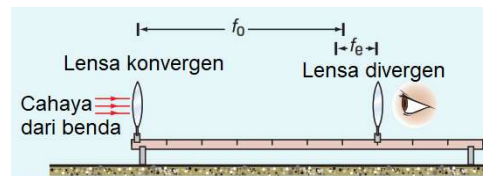
1. Pasang lensa fokus panjang pada pemegang lensa dan letakkan pada salah satu ujung bangku optic.
2. Pasang lensa divergen fokus pendek pada pemegang lensa dan tempatkan di bangku optic pada jarak lebih kecil dari jarak fokus lensa konvergen seperti Gambar 5.15.
3. Gambarkan serangkaian 5 panah vertical berjarak 1 cm di atas selembar kertas. Rekatkan lembaran kertas itu ke dinding yang jauh untuk dapat dilihat melalui teleskop.
4. Lihat gambar panah melalui teleskop dengan satu mata dan bandingkan gambar dengan melihat langsung dengan mata telanjang.
5. Bandingkan perbesaran kedua gambar ini yang melalui teleskop dan melihat langsung tanpa teleskop.



Gambar 5.15

### Prosedur Teleskop Keplerian

6. Lepaskan lensa divergen dari pemegang lensa dan ganti dengan lensa konvergen fokus pendek
7. Posisikan lensa konvergen fokus pendek pada jarak jumlah fokus kedua lensa konvergen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.16
8. Lihat gambar panah melalui teleskop dengan satu mata dan bandingkan gambar dengan melihat langsung dengan mata telanjang.
9. Bandingkan perbesaran kedua gambar ini yang melalui teleskop dan melihat langsung tanpa teleskop.



Gambar 5.16

### Analisis

3. Siakan tabel yang membandingkan perbesaran dan kecerahan di setiap teleskop.
4. Gambarkan sinar-sinar pembentuk bayangan bagaimana gambar itu terbentuk masing-masing teleskop.
5. Apa saran Anda tentang kegunaan masing-masing teleskop untuk mengamati benda-benda dekat dan jauh.

## BAB 6 INTERFERENSI



Fenomena interferensi yang ditunjukkan oleh gelembung sabun

### 6.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah

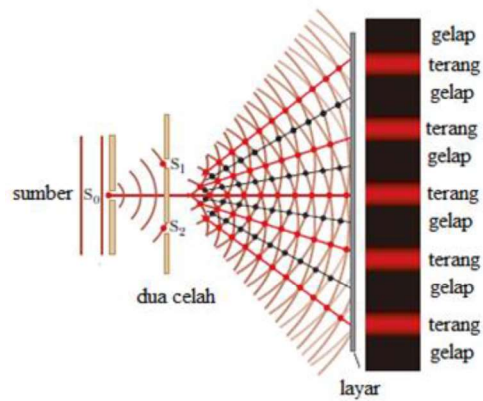
Setelah mengikuti perkuliahan ini, mahasiswa diharapkan dapat menguasai konten Interferensi Cahaya Dua Celah, Intensitas Pola Interferensi, Interferensi Film Tipis, Cincin Newton, dan Percobaan Interferensi.

### 6.2 Topik Pembelajaran

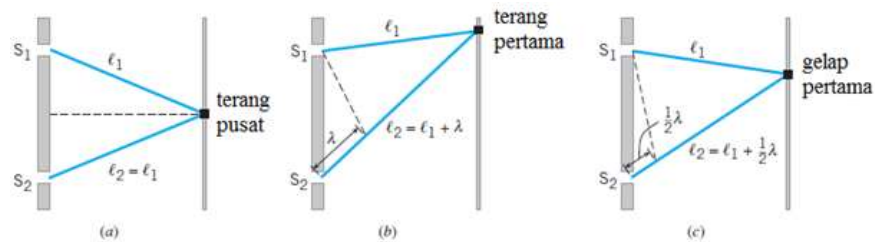
#### 6.2.1 Interferensi Cahaya Dua Celah

Istilah interferensi mengacu pada setiap situasi dimana dua atau lebih gelombang tumpang tindih dalam ruang yang mengalami superposisi. Eksperimen kuantitatif interferensi cahaya dua celah pertama kali dilakukan tahun 1800 oleh ilmuwan Inggris Thomas Young (Young, 2012). Agar diperoleh pola garis terang-gelap yang teratur pada layar, sumber celah  $S_1$  dan  $S_2$  harus memiliki gelombang yang koheren. Untuk mendapatkan gelombang koheren yang keluar pada celah  $S_1$  dan  $S_2$  digunakan satu sumber cahaya  $S_0$  seperti tampak pada Gambar 6.1.

Pada Gambar 6.2 interferensi konstruktif yang terjadi pada terang pusat memiliki lintasan gelombang yang sama dari celah  $S_1$  dan  $S_2$ . Interferensi konstruktif yang terjadi pada terang pertama memiliki selisih lintasan sebesar  $\lambda$ . Adapun interferensi destruktif yang terjadi pada gelap pertama memiliki selisih lintasan sebesar  $\frac{1}{2} \lambda$ .



Gambar 6.1 Skema percobaan interferensi dua celah oleh Young dan pola garis gelap-terang yang terjadi pada layar. Gelombang yang keluar pada celah  $S_1$  dan  $S_2$  bersifat koheren karena berasal dari satu sumber  $S_0$ . (Sumber: Serway, 2012).



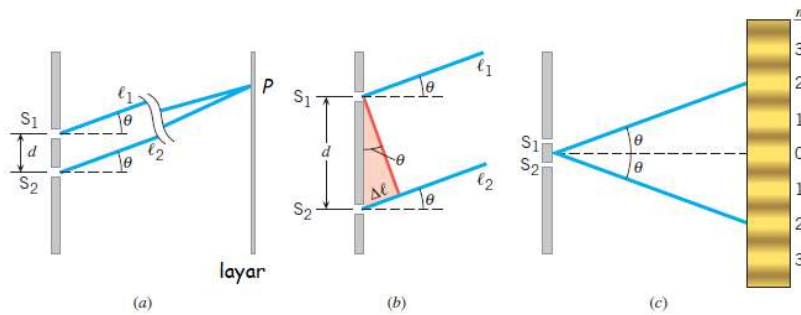
Gambar 6.2 (a) dan (b) Gelombang koheren dari celah  $S_1$  dan  $S_2$  membentuk interferensi konstruktif pada layar, (c) interferensi destruktif pada layar (sumber: Cutnell, 2012).

Posisi garis terang diamati pada layar dalam eksperimen Young seperti pada Gambar 6.3. Jika layar berada jauh dibanding dengan jarak pisah celah  $d$ , lintasan  $l_1$  dan  $l_2$  dalam bagian (a) ini dianggap mendekati paralel. Sudut  $\theta$  pada kedua lintasan  $l_1$  dan  $l_2$  dianggap sama dengan horizontal. Pada bagian (b) selisih  $l_1$  dan  $l_2$  sebesar  $\Delta l$  pada sisi berdekatan dengan  $\Delta l = d \sin \theta$ .

$$(6.1)$$

Interferensi konstruktif terjadi jika perbedaan lintasan sinar oleh bilangan integer  $m$  panjang gelombang  $\lambda$  atau

$$d \sin \theta = m \lambda ; (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ interferensi konstruktif} \quad (6.2)$$



Gambar 6.3 (a) sinar-sinar dari celah  $S_1$  dan  $S_2$  membuat sudut  $\theta$  terhadap horizontal berak lurus ke layar pada titik yang sama. (b) Perbedaan lintasan dua sinar  $\Delta l = d \sin \theta$ . (c) sudut  $\theta$  adalah sudut garis terang kedua ( $m = 2$ ) terhadap sisi terang pusat ( $m = 0$ ) (Sumber: Cutnell, 2012).

Interferensi destruktif yang terjadi pada terang pertama pada Gambar 6.2 memiliki selisih lintasan sebesar  $\frac{1}{2} \lambda$  atau kelipatan  $(m + \frac{1}{2}) \lambda$  sehingga dapat ditulis

$$\Delta l = d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda ; (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (6.3)$$

interferensi destruktif

Berdasarkan Gambar 6.3c layar yang berada jauh dari celah sehingga  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx x/L$  dengan demikian persamaan (6.2) dan (6.3) dapat ditulis

$$\frac{x d}{L} = m \lambda ; (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ interferensi konstruktif} \quad (6.4)$$

Begitu pula untuk

$$\frac{x d}{L} = (m + \frac{1}{2}) \lambda ; (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ interferensi destruktif} \quad (6.5)$$

Dengan  $x$  adalah jarak dari terang pusat ke terang/gelap  $m$  dan  $L$  adalah jarak celah ke layar.

### Contoh 6.1

Cahaya merah ( $\lambda = 664 \text{ nm}$  dalam vakuum) digunakan dalam percobaan Young dengan celah yang dipisahkan sejauh  $d = 1,20 \times 10^{-4} \text{ m}$ . Layar diletakkan sejauh  $L = 2,75 \text{ m}$  dari celah. Tentukan jarak  $x$  pada layar antara pusat terang dan terang ketiga serta jarak antara terang pusat dengan gelap kedua.

