

Fisika Bangunan I

- Pengantar Fisika Bangunan
- Pencahayaan
- HVAC
- Pengontrolan Energi Dalam Bangunan

Pustaka :

- Prasasto Satwiko, Fisika Bangunan Edisi 1, Penerbit Andi, 2004

Fisika Bangunan

- Fisika Bangunan merupakan cabang ilmu Fisika yang mempelajari fenomena fisika yang terjadi pada suatu bangunan yang mempengaruhi faktor kenyamanan manusia
- Faktor yang mempengaruhi kenyamanan manusia berupa :
 - Temperatur udara
 - Kelembaban udara
 - Kejernihan dan oksigen
 - Pergerakan udara (Angin) : berpengaruh pada temperatur, bau, sweating (keringat), debu
 - Pencahayaan
 - Akustik

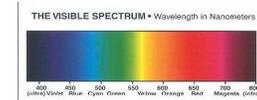
Pencahayaan

Definisi Cahaya

- Cahaya merupakan energi radian yang mampu mengeksitasi retina mata sehingga menimbulkan sensasi terang.
- Energi radiasi yang dapat dievaluasi secara visual (IES, 1972)
- Bagian dari spektrum radiasi elektro-magnetik yang dapat dilihat (*visible*) (Gigahertz-Optik, 2002)
- Fungsi cahaya selain sebagai media perceptual, cahaya dengan mengandung warna juga memiliki fungsi impresif (kesan) seperti :
 - estetika
 - kondisi : romantis, ramai (kilat lampu pesta)
 - ilusi : Efek Purkinje, pada saat intensitas cahaya rendah sensasi warna akan turun ke panjang gelombang yang lebih rendah (kearah ungu)

Spektrum Cahaya

- Cahaya berada pada daerah panjang gelombang 400 nm s.d. 800 nm (atau 380 nm s.d. 780 nm) yang disebut *visible light*
- Di luar daerah tersebut, mata manusia tidak sensitif -> di bawah 400 nm disebut ultraviolet, di atas 800 nm disebut inframerah



Ultraviolet

Terbagi tiga berdasarkan efek yang ditimbulkan:

- UV-A (315~400 nm): energi paling rendah, tidak berbahaya, untuk fototerapi
- UV-B (280~315 nm): paling berbahaya, menimbulkan kanker
- UV-C (100~280 nm): sangat mudah terserap di udara, untuk pemurnian air dan udara

Inframerah

Mengandung energi paling rendah, umumnya berbentuk panas; terbagi dua:

- IR dekat (770~1400 nm)
- IR jauh (1,4~1000 μm): untuk detektor

Sumber Cahaya

- Sumber cahaya alami : matahari, bulan, cahaya siang hari (*daylight*)
- Sumber cahaya buatan :
 - * Non-listrik : lilin, obor, lentera, dsb.
 - * Listrik
 - *Incandescent* : lampu pijar
 - Pelepasan gas : lampu fluoresen, lampu *high intensity discharge*, dsb.

Teori Mengenai Energi Radian

Teori Corpuscular Newton :

- Benda bercahaya memancarkan energi radian dalam bentuk partikel
- Partikel yang dipancarkan dalam lintasan garis lurus
- Partikel sampai ke retina, menstimulasi syaraf optis dan menghasilkan sensasi terang

Teori gelombang Huygens :

- Cahaya dihasilkan oleh vibrasi molekul dari benda bercahaya
- Vibrasi ditransmisikan melalui 'ether' sebagai gerakan seperti gelombang
- Vibrasi sampai ke retina

Teori Elektromagnetik Maxwell

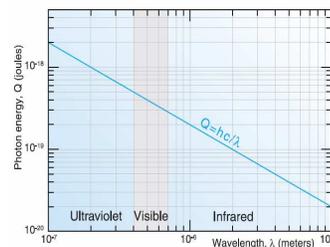
- Benda bercahaya memancarkan cahaya dalam bentuk energi radian.
- Energi radian dipropagasikan dalam bentuk gelombang elektromagnetik ke retina

Teori Kuantum Cahaya

- Daya optik [watt] : laju energi foton [joule per detik]
- Daya optik merupakan fungsi jumlah foton dan panjang gelombang. Setiap foton membawa energi sebesar: $Q = hc/\lambda$
 - Q = energi foton [joule]
 - h = konstanta Planck [=6,623×10⁻³⁴ J.s]
 - c = kecepatan cahaya [=2,998×10⁸ m/s]
 - λ = panjang gelombang [m]