### Solusi

Data:  $\lambda = 664 \text{ nm}$ ;  $d = 1,20 \times 10^{-4} \text{ m}$ ;  $L = 2,75 \text{ m}$ ;  $m = 3$

$$\frac{xd}{L} = m \lambda \rightarrow x = \frac{m \lambda L}{d} = \frac{(3)(664 \times 10^{-9} \text{ m})(2,75 \text{ m})}{1,20 \times 10^{-4} \text{ m}} = 0,0457 \text{ m}$$

$$\frac{xd}{L} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \rightarrow \frac{x(1,20 \times 10^{-4} \text{ m})}{2,75 \text{ m}} = \left(1 + \frac{1}{2}\right) 664 \times 10^{-9} \text{ m} \rightarrow x = 0,0228 \text{ m}$$

### 6.2.2 Intensitas Dalam Pola Interferensi

Pola interferensi maksimum dan minimum yang terjadi di layar dinyatakan dengan persamaan

$d \sin \theta = m \lambda$  dan  $d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$ . Untuk intensitas  $I$  yang terjadi akan diturunkan sebagai fungsi  $\theta$ . Jika komponen medan listrik yang sampai di titik  $P$  tidak sefase (Gambar 6.3) dan berubah dengan waktu, maka medan listriknya

$$E_1 = E_o \sin \omega t \text{ dan} \quad (6.6)$$

$$E_2 = E_o \sin (\omega t + \phi) \quad (6.7)$$

Dengan  $\omega$  adalah frekuensi sudut dari gelombang-gelombang dan  $\phi$  adalah konstanta fase dari gelombang  $E_2$ . Kedua gelombang amplitudonya sama  $E_o$  dan berbeda fase sebesar  $\phi$ , dan gelombangnya koheren. Selisih jarak lintasan gelombang sampai ke layar adalah

$$\delta = l_2 - l_1 = d \sin \theta \quad (6.8)$$

Hubungan antara  $\delta$ , panjang gelombang  $\lambda$ , selisih fase  $\phi$  terhadap  $2\pi$  radian adalah

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{\phi}{2\pi} \quad (6.9)$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (6.10)$$

Medan listrik di titik  $P$  adalah

$$E_p = E_1 + E_2 = E_o \sin \omega t + E_o \sin (\omega t + \phi) \quad (6.11)$$

$$E_p = E_o [\sin \omega t + \sin (\omega t + \phi)]$$

Aturan sinus trigonometri

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \left(\frac{A+B}{2}\right) \cos \left(\frac{A-B}{2}\right) \quad (6.12)$$

Diambil  $A = \omega t + \phi$  dan  $B = \omega t$

$$A + B = 2\omega t + \phi \text{ dan } A - B = \phi$$

Persamaan (10.11) menjadi

$$E_p = 2E_o \sin\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (6.13)$$

Indikasi hasil ini bahwa medan listrik pada titik  $P$  memiliki frekuensi  $\omega$  sama sebagai cahaya pada celah tetapi amplitudonya memiliki faktor  $2 \cos(\phi/2)$ . Ini terjadi jika  $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ , medannya menjadi  $2E_o$  untuk kondisi interferensi maksimum. Untuk  $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ , terjadi interferensi destruktif.

Terakhir, intensitas cahaya gelombang di titik  $P$  sebanding kuadrat resultan besar medan listriknya dan ditulis

$$I \propto E_o^2 = 4E_o^2 \sin^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Untuk nilai maksimum  $I_{maks} = 4E_o^2 \sin^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$  sehingga dapat ditulis

$$I = I_{maks} \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (6.14)$$

Dari persamaan (6.10)

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \text{ maka persamaan (6.14) ditulis}$$

$$I = I_{maks} \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right) \quad (6.15)$$

Untuk sudut kecil dapat ditulis

$$I = I_{maks} \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right) \quad (6.16)$$

### Contoh 6.2

Dua celah terpisah sejauh 0,180 mm. Sebuah pola interferensi terbentuk di layar pada jarak 80,0 cm dengan cahaya berpanjang gelombang 656,3 nm. Hitunglah fraksi intensitas maksimum pada jarak  $y = 0,600$  cm dari pusat terang.

### Solusi

Data:  $d = 0,180$  mm;  $L = 80,0$  cm;  $\lambda = 656,3$  nm;  $y = 0,600$  cm

$$I = I_{maks} \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right) \rightarrow$$

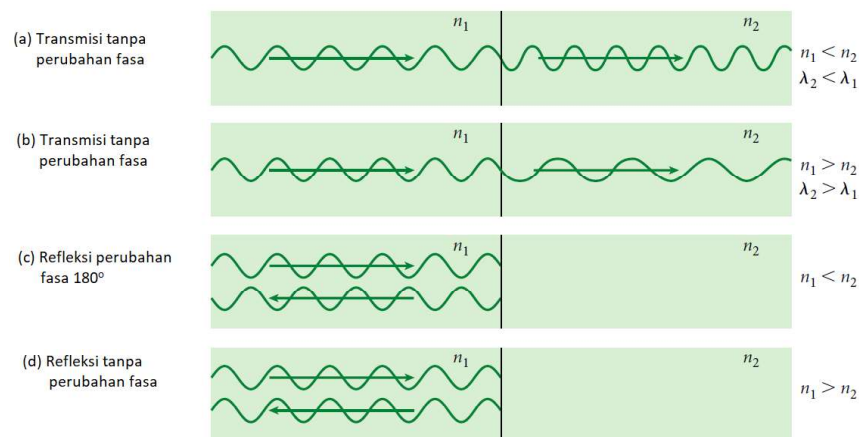
$$\frac{I}{I_{maks}} = \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right) = \cos^2\left(\frac{\pi (1,80 \times 10^{-4} \text{ m})}{(656,3 \times 10^{-9} \text{ m})(0,800 \text{ m})} (6,00 \times 10^{-3} \text{ m})\right) = 0,996$$



### 6.2.3 Interferensi Film Tipis

Salah satu cara untuk menghasilkan fenomena interferensi adalah peristiwa refleksi cahaya pada permukaan depan dan belakang film tipis. Contoh film tipis adalah gelembung sabun atau lapisan minyak yang mengambang di air. Munculnya interferensi konstruktif atau destruktif sangat bergantung pada refleksi cahaya pada permukaan depan atau di belakang lapisan. Interferensi konstruktif terjadi jika sinar yang direfleksikan oleh permukaan pertama sefase dengan sinar yang direfleksikan oleh permukaan kedua. Gambar 6.4 memperlihatkan bagaimana sinar ditransmisikan dan direfleksikan jika sinar datang pada medium yang indeks refraksinya berbeda.

Jika cahaya direfleksikan dari kedua sisi dari sebuah film tipis yang tebalnya  $t$  dan tidak terjadi pergeseran fasa pada kedua permukaan, maka interferensi konstruktif antara gelombang-gelombang yang direfleksikan terjadi jika  $2t$  sama bilangan panjang gelombang. Jika terjadi pergeseran fasa  $\frac{1}{2}$  siklus pada satu permukaan, inilah syarat terjadinya interferensi destruktif. Fasa  $\frac{1}{2}$  siklus terjadi selama refleksi jika indeks refraksi dalam medium kedua lebih besar dari pada di medium pertama.



Gambar 6.4 Cahaya merambat dalam medium optik dengan indeks refraksi  $n_1$  mendatangi medium kedua yang indeks refraksinya  $n_2$ . (a) cahaya ditransmisikan tanpa perubahan fasa untuk  $n_1 < n_2$ . (b) cahaya ditransmisikan tanpa perubahan fasa untuk  $n_1 > n_2$ . (c) cahaya direfleksikan pada perubahan fasa  $180^\circ$  untuk  $n_1 < n_2$ . (d) cahaya direfleksikan tanpa perubahan fasa untuk  $n_1 > n_2$ .

$$\text{➤ } 2t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6.17)$$

Refleksi konstruktif dari film tipis, tidak ada pergeseran fasa relatif.

$$\text{➤ } 2t = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6.18)$$

Refleksi destruktif dari film tipis, tidak ada pergeseran fasa relatif.

$$\text{➤ } 2t = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6.19)$$

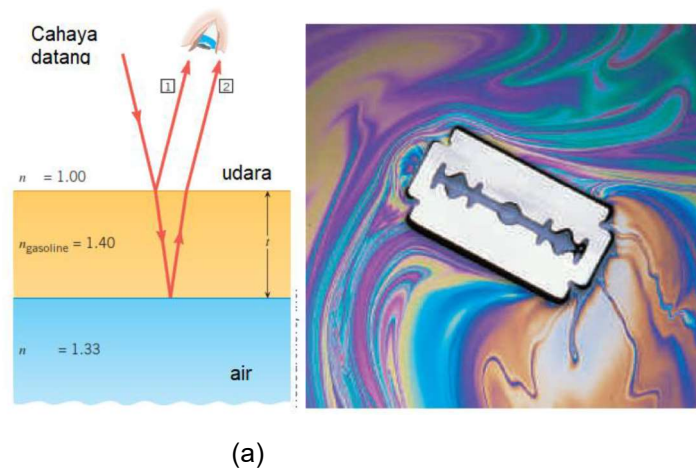
Refleksi konstruktif dari film tipis, ada pergeseran fasa relatif setengah siklus.

$$2t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6.20)$$

Refleksi destruktif dari film tipis, ada pergeseran fasa relatif setengah siklus.

Persamaan ( $m = 0, 1, \dots$ )	1 fasa pembalikan	0 atau 2 fasa pembalikan
$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$	Konstruktif	Destruktif
$2t = m\lambda$	Destruktif	Konstruktif

Catatan:  $\lambda$  = Panjang gelombang di film tipis.



Gambar 6.5 (a) Proses terjadinya interferensi konstruktif dan destruktif bergantung pada indeks refraksi lapisan dan (b) sebuah film tipis dari minyak yang berada di atas air (Sumber: Serway, 2012)

### Contoh 6.3

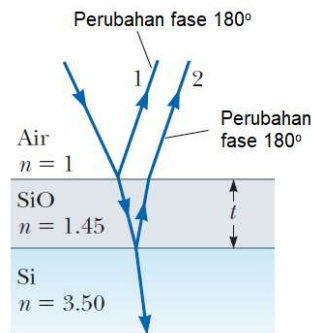
Tujuan: menyelidiki efek interferensi destruktif dalam film tipis jika ada dua pembalikan fasa.

Soal: Semikonduktor seperti silikon digunakan untuk sel surya, perangkat yang menghasilkan energi listrik ketika terkena sinar matahari. Sel surya sering dilapisi dengan film tipis transparan seperti silikon monoksida (SiO;  $n = 1,45$ ), untuk meminimalkan kerugian refleksi. Sebuah sel surya silikon ( $n = 3,50$ ) dilapisi dengan SiO untuk tujuan ini. Asumsikan sinar datang secara normal, hitunglah ketebalan minimum film yang dihasilkan agar terjadi refleksi destruktif terkecil pada panjang gelombang 552 nm.

### Solusi

Data:  $n_{\text{udara}} = 1,00$ ;  $n_{\text{SiO}} = 1,45$ ;  $n_{\text{Si}} = 3,50$ ;  $\lambda_{\text{udara}} = 552 \text{ nm}$ ;  $m = 0$ ;  $t = \dots?$

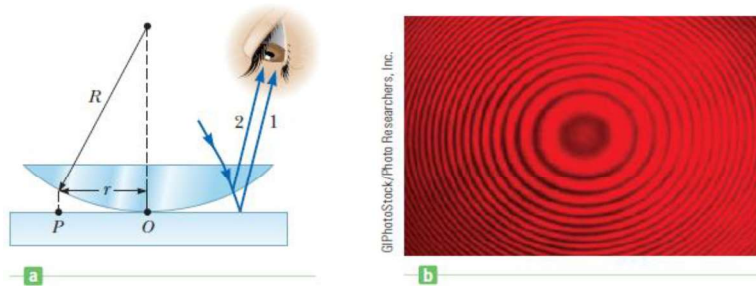
$$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda_{\text{SiO}} \rightarrow 2t = (0 + \frac{1}{2}) \left( \frac{552 \text{ nm}}{1,45} \right) \rightarrow t = 95,2 \text{ nm}$$



Gambar 6.6 Dua fase berubah pada interferensi destruktif

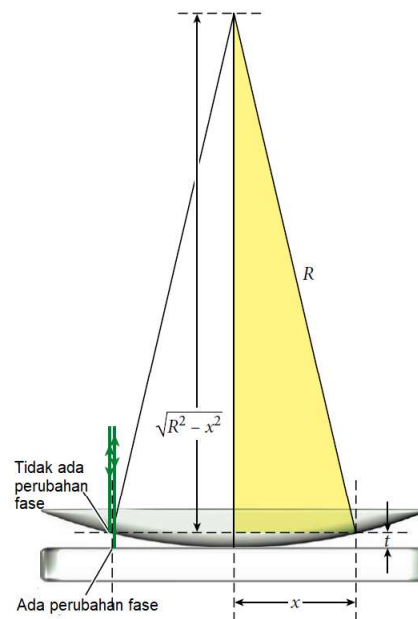
### 6.2.4 Cincin Newton

Metode lain untuk mengamati interferensi dalam gelombang cahaya adalah dengan meletakkan lensa cembung plan konveks di atas permukaan kaca datar, seperti terlihat pada Gambar 6.7. Pola interferensi yang terlihat bergantung pada ketebalan film udara yang berada antara lensa dan permukaan kaca.



Gambar 6.7 (a) Kombinasi sinar-sinar yang direfleksikan dari plat kaca dan permukaan lengkung lensa memberikan pola interferensi yang dikenal sebagai cincin Newton. (b) Sebuah foto cincin Newton (Sumber: Serway, 2012)

Untuk menghitung jari-jari pola cincin Newton dapat dihitung berdasarkan pola cincin yang terbentuk antara permukaan lengkung lensa dan plat kaca. Jika cahaya datang dengan panjang gelombang  $\lambda$  dan  $t$  adalah jarak antara kurva permukaan lensa dan plat kaca tempat terbentuknya cincin Newton yang diamati, maka jaraknya dari pusat cincin adalah



Gambar 6.8 Proses terbentuknya interferensi cincin Newton.

$$t = R - \sqrt{R^2 - x^2} = R - R\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}, \quad (6.5)$$

Karena  $\frac{x}{R} \ll 1$

Dapat diperkirakan

$$\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x}{R}\right)^2 \text{ untuk } \frac{x}{R} \ll 1 \quad (6.21)$$

Sehingga dapat ditulis

$$t = R - R\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} = R - R\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x}{R}\right)^2\right) = \frac{1}{2}\frac{x^2}{R} \quad (6.7)$$

Untuk cahaya yang bergerak bolak balik adalah

$$2t = \frac{x^2}{R} \quad (6.22)$$

Untuk cahaya yang keluar dari permukaan lengkung lensa ke udara tidak berubah fase, sedangkan cahaya yang direfleksikan pada permukaan plat akan berubah fase. Di sini cahaya mengalami interferensi destruktif. Untuk mendapatkan interferensi konstruktif maka cahaya yang direfleksikan adalah

$$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda; (m = 0, 1, 2, \dots) \text{ atau} \quad (6.23)$$

$$(m + \frac{1}{2})\lambda = \frac{x_m^2}{R} \quad (6.24)$$

$$\text{atau } x_m = \sqrt{R\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda}; (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6.25)$$

Catatan: terang ke satu adalah  $m = 0$  (terang pusat)

#### Contoh 6.4

Sebuah lensa plan konveks dengan radius  $R = 3,0$  m diletakkan pada plat kaca. Sebuah sumber cahaya dan diamati secara normal seperti Gambar 6.7(a). Radius cahaya terang cincin Newton ke 50 jauhnya 9,8 mm. Berapakah Panjang gelombang cahaya yang dihasilkan sumber?

#### Solusi

Data:  $R = 3,0$  m;  $m = 49$ ;  $x = 9,8$  mm;  $\lambda = \dots?$

$$(m + \frac{1}{2})\lambda = \frac{x_m^2}{R} \rightarrow \left(49 + \frac{1}{2}\right)\lambda = \frac{(9,8 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{3,0 \text{ m}} \rightarrow \lambda = 650 \text{ nm}$$

#### 6.3 Rangkuman

- Jika cahaya sefase keluar dari dua celah, maka interferensi konstruktif dan destruktif akan terjadi pada layar yang berada sejauh  $L$  dari celah. Interferensi konstruktif terjadi di layar jika terdapat selisih panjang gelombang sebesar kelipatan  $m\lambda$  dan interferensi destruktif terjadi jika terdapat selisih panjang gelombang sebesar  $\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$ . Jika jarak antara sumber-sumber itu adalah  $d$ , maka syarat terjadinya

interferensi konstruktif dan destruktif pada sudut  $\theta$  dengan garis tegak lurus terhadap sumber celah adalah

$$d \sin \theta = m \lambda \text{ atau } \frac{xd}{L} = m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ interferensi konstruktif}$$

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda \text{ atau } \frac{xd}{L} = (m + \frac{1}{2}) \lambda ; (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ interferensi destruktif}$$

- Intensitas pada interferensi celah dua yang dihasilkan di layar adalah

$$I = I_{maks} \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) \text{ atau}$$

$$I = I_{maks} \cos^2 \left( \frac{\pi d}{\lambda L} y \right)$$

- Interferensi film tipis dihasilkan melalui adanya dua peristiwa refleksi yang berasal dari depan dan belakang sebuah lapisan transparan. Interferensi konstruktif terjadi jika kedua cahaya refleksi memiliki fase yang sama dan interferensi destruktif terjadi jika kedua cahaya refleksi memiliki beda fase.

Persamaan ( $m = 0, 1, \dots$ )	1 fasa pembalikan	0 atau 2 fasa pembalikan
$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$	Konstruktif	Destruktif
$2t = m\lambda$	Destruktif	Konstruktif

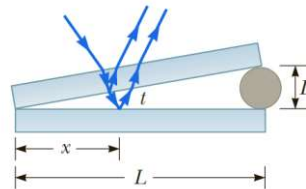
- Cincin Newton merupakan pola lain dari interferensi dalam bentuk lingkaran dengan persamaan  $x_m = \sqrt{R \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda} ; (m = 0, 1, 2, \dots)$  untuk konstruktif

#### 6.4 Soal-Soal

1. Dalam percobaan celah ganda, jarak antara celah adalah 5,0 nm dan celah berada 1,0 m di depan layar. Dua pola interferensi dapat dilihat pada layar, yang satu diakibatkan cahaya dengan panjang gelombang 480 nm, dan yang lainnya akibat cahaya dengan panjang gelombang 600 nm. Berapa jauh rumbai cerah tingkat ketiga ( $m = 3$ ) dari kedua pola interferensi tersebut terpisah di layar?
2. Sebuah serpihan mika ( $n = 1,58$ ) dipakai untuk menutupi satu celah dari susunan interferensi celah ganda. Titik pusat pada layar pandang sekarang dipakai oleh sebelumnya rumbai sisi terang ketujuh ( $m = 7$ ).

Jika  $\lambda = 550 \text{ nm}$ , berapa ketebalan dari mika?

3. Tunjukkan bahwa dua gelombang dengan fungsi gelombang diberikan oleh  $E_1 = 6,00 \sin (100\pi t)$  dan  $E_2 = 8,00 \sin (100\pi t + \pi/2)$  dijumlahkan akan memberikan gelombang dengan fungsi gelombang  $E_R \sin (100\pi t + \phi)$ . Dapatkan nilai  $E_R$  dan  $\phi$
4. Intensitas pada layar di sebuah titik dari pola interferensi celah dua adalah 64% dari maksimum. (a) Berapa perbedaan fase (dalam radian) antara sumber hasil ini? (b) jelaskan perbedaan fasenya untuk cahaya 486,1 nm.
5. Sebuah film minyak ( $n = 1,45$ ) mengambang di atas air yang disinari cahaya putih secara normal. Ketebalan film 280 nm. Tentukan (a) panjang gelombang dan warna spektrum cahaya yang terlihat kuat direfleksikan dan (b) panjang gelombang dan warna spektrum cahaya yang terlihat kuat ditransmisikan. Jelaskan jawaban Anda.
6. Ketika cahaya monokromatik datang tegak lurus pada film dari sabun ( $n = 1,33$ ) dengan udara disetiap sisinya, ketebalan film yang menyebabkan interferensi destruktif dari cahaya yang direfleksikan adalah 296 nm. Berapakah Panjang gelombang cahaya dalam vakum?
7. Sepasang sisi kaca yang panjangnya 10,0 cm dengan  $n = 1,52$  salah satu ujungnya dipisahkan dengan sehelai rambut. Bentuk segitiga sisinya adalah udara seperti Gambar 6.9. Ketika cahaya koheren dari laser helium-neon yang Panjang gelombangnya 633 nm datang pada film dari atas, rumbai gelap ke 15 per centimeter teramati. Berapa tebal rambut itu?