Teori Kuantum Cahaya

- UV memiliki energi foton lebih besar daripada cahaya tampak atau IR

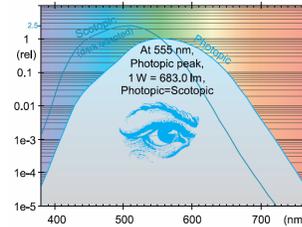


Cahaya Tampak

- Lumen : analogi fotometri dari watt, disesuaikan dengan respon mata manusia
- Mata manusia paling sensitif pada panjang gelombang 555 nm (hijau kekuningan)
- 1 watt pada 555 nm = 683 lumen

Cahaya Tampak

Kurva sensitivitas mata manusia:



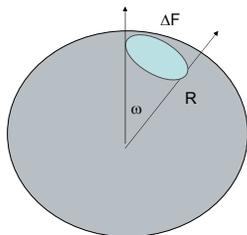
Fotometri

- Meliputi pengukuran aspek-aspek psikofisis dari energi elektromagnetik yang dapat terlihat oleh mata manusia
- Menggunakan istilah 'luminus' : mengacu pada cahaya tampak

Besaran kuantitatif cahaya

- Fluks radian (satunya Watt, notasi P) : Energi radian yang sampai pada suatu permukaan per satuan waktu.
- Fluks Luminous (satunya lumen, notasi F) : Fluks radian yang dinilai terhadap kemampuannya untuk menimbulkan rangsangan terang
- Intensitas Cahaya (satunya Candela, Notasi I) : Kuat cahaya yang dikeluarkan oleh sebuah sumber cahaya ke arah tertentu. Sebuah sumber cahaya berintensitas 1 Candela (1 lilin) mengeluarkan cahaya total ke segala arah sebanyak 12,57 lumen.

- 12,57 adalah luas kulit bola berjari-jari 1 meter dengan sumber cahaya sebagai titik pusatnya. Jadi 1 Candela = 1 lumen / steradian



$$I = \Delta F / \Delta \omega$$

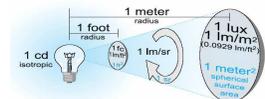
$$\omega = A / R^2 \text{ [steradian]}$$

- Distribusi Intensitas : Pola Intensitas di setiap arah sudut pencahayaan (θ) sehingga intensitas ditulis $I(\theta)$

Besaran kuantitatif cahaya (2)

- Iluminansi (satunya lux, lumen/m², notasi E) Terkadang disebut tingkat penerangan merupakan banyaknya fluks luminous yang datang per satu unit bidang. 1 fc=footcandle = lumen/ft²

$$E = \frac{dF}{dA} = \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2} = \text{lux}$$



- Contoh tingkat penerangan :
 - Cahaya matahari dan cahaya langit 100.000 lux
 - Langit dengan bulan purnama : 92 lux

- Luminansi (Satuannya Candela/m², notasi L) : Intensitas cahaya yang dipancarkan, dipantulkan kembali atau diteruskan dari suatu unit bidang yang diterangi. Pada buku acuan lama sering digunakan satuan footLambert (fL) untuk membedakan Luminansi dan Iluminansi. FootLambert=Footcandle x Faktor Refleksi
- Contoh Luminansi :
 - Bulan : 2900 cd/m²
 - Lampu TL : 6000 cd/m²

Besaran kuantitatif cahaya (3)

- Faktor refleksi ρ : rasio fluks luminus yang dipantulkan suatu permukaan Φ_ρ terhadap fluks luminus yang datang; $\rho = \Phi_\rho / \Phi$
- Faktor transmisi τ : rasio fluks luminus yang diteruskan suatu permukaan Φ_τ terhadap fluks luminus yang datang; $\tau = \Phi_\tau / \Phi$

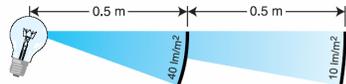
Besaran kuantitatif cahaya (4)

- Faktor absorpsi α : rasio fluks luminus yang diserap suatu permukaan Φ_α terhadap fluks luminus yang datang; $\alpha = \Phi_\alpha / \Phi$
- Eksitasi luminus M [lumen/m²] : fluks luminus yang dipancarkan atau dipantulkan per satuan luas permukaan A ;
 $M = \Phi_\rho / A = \rho E$ atau $\Phi_\tau / A = \tau E$

- DF (Daylight Factor) : Perbandingan antara iluminansi di satu titik di dalam ruangan dengan titik di luar ruangan. Harga DF tidak tetap, bila cahaya di luar meredup maka cahaya di dalam ruang akan ikut meredup
- Langit