Gambar 6.9 Soal 7

8. Sebuah lensa plan konveks dengan permukaan lengkung diletakkan di plat permukaan kaca dan disinari dari atas dengan cahayaberpanjang gelombang 500 nm seperti Gambar 6.4(a). Sebuah titik gelap teramati dibagian pusat, dikelilingi 19 cincin gelap (dengan

cincin terang diantaranya). Berapa ketebalan udara pada posisi cincin gelap ke 19 dari pusat?

9. Gangguan interferensi dibentuk dari sebuah lensa plan konveks yang diletakkan di atas plat cermin yang disinari secara normal cahaya monokromatik. Pola rumbai interferensi lingkaran terbentuk dengan ketebalan yang sama. Lingkaran gelap dan terang dibentuk dari udara antara dua permukaan kaca yang dikenal sebagai cincin Newton. Dalam eksperimen ini menggunakan lensa plan konveks yang berpanjang fokus  $f = 80,00$  cm dan indeks refraksinya  $n_1 = 1,500$ , radius lingkaran terang ketiga diperoleh pada jarak  $0,8487$  mm. Hitunglah panjang gelombang cahaya monokromatik yang digunakan.



## 6.5 Lampiran: Percobaan Interferensi

### 6.5.1 Percobaan Cincin Newton

#### Tujuan

Menentukan panjang gelombang cahaya pada radius tertentu dari cincin Newton yang terbentuk.

#### Prinsip dan Tugas

Dalam alat cincin Newton, cahaya monokromatik yang menembus film tipis medium antara lensa plan konveks dan kaca plan paralel. Panjang gelombang ditentukan dari jari-jari cincin Newton. Gambar 6.10: Pengaturan eksperimental untuk menentukan panjang gelombang menggunakan peralatan cincin Newton.

#### Teori

Ketika lensa plan konveks bagian cembungnya diletakkan di atas kaca plan paralel, film tipis udara terbentuk ruang antara permukaan cembung lensa dengan kaca plan paralel. Ketebalan film tipis sangat kecil pada titik kontak dan secara bertahap meningkat dari pusat ke arah luar. Jika cahaya monokromatik dari atas secara tegak lurus ke arah lensa akan terbentuk pola lingkaran gelap terang. Jika digunakan cahaya putih maka pola lingkarannya berwarna warni. Cincin Newton merupakan pola lain dari interferensi dalam bentuk lingkaran dengan persamaan  $x_m = \sqrt{R \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda}$ ; ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) untuk konstruktif.

#### Peralatan yang Diperlukan

Perangkat cincin Newton, Lensa ( $f = + 50$  mm), filter interferensi, layar transparan, lampu bertekanan tinggi uap Hg, catu daya untuk lampu Hg, kondensor ganda ( $f60$ mm), pegangan lensa, bangku profil optik, plastik (20 cm).



Gambar 6.10

### Prosedur

Percobaan cincin Newton diatur seperti ditunjukkan pada Gambar 6.10. Lampu tekanan tinggi uap air raksa dengan kondensor ganda (panjang fokus 60mm) terpasang, dudukan lensa dengan filter interferensi, peralatan cincin Newton, dudukan lensa dengan lensa panjang fokus 50mm dan layar transparan sekitar 40cm dari lensa semuanya siap di bangku optik.

1. Pada awal percobaan, jalur sinar diatur, pertama tanpa filter warna, sampai cincin lingkaran dapat diamati di layar.
2. Filter kuning dimasukkan ke dalam pegangan lensa dan ruangan digelapkan.
3. Dengan memutar tiga sekrup penyetel pada peralatan cincin Newton dimana lensa plan-cembung diatur pada kaca plan paralel sehingga pusat terang cincin berada di titik tengah dalam skala milimeter diproyeksikan di layar. Saat membuat penyesuaian ini, pastikan bahwa lensa dan pelat kaca saling menyentuh. Ini dicapai ketika tidak ada lagi cincin yang muncul dari pusat cincin saat sekrup penyetelan dikencangkan.
4. Ukur diameter  $D_m$  cincin terang pada ordinal yang sesuai.
5. Catat ukuran  $D_m$  dan radius  $R (= D_m/2)$  dari cincin dalam tabel.



## BAB 7 DIFRAKSI



Tampilan hologram dari smartphone

### 7.1 Sub Capaian Pembelajaran Matakuliah

Setelah perkuliahan berlangsung diharapkan mahasiswa dapat menguasai konten Difraksi Fresnel dan Difraksi Fraunhofer, Difraksi Cahaya Celah Tunggal, Difraksi Cahaya Lubang Lingkaran, Kisi Difraksi, Difraksi Sinar-X, Holografi, dan Percobaan Difraksi.

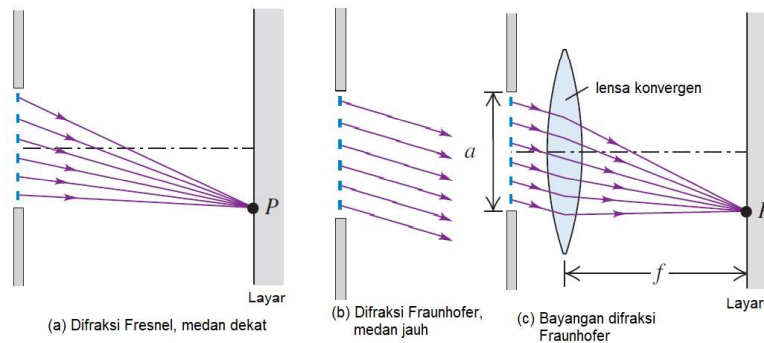
### 7.2 Topik Pembelajaran

#### 7.2.1 Difraksi Fresnel dan Fraunhofer

Difraksi adalah peristiwa pelenturan cahaya yang melewati penghalang. Difraksi ini terjadi jika berkas cahaya lewat melalui sebuah celah atau di sekitar tepi. Difraksi pertama kali diungkapkan oleh Francesco Grimaldi (1618-1663) (Heinbecker, 2002). Difraksi Fresnel diperoleh jika sumber cahaya dan layar berada relatif dekat ke celah yang membentuk pola difraksi. Situasi ini digambarkan sebagai difraksi medan-dekat seperti Gambar 7.1(a). Gelombang bidang (sinar sejajar) yang memasuki celah difraksi akan melalui celah sebagai gelombang-gelombang yang sinar-sinarnya tidak sejajar.

Difraksi Fraunhofer diperoleh dengan meletakkan sumber sinar dan layar relatif jauh dari celah difraksi sehingga semua sinar yang datang ke

celah dapat dianggap sejajar dan dari celah ke sebuah titik dalam pola itu sinar dianggap sejajar. Situasi ini digambarkan sebagai difraksi medan-jauh seperti Gambar 7.1(b). Percobaan difraksi Fraunhofer di laboratorium dapat menggunakan lensa konvergen sesudah celah difraksi. Tujuan meletakkan lensa dekat celah difraksi agar sinar yang datang saling sejajar akan terkumpul di satu titik pada layar seperti Gambar 7.1(c).

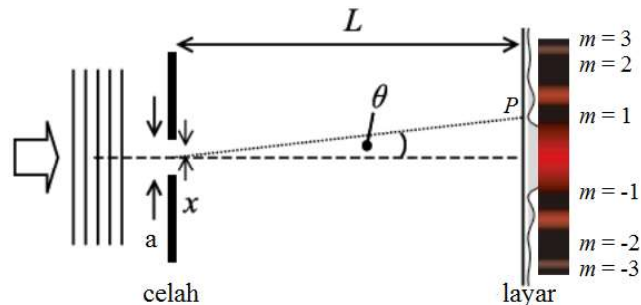


Gambar 7.1 Difraksi oleh celah tunggal persegi panjang. Sisi Panjang celah tegak lurus pada gambar. (a) Difraksi Fresnel, medan dekat, (b) Difraksi Fraunhofer, medan jauh, dan (c) Bayangan difraksi Fraunhofer (Sumber: Young, 2014).

## 7.2.2 Difraksi Cahaya Celah Tunggal

Gambar 7.2. memperlihatkan pandangan samping sebuah celah horizontal. Jika jarak  $L$  ke layar sangatlah besar bila dibanding dengan lebar celah  $a$ , sinar yang berinterferensi dari jarak terpisah  $a/2$  dapat diambil sejajar, ini merupakan ciri pola difraksi Fraunhofer. Untuk sebuah celah sempit tunggal dengan lebar  $a$ , syarat untuk interferensi destruktif di sebuah titik  $P$  pada sudut  $\theta$  dapat ditunjukkan dengan

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (7.1)$$



Gambar 7.2 Skema percobaan pola difraksi Fraunhofer yang terbentuk pada layar

**Contoh 7.1**

Tujuan: menentukan posisi rumbai gelap dalam difraksi celah tunggal.

Cahaya dengan panjang gelombang 580 nm datang pada celah yang lebarnya 0,300 mm. Pengamatan di layar yang jaraknya 2,00 m dari celah.

Tentukan posisi rumbai gelap pertama dan lebar rumbai terang pusat.

**Solusi**

Data:  $\lambda = 580 \text{ nm}$ ;  $a = 0,300 \text{ mm}$ ;  $L = 2,00 \text{ m}$ ;  $m = 1$  (gelap pertama)

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} = \frac{(1)(580 \times 10^{-9} \text{ m})}{3,00 \times 10^{-4} \text{ m}} = 1,93 \times 10^{-3}$$

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y_1}{L} \rightarrow y_1 = L \sin \theta = (2,00 \text{ m})(1,93 \times 10^{-3}) = 3,86 \times 10^{-3} \text{ m}$$

posisi rumbai gelap pertama. Lebar terang pusat adalah dua kali jarak gelap pertama

$$w = 2(3,86 \text{ mm}) = 7,72 \text{ mm}$$

**7.2.3 Difraksi Cahaya Lubang Lingkaran**

Pola difraksi cahaya lubang lingkaran difraksinya terdiri dari sebuah cakram terang dikelilingi oleh cincin-cincin gelap dan terang yang bergantian seperti Gambar 7.3. Jejari cakram pusat (cakram Airy) dan cincin yang berurutan tidak mengikuti suatu deret yang sederhana. Dapat dijelaskan pola itu dalam sudut  $\theta$  yang menyatakan sudut setiap cincin. Jika diameter lubang adalah  $D$  dan Panjang gelombang yang lewat  $\lambda$ , maka jejari sudut  $\theta_1$  dari cincin gelap pertama diberikan oleh

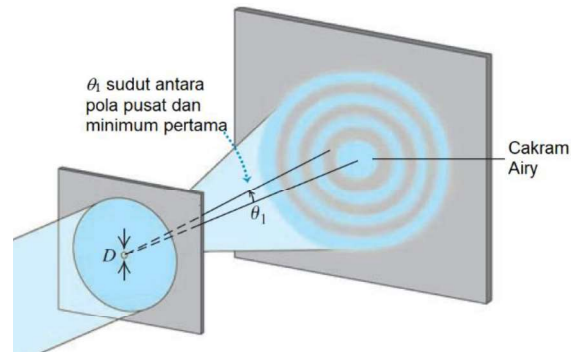
$$\theta_1 \approx \sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (7.2)$$

Karena jejarinya yang berurutan tidak mengikuti deretan sederhana, maka deretan gelap dan terang berikutnya adalah sebagai berikut:

Table 7.1 Daftar orde difraksi cahaya lubang lingkaran

Cincin	Orde Lubang Lingkaran ( $m$ )
Terang pusat	0
Gelap pertama	1,220
Terang kedua	1,635
Gelap kedua	2,233
Terang ketiga	3,238
Gelap ketiga	3,238

Cincin	Orde Lubang Lingkaran (m)
Terang keempat	3,699
Gelap keempat	4,241
Terang kelima	4,710
Gelap kelima	5,243



Gambar 7.3 Pola difraksi yang dibentuk oleh lubang lingkaran (Sumber: Young, 2014)

### Contoh 7.2

**Tujuan:** Menentukan jejari pusat terang di cakram dan daya pisah lensa dari panjang gelombang yang melewatinya.

Sebuah lensa memiliki garis tengah 2,0 cm mempunyai panjang fokus 40 cm. Lensa itu disinari dengan seberkas cahaya monokromatik berpanjang gelombang 590 nm. Tentukanlah jari-jari cakram pusat pola difraksi yang teramati pada sebuah bidang di fokus. Tentukan pula daya pisah untuk gelombang ini.

### Solusi

Data:  $D = 2,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ ;  $f = 0,40 \text{ m}$ ;  $\lambda = 5,90 \times 10^{-7} \text{ m}$ .

$$r = \dots? \theta_1 \approx \sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 1,22 \frac{5,90 \times 10^{-7} \text{ m}}{2,0 \times 10^{-2} \text{ m}} \rightarrow \theta_1 = 3,6 \times 10^{-5} \text{ rad} = 7,4''$$

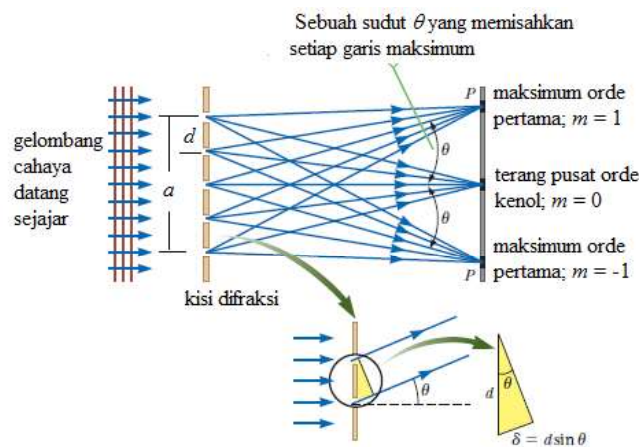
jejari cakram pusat juga merupakan daya pisah lensa

$$r = f\theta_1 = (0,40 \text{ m})(3,6 \times 10^{-5} \text{ rad}) = 1,4 \times 10^{-5} \text{ m} = 14 \mu\text{m}$$

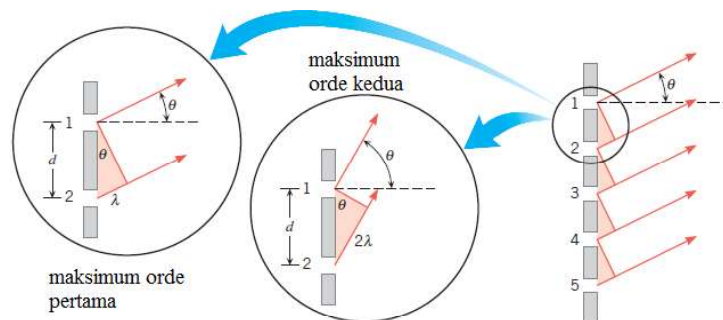
### 7.2.4 Kisi Difraksi

Sebuah kisi difraksi terdiri dari sejumlah besar celah sejajar, semuanya dengan lebar  $a$  yang sama dan yang antara pusat-pusat celah

terpisah sejarak  $d$ . Kisi ini digunakan untuk memisahkan satu gelombang datang ke dalam panjang gelombang komponen-komponen sejajar dengan pola difraksi Fraunhofer untuk memperlihatkan garis-garis difraksi maksimum. Syarat untuk intensitas maksimum dalam pola interferensi itu dapat ditunjukkan melalui interferensi pola Fraunhofer menjadi  $d \sin \theta = m\lambda$ ; ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) untuk maksimum-maksimum intensitas yang terjadi. Gambar 13.4 memperlihatkan garis-garis terang pada layar sebagai pola Fresnel yang terpisah sebesar sudut  $\theta$ .



Gambar 7.4 Memperlihatkan ketika cahaya melewati kisi difraksi, sebuah terang pusat ( $m = 0$ ) dan terang orde pertama saja ( $m = \pm 1$ ) terbentuk pada layar. Celah terpisah sejauh  $d$  (Sumber: Serway, 2012).



Gambar 7.5 Kondisi yang ditunjukkan pada maksimum pertama dan kedua dalam pola difraksi yang dihasilkan kisi difraksi pada bagian kanan (Sumber: Cutnell, 2012).



Pada Gambar 7.5 cara yang sama, cahaya dari celah 3 satu panjang gelombang merambat lebih jauh daripada cahaya dari celah 2. Untuk maksimum orde pertama menunjukkan interferensi konstruktif jika  $\sin \theta = \lambda/d$  (gambar celah 1 dan 2 yang diperbesar). Bentuk maksimum orde kedua terjadi jika lintasan cahaya memiliki selisih dua panjang gelombang atau  $\sin \theta = 2\lambda/d$ . Setiap dua celah berturutan saling menguatkan pada sudut  $\theta$  sebagai berikut

$$d \sin \theta = m \lambda ; (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ maksimum kisi difraksi} \quad (7.3)$$

### Contoh 7.3

**Tujuan:** Menentukan jarak pisah antar celah yang berdampingan, lebar celah terkecil, orde terbesar kesatu, kedua, dan ketiga.

Cahaya dengan panjang gelombang 600 nm diarahkan secara normal pada kisi difraksi. Dua maksimum yang berdampingan terjadi pada sudut yang diberikan oleh persamaan  $\sin \theta = 0,2$  dan  $\sin \theta = 0,3$ . Maksimum orde keempatnya hilang. (a) Berapakah jarak pemisahan antara celah yang berdampingan ini? (b) Berapakah lebar celah terkecil yang dapat dipunyai celah ini? Untuk lebar celah yang ini, berapakah nilai bilangan orde  $m$  (c) terbesar, (d) terbesar kedua, dan (e) terbesar ketiga dari maksimum yang dihasilkan oleh kisi ini?

### Solusi

Data:  $\lambda = 600 \text{ nm}$ ;  $\sin \theta = 0,2$ ;  $\sin \theta = 0,3$

- (a)  $d = \dots?$   $d \sin \theta = m\lambda \rightarrow 0,2d = m\lambda$  dan  $0,3d = (m + 1)\lambda$  selisih keduanya adalah  $0,1d = \lambda$ , atau  $d = \lambda/0,1 = (600 \text{ nm})/0,1 = 6000 \text{ nm}$
- (b)  $a = \dots?$  Minimum difraksi celah tunggal  $a \sin \theta = \lambda$  dan  $d \sin \theta = 4\lambda$  kedua persamaan ini dapat diperoleh  $a = d/4 = (6000 \text{ nm})/4 = 1500 \text{ nm}$ .
- (c) Pertama, terbesar pada  $\theta = 90^\circ$  dan menemukan nilai terbesar  $m$  untuk  $m\lambda < d \sin \theta$ . Kondisi ini memberikan  $m < d/\lambda$  sehingga  $d/\lambda = (6000 \text{ nm})/(600 \text{ nm}) = 10$ . Ini berarti orde terbesar adalah  $m = 9$ . Dalam suatu percobaan orde yang teramati adalah  $m = 0, 1, 2, 3, 5, 6, 7$ , dan 9. Adapun orde keempat dan kedelapan hilang dalam pengamatan.

- (d) Menggunakan data ini orde terbesar kedua adalah  $m = 7$ .  
 (e) Orde terbesar ketiga yang teramati adalah  $m = 6$ .

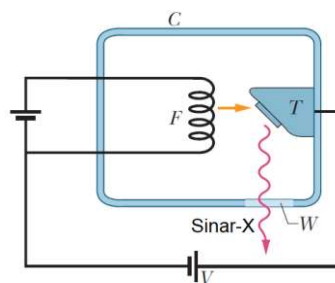
### 7.2.5 Difraksi Sinar-X

Sinar-X merupakan radiasi elektromagnetik yang panjang gelombangnya berada dalam orde  $1 \text{ \AA} (= 10^{-10} \text{ m})$ . Gelombang ini pertama kali ditemukan oleh Wilhelm Rontgen pada tahun 1895. Gambar 7.6 menunjukkan bahwa sinar-X dihasilkan apabila electron yang terlepas dari filamen yang dipanaskan  $F$  dipercepat oleh beda potensial  $V$  dan menabrak sasaran logam  $T$ .

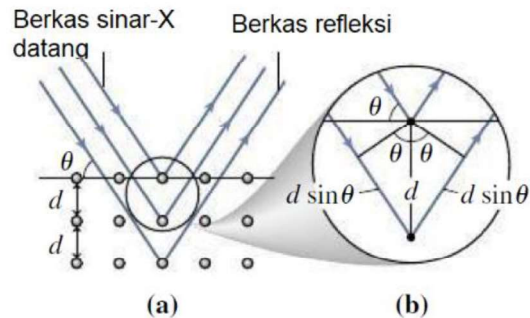
Pada tahun 1912 Max von Laue mengusulkan bahwa sebuah kristal dapat berperan sebagai semacam kisi difraksi berdimensi tiga untuk sinar-X. Contoh kristal yang dapat dijadikan kisi difraksi untuk sinar-X adalah NaCl (natrium klorida). Gambar 7.7a memperlihatkan sinar-X direfleksikan oleh bidang-bidang atom dalam sebuah kristal. Gambar 7.7b kita melihat gelombang mengalami refleksi dalam keadaan sefase dari atom-atom dengan jarak selisih dengan gelombang di atasnya sebesar  $2d \sin \theta$ . Dalam keadaan ini interferensi konstruktif yang dikenal sebagai hukum Bragg adalah

$$2d \sin \theta = m\lambda, \text{ untuk } m = 1, 2, 3, \dots \quad (7.4)$$

dengan  $m$  merupakan orde intensitas maksima.



Gambar 7.6 Sinar-X dibangkitkan apabila elektron yang meninggalkan filamen yang dipanaskan  $F$  dipercepat melalui beda potensial  $V$  dan menabrak sasaran logam  $T$ . Jendela  $W$  dalam ruang vacuum  $C$  yang terbuat dari bahan yang dapat ditembus oleh sinar-X (Sumber: Walker, 2014)



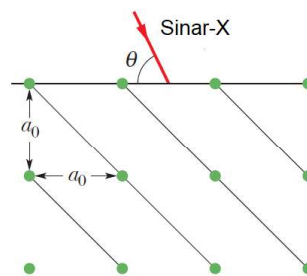
Gambar 7.7 (a) refleksi sinar-X pada bidang atom dalam kristal. (b) Interferensi konstruktif sinar-X bagian bawah memiliki selisih panjang gelombang dengan bagian atas sebesar  $2d \sin \theta = m\lambda$  (Sumber: Wolfson, 2016)

#### Contoh 7.4

**Tujuan:** Menentukan ukuran satuan sel kristal yang disinari berkas sinar-X

Dalam Gambar 7.8, refleksi orde pertama dari bidang refleksi yang ditunjukkan jika seberkas sinar-X dengan panjang gelombang 0,260 nm yang membuat sudut  $\theta = 63,8^\circ$  dengan permukaan atas kristal.

Berapakah ukuran satuan sel  $a_0$ ?



Gambar 7.8

#### Solusi

Data:  $\lambda = 0,260 \text{ nm}$ ;  $\theta = 63,8^\circ$ ;  $m = 1$ ;  $a_0 = \dots?$

Sudut datang pada bidang refleksi adalah  $\theta = 63,8^\circ - 45,0^\circ = 18,8^\circ$  dan jarak bidang adalah  $d = \frac{a_0}{\sqrt{2}}$  dan dengan menggunakan Gambar 7.8

$$2d \sin \theta = m\lambda \rightarrow 2 \frac{a_0}{\sqrt{2}} \sin (18,8^\circ) = (1)(0,260 \text{ nm}) \rightarrow a_0 = 0,570 \text{ nm}$$

#### 7.2.6 Holografi

Penjelasan optik tidak lengkap tanpa menyertakan holografi. Dasar pembuatan holografi adalah perpanjangan sederhana dari interferometri. Gambar 7.9a, memperlihatkan bagaimana hologram dibuat. Berkas cahaya laser diarahkan ke pembelah berkas, cahaya dibagi dua, sebagian ke arah film dan sebagiannya ke arah benda. Selanjutnya benda

menghamburkan berkas cahaya yang diterimanya menuju film. Cahaya yang tersebar dari benda adalah gelombang yang sangat kompleks yang akan dilihat dalam film. Gelombang bidang dari berkas acuan dan gelombang kompleks dari benda bertemu di film dan terjadi pola interferensi. Hasil rekaman kedua gelombang ini di film dikenal sebagai hologram. Gambar 7.9b adalah hasil hologram yang diperbesar. Gambar 7.9c, merupakan proses bagaimana melihat bayangan benda dalam film hologram.



Gambar 7.9 Hologram merupakan penerapan penting dari gelombang optika

### 7.3 Rangkuman

- Difraksi Fresnel dikenal sebagai difraksi medan dekat karena sinar yang keluar dari celah menuju titik  $P$  secara konvergen.
- Difraksi Fraunhofer dikenal sebagai difraksi medan jauh karena sinar yang keluar dari celah dianggap sejajar sehingga diperlukan lensa konvergen di depan celah untuk mendapatkan titik terang gelap pada layar.
- Difraksi celah tunggal akan memperlihatkan pola garis terang gelap dengan persamaan  

$$\sin \theta = m\lambda ; (m = 1, 2, 3, \dots)$$
 untuk pola garis gelap
- Pola difraksi lubang lingkaran yang diameternya  $D$  terdiri dari sebuah titik terang pusat yang diikuti oleh garis terang gelap yang besarnya tidak berurutan. Besar jari terang dan gelap setiap lingkaran dapat dihitung dengan persamaan  $\theta_m \approx \sin \theta_m = m \frac{\lambda}{D}$
- Kisi difraksi merupakan sederetan celah sejajar tipis yang jarak

antaranya terpisah sejauh  $d$ . Kisi difraksi maksimum terjadi dengan persamaan  $d \sin \theta = m\lambda$  dengan  $m = 0, 1, 2, \dots$

- Susunan teratur atom dalam kristal merupakan kisi difraksi tiga dimensi untuk gelombang pendek seperti sinar-X.
- Hologram merupakan rekaman fotografik dari sebuah pola interferensi yang dibentuk oleh cahaya yang dihamburkan dari sebuah benda dan cahaya langsung yang datang dari sumber itu. Sebuah hologram menghasilkan sebuah bayangan yang benar-benar berdimensi tiga dari benda itu.

#### 7.4 Soal-Soal

1. Pola difraksi celah tunggal dihasilkan dengan cahaya panjang gelombang 510 nm. Layar yang membentuk pola berada pada jarak 1,40 m dari celah. Lebar celah adalah 7,00 mm. Berapakah lebar pola terang pusat? Lebar sama nilainya jarak antara dua difraksi destruktif sisi dekat terang pusat.
2. Cahaya dari laser helium-neon panjangnya 633 nm berasal dari sebuah celah dan teramati pada layar yang jauhnya 2,0 m di belakang celah. Difraksi minimum pertama dalam pola terbentuk pada jarak 1,2 cm dari terang pusat. Berapa lebar celah?
3. Cahaya monokromatik dari sebuah sumber cahaya datang pada sebuah celah yang lebarnya 0,750 mm. Sebuah layar berada pada jaraknya 2,00 m, jarak dari maksimum pusat pola difraksi ke minimum pertama diukur berjarak 1,35 mm. Hitunglah panjang gelombang cahaya.
4. Cahaya monokromatik dilewatkan melalui celah yang lebarnya 0,050 mm. (a) Pola difraksi yang dihasilkan umumnya (1) lebih lebar untuk panjang gelombang yang lebih panjang, (2) lebih lebar untuk panjang gelombang yang lebih pendek, (3) sama lebarnya untuk semua panjang gelombang. Jelaskan. (b) Pada sudut berapakah orde minimum ketiga terlihat dan berapakah lebarnya terang pusat pada layar yang jaraknya 1,0 m dari celah, untuk masing-masing cahaya

panjang gelombang 400 nm dan 550 nm.

5. Mengukur jarak ke bulan dengan menembakkan laser pulsa pendek dan mengukur waktu yang digunakan setelah refleksi di bulan. Pulsa di kirim dari bumi. Untuk mengirim pulsa keluar, pulsa diperluas jatuhnya pada bukaan 6,00 inci diameter teleskop. Asumsikan bahwa berkas yang keluar membentuk pola difraksi dari panjang gelombang 500 nm, berapa besar berkas sinar yang dipancarkan di bulan yang jaraknya  $3,83 \times 10^5$  km.
6. Anggap bahwa batas spektrum tampak secara bebas dipilih di antara 430 dan 680 nm. Hitunglah jumlah garisan per millimeter kisi yang memencarkan spektrum orde pertama melalui sudut  $20,0^\circ$ .
7. Sebuah kisi difraksi menghasilkan maksimum pertama pada sudut  $20,0^\circ$ . berapa sudut maksimum orde kedua?
8. Cahaya dari laser argon melewati kisi difraksi yang memiliki 5310 garis/cm. Pusat dan maksima orde pertama dipisahkan sejauh 0,488 m pada sebuah dinding 1,72 m dari kisi. Hitunglah Panjang gelombang cahaya laser.
9. Sebuah kisi difraksi memiliki  $n$  garis per satuan panjang. Tunjukkan bahwa pemisahan angular  $\Delta\theta$  dua garis panjang gelombang  $\lambda$  dan  $\lambda + \Delta\lambda$  diperkirakan  $\Delta\theta = \Delta\lambda / \sqrt{\frac{1}{n^2 m^2} - \lambda^2}$ , dengan  $m$  adalah bilangan orde.
10. Maksimum orde pertama diamati pada  $12,6^\circ$  untuk sebuah kristal yang memiliki ruang antara bidang atom 0,250 nm. (a) Berapa Panjang gelombang sinar-X yang digunakan untuk mengamati pola orde pertama? (b) Berapa banyak orde yang dapat diamati untuk kristal ini pada panjang gelombang ini?
11. Jika jarak bidang-bidang kristal  $3,50 \text{ \AA}$ , (a) berapa panjang gelombang elektromagnetik yang dibutuhkan untuk mendapatkan maksimum interferensi orde pertama dalam refleksi Bragg jika sinar datang pada bidang  $15,0^\circ$ , dan spektrum gelombang elektromagnetik manakah ini? (b) pada sudut berapakah yang lainnya untuk mendapatkan interferensi maksima.

## **7.5 Lampiran Percobaan Difraksi**

### **7.5.1 Percobaan Kisi Difraksi**

#### **Menentukan Panjang Gelombang Cahaya Merah, Hijau, dan Biru**

Percobaan ini akan memverifikasi panjang gelombang dari warna cahaya yang berbeda-beda. Menurut spektrum yang terlihat, cahaya merah, hijau, dan biru memiliki panjang gelombang dalam kisaran berikut:

- merah: 650–750 nm
- hijau: 500–550 nm
- biru: 450–500 nm

#### **Pertanyaan**

Berapa panjang gelombang cahaya merah, hijau, dan biru?

#### **Variabel**

Bebas: jarak antara kisi difraksi dan layar.

Terikat: posisi terang orde pertama dan kedua untuk cahaya merah, biru, dan hijau pada layar dengan "jelas".

Kontrol: sumber cahaya pijar filamen tunggal dan kisi difraksi.

#### **Bahan dan Peralatan**

Kisi Difraksi, Meteran 100 cm, Lampu filamen tunggal, Selotip dan pena, dan Bangku optik

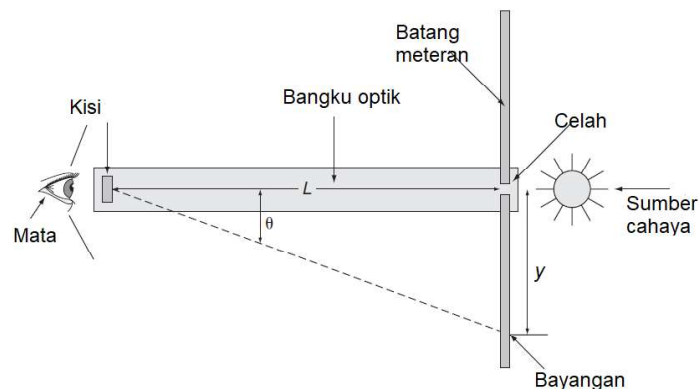
#### **Desain Eksperimental**

Akan diselidiki posisi terang orde pertama dan kedua secara berurutan dalam pola interferensi yang dihasilkan oleh cahaya putih dari kisi difraksi yang digunakan. Tongkat meteran 100 cm dan lampu filamen diatur seperti ditunjukkan pada Gambar 7.10

Dalam desain ini, pengamat melihat melalui kisi difraksi garis terang seperti yang muncul di depan meteran. Meteran tempat cahaya jatuh berada pada jarak 100 cm atau lebih dari kisi difraksi secara tegak lurus. Saat seseorang mengamati cahaya di belakang kisi difraksi, seorang temannya (orang kedua) diarahkan untuk menempatkan/menandai pita pada batang meteran di mana garis terang muncul. Garis terang pertama dan kedua dapat teramati dalam percobaan ini.

### Prosedur

1. Letakkan lampu pada jarak mulai dari 100 cm dari kisi difraksi.
2. Siapkan meteran panjang 100 cm di samping lampu sehingga meteran dan posisi kisi difraksi tegak lurus satu sama lain terhadap lampu seperti Gambar 7.10
3. Hidupkan lampu dan lihat melalui kisi-kisi, gerakkan sisi kepala ke samping sampai Anda dapat melihat garis terang orde pertama, yang akan muncul sebagai pelangi. Mata Anda bertindak sebagai detektor panjang gelombang, sebagai pengganti layar.
4. Sambil melihat garis terang, arahkan rekan lab Anda untuk meletakkan selotip berlabel "B" pada meteran-tongkat di mana garis terang biru tampak.
5. Ulangi langkah 4 menggunakan pita berlabel "H" untuk pita cahaya hijau dan "M" untuk pita cahaya merah.
6. Ulangi langkah 4 dan 5 untuk garis terang urutan kedua, jika terlihat di sepanjang meteran.
7. Catat jarak antara lampu dan setiap potongan pita berlabel.
8. Ulangi percobaan dengan jarak kisi dengan lampu yang lebih panjang lagi



Gambar 7.10

### Analisis

1. Menggunakan terang pertama ( $m = 1$ ), hitung panjang gelombang cahaya merah, biru, dan hijau.



2. Tentukan panjang gelombang rata-rata setiap warna cahaya menggunakan rentang yang diberikan. Hitung perbedaan persen antara panjang gelombang rata-rata setiap warna dan nilai yang ditentukan secara eksperimen.
3. Jelaskan mengapa setiap garis terang muncul sebagai pelangi. Petunjuk: Apa pengaruh panjang gelombang pada sudut difraksi?
4. Berapa banyak garis terang yang harus muncul dalam kisi difraksi pada kedua sisi sumber cahaya? Asumsikan sudut terbesar difraksi yang bisa dilihat adalah  $89^\circ$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- Bauer, W. and Westfall, G.D. (2011). *University Physics With Modern Physics*. 1<sup>st</sup> Ed. New York. USA: Mc Graw Hill.
- Cutnell, J.D. and Johnson, K.W. (2012). *Physics 9th*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Francis A. J. and Harvey E. White.(2001). *Fundamentals of Optics*, 4<sup>th</sup> Ed. New York: The McGraw-Hill.
- Giancoli, D.C. (2014). *Physics: Principles with applications*, 7<sup>th</sup>. Boston: Pearson.
- Guenther R. (1990). *Modern Optics*. Canada: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Knight, R.D. (2013). *Physics For Scientists and Engineers: a strategic approach*. Glenview USA: Pearson Education. Inc.
- Loyd D.H. (2008). *Physics Laboratory Manual*. 3<sup>rd</sup> Ed. Belmont, CA: Thomson.
- Nassar Z. (2007). *Laboratory Experiments in Optics*. Palestina: Islamaic University-Gaza.
- Nowikow, I. and Heimbecker, B. (2001). *Physics: Concepts and Connection 2*. Canada: Irwin Publishing.
- Ostdiek, V.J. and Bord, D.J. (2008). *Inquiry Into Physics*. 6<sup>th</sup> Ed. Belmont, CA USA: Thomson.
- Pearson. (2009). *Physics*. Canada: Pearson Education Canada.
- Serway, R.A. and Jewett, J.W., (2010). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, - 9<sup>th</sup> ed. Boston: Brooks/Cole.
- Tipler, P.A. and Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 6th*. New York: W.H. Freeman and Company.
- Walker, J. (2014). *Halliday and Resnick: Fundamentals of Physics*, - 10<sup>th</sup> ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. Inc.
- Wilson J.D., Buffa A.J., and Lou B. (2010). *College Physics 7<sup>th</sup> ed*. San Fransisco: Addison Wesley.
- Wilson J.D and Hernandez-Hall C.A. (2015). *Physics Laboratory Experiments*, 8<sup>th</sup> Ed. Stamford, CT: Cengage Learning.
- Wolfson, R. (2016). *Essential university Physics 3<sup>rd</sup> Ed*. USA: Pearson Education.
- Young, H.D. and Freedman R.A., (2014). *Sears and Zemansky's: University Physics: With Modern Physics*, - 13<sup>th</sup> Ed. London: Pearson Education.



## GLOSARIUM

**Aqueous humor**, cairan pengisi antara kornea dan lensa mata. Aqueous humor berfungsi memberi bentuk dan kekakuan pada mata.

**Astigmatism**, kesalahan bias, merupakan masalah bagaimana mata memfokuskan cahaya.

**Bayangan maya**, bayangan yang terbentuk akibat perpotongan perpanjangan ke belakang sinar-sinar refleksi atau refraksi.

**Bayangan nyata**, bayangan yang terbentuk akibat perpotongan langsung sinar-sinar refleksi atau refraksi.

**Cahaya**, pancaran foton dalam bentuk spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang berkisar dari  $10^{-12}$  m (yang terpendek) sampai 1000 m (yang terpanjang), dengan frekuensi yang sesuai dari  $10^{20}$  Hz sampai  $10^5$  Hz.

**Cahaya tampak**, bagian dari gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang antara 400 nm (warna ungu) sampai 700 nm (warna merah).

**Cermin**, optis yang merefleksikan semua cahaya yang diterimanya.

**Cermin cekung**, optis yang merefleksikan sinar secara konvergen.

**Cermin cembung**, optis yang merefleksikan sinar secara divergen.

**Cincin Newton**, pola interferensi yang terjadi akibat kombinasi sinar-sinar yang direfleksikan dari plat kaca dan permukaan lengkung lensa.

**Deviasi**, penyimpangan arah sinar keluar terhadap sinar masuk dari sistem optis.

**Deviasi minimum**, penyimpangan arah sinar keluar terkecil terhadap sinar masuk.

**Difraksi**, peristiwa pelenturan cahaya yang melewati penghalang

**Dispersi**, penguraian cahaya putih menjadi beberapa warna setelah mengalami refraksi pada medium lain.

**Fovea centralis**, tempat terjadinya penglihatan paling tajam di retina berdiameter sekitar 0,25mm.

**Holografi**, hasil rekaman gelombang bidang dari berkas acuan dan gelombang kompleks dari benda yang bertemu di film dan terjadi pola interferensi.

**Hiperopia**, cacat mata yang hanya mampu melihat benda jauh dengan tajam yang diakibatkan oleh lensa mata memipih.

**Indeks refraksi**, rasio laju cahaya dalam vakum  $c$  terhadap laju cahaya  $v$  dalam material.

**Interferensi**, situasi dimana dua atau lebih gelombang tumpang tindih dalam ruang yang mengalami superposisi.

**Iris/selaput pelangi**, lapisan tipis di depan lensa mata yang berfungsi mengatur besar kecilnya celah pupil.

**Kamera**, ruang tertutup yang menghasilkan bayangan dari benda dan merekam benda itu pada film.

**Kisi difraksi**, sejumlah besar celah sejajar yang semuanya dengan lebar  $a$  yang sama dan antara pusat-pusat celah terpisah sejarak  $d$ .

**Kornea/selaput mata**, berupa selaput tipis yang kuat, tembus pandang, dan berfungsi sebagai pelindung mata dari gangguan luar.

**Lensa**, sistem optis dengan dua permukaan yang merefraksikan.

**Lensa bikonkaf**, lensa dengan dua permukaan cekung yang merefraksikan sinar secara divergen.

**Lensa bikonveks**, lensa dengan dua permukaan cembung yang merefraksikan sinar secara konvergen.

**Lensa cekung**, lensa yang merefraksikan sinar secara divergen.

**Lensa cekung cembung**, lensa yang memiliki permukaan cekung cembung yang merefraksikan sinar secara divergen.

**Lensa cekung datar**, lensa yang memiliki permukaan cekung datar yang merefraksikan sinar secara divergen.

**Lensa cembung**, lensa yang merefraksikan sinar secara konvergen.

**Lensa cembung cekung**, lensa yang memiliki permukaan cembung cekung yang merefraksikan sinar secara konvergen.

**Lensa cembung datar**, lensa yang memiliki permukaan cembung datar yang merefraksikan sinar secara konvergen.

**Lensa tipis**, lensa yang memiliki ketebalan sangat kecil dibanding dengan sifat optisnya, seperti radius, kurva kedua permukaan sferisnya, panjang fokus pertama dan kedua, dan jarak objek dan bayangan yang dibentuk.

**Lintasan optik**, hasil kali panjang lintasan sinar yang merambat dalam medium dengan indeks refraksinya.

**Lup**, lensa cembung yang digunakan untuk melihat bayangan benda kecil menjadi lebih besar.

**Mikroskop**, alat yang digunakan untuk melihat benda-benda ukuran kecil.

**Muka gelombang**, tempat posisi semua titik yang berdekatan di mana fasa getaran sebuah besaran fisika yang diasosiasikan dengan gelombang itu adalah sama.

**Miopia**, cacat mata yang hanya mampu melihat benda dekat dengan tajam yang diakibatkan oleh lensa mata menebal.

**Panjang fokus**, jarak dari titik api ke verteks cermin lengkung atau lensa

**Pelangi primer**, pelangi yang terjadi akibat cahaya matahari mengalami refleksi total satu kali dalam tetesan air.

**Pelangi sekunder**, pelangi yang terjadi akibat cahaya matahari mengalami refleksi total dua kali dalam tetesan air.

**Pelangi tersier**, pelangi yang terjadi akibat cahaya matahari mengalami refleksi total tiga kali dalam tetesan air.

**Penglihatan normal**, mata yang mampu melihat benda dekat sampai yang jauh dengan tajam.

**Polarisasi**, merupakan karakteristik untuk semua gelombang transversal.

**Prinsip Fermat**, menjelaskan jejak sinar refleksi dan refraksi dalam perjalanan dari satu titik ke titik yang lain memilih jejak di mana waktu perambatan mempunyai nilai minimum.

**Pupil**, celah lingkaran yang dibentuk iris dan tempat masuk cahaya ke retina melewati lensa.

**Refleksi**, peristiwa kembalinya sinar ke medium semula setelah menumbuk batas dua medium.

**Refleksi eksternal**, refleksi yang terjadi jika sinar berasal dari medium renggang ke medium rapat

**Refleksi internal**, refleksi yang terjadi jika sinar berasal dari medium rapat ke medium renggang dengan sudut datang sinar lebih kecil dari sudut kritis.

**Refleksi total**, refleksi yang terjadi jika sinar berasal dari medium rapat ke medium renggang dengan sudut datang sinar lebih besar dari sudut kritis.

**Refraksi**, peristiwa diteruskannya sinar ke medium selanjutnya setelah menyentuh batas dua medium.

**Retina**, bagian belakang dinding dalam bola mata yang berisi dua jenis sel yang sensitif terhadap cahaya dan berfungsi sebagai layar penerima cahaya.

**Saraf optik**, saraf yang meneruskan sinyal optik ke otak untuk diproses sebagai sinyal penglihatan.

**Sinar**, garis khayal sepanjang arah perjalanan gelombang cahaya.

**Sinar difus**, sinar yang merambat dengan tidak teratur akibat permukaan refleksi yang tidak rata.

**Sinar divergen**, sinar yang merambat dengan pola menyebar.

**Sinar gamma**, sinar yang dipancarkan dalam peluruhan radio aktif yang memiliki panjang gelombang sangat pendek, dalam orde  $10^{-12}$ m.

**Sinar konvergen**, sinar yang merambat dengan pola mengumpul.

**Sinar paraksial**, sinar yang merambat sangat dekat dengan sumbu utama

**Sinar ultraviolet**, sinar memiliki panjang gelombang yang sangat pendek dari panjang gelombang cahaya tampak.

**Sinar x**, sinar yang memiliki panjang gelombang dalam orde  $10^{-10}$  m.

**Sumbu utama**, garis khayal melalui cermin atau lensa secara tegak lurus pada permukaan.

**Teleskop**, alat yang digunakan untuk melihat benda-benda yang jaraknya jauh.

**Titik dekat**, titik yang paling dekat yang dapat dilihat oleh mata dengan tajam.

**Titik fokus**, Titik di mana sinar paralel mengumpul setelah refleksi dari sebuah cermin cekung, atau titik dimana sinar itu kelihatan disebarkan setelah refleksi dari sebuah cermin cembung. Titik di mana sinar paralel

ditransmisikan secara konvergen setelah refraksi dari sebuah lensa cembung, atau titik di mana sinar itu kelihatan disebarkan setelah refraksi dari sebuah lensa cekung.

**Titik fokus kedua**, sinar datang paralel pada medium pertama akan direfraksikan secara konvergen pada medium kedua menuju titik fokus, atau sinar datang paralel direfraksikan secara divergen pada medium kedua seakan sinar berasal dari titik fokus.

**Titik fokus pertama**, sinar-sinar divergen dari sumber titik fokus pada medium pertama dan mengalami refraksi secara paralel pada medium kedua, atau berkas sinar konvergen pada medium pertama menuju titik fokus dan mengalami refraksi secara paralel pada medium kedua.

**Titik jauh**, batas terjauh yang masih dapat dilihat secara tajam oleh mata telanjang.

**Vertex**, permukaan cermin atau lensa yang dilewati oleh garis sumbu utama.

**Vitreous humor**, cairan bening pengisi bola mata yang terletak di antara lensa mata dan retina. Vitreous humour berfungsi yang sama dengan aqueous humour, yaitu memberi bentuk dan kekakuan pada mata.





# OPTIKA

Riskan Qadar / Zeni Haryanto / Muliati Syam



**Riskan Qadar** Bin Muhammad Tahir Bin Made Ali Bin Kannawe, lahir di Tanete Barru sebuah desa yang sejuk di Kabupaten Barru. Menyelesaikan Pendidikan S1 Sarjana Pendidikan Fisika di UNM Makassar (IKIP Ujung Pandang). Diterima sebagai Dosen di Unmul (Universitas Mulawarman) tahun 1992. Tahun 1997 mengikuti Pendidikan S2 Magister Fisika di UGM Yogyakarta dan tahun 2010 melanjutkan S3 Pendidikan IPA/Fisika di UPI Bandung. Menikah dengan gadis pujaan bernama Andi Samsiah Petta Kerra dan dikarunia anak dua putra dan tiga putri (Ahmad Adha Abdullah, Indah Lutfiah, Risah Umamah, Sari Putri Lestari, dan Muhammad Luqman). Saat ini menjadi Kepala Laboratorium Pendidikan Fisika FKIP Unmul dan mengajar beberapa mata kuliah diantaranya Optika.



**Zeni Haryanto**, lahir dan menikmati masa kecil di Pariaman Sumatera Barat. Menyelesaikan pendidikan S1 Pendidikan Fisika di IKIP Padang, S2 dan S3 dalam bidang Pendidikan IPA/Fisika di UPI Bandung. Telah berkeluarga dengan satu istri dan empat orang anak yang gagah (Ruly, Hafizhan, Afhami, dan Fikri). Saat ini menjadi koordinator program studi pendidikan fisika di Universitas Mulawarman dan mengajar sejak 1994 di berbagai mata kuliah diantaranya Optika.

**Muliati Syam**, lahir di Birangloe Kabupaten Jeneponto Sulawesi Selatan tahun 1964. Pendidikan dimulai di SD Birangloe dan SMPN Allu Jeneponto. Melanjutkan ke Sekolah Analisis Kimia di Makassar dan kuliah D3 Pendidikan Fisika di Unmul Samarinda. Pendidikan S1 Sarjana Pendidikan Fisika di peroleh di UNM Makassar dan Pendidikan S2 Magister Pendidikan IPA/Fisika diperoleh di UPI Bandung. Menikah dengan Muhammad Arsyad dan dikarunia anak Ahmad Fitrah Auliansyah dan Citra Amalia Azzahra. Saat ini menjadi Ketua Divisi Akreditasi GJMF FKIP Unmul dan mengajar beberapa mata kuliah diantaranya Optika.



**Mulawarman  
University PRESS**

Penerbit Mulawarman University PRESS  
Gedung LP2M Universitas Mulawarman  
Jl. Krayan, Kampus Gunung Kelua  
Samarinda 75123 Telp/Fax (0541) 747432  
Email : mup.unmul@gmail.com

ISBN 978-602-6834-80-5



9 786026 834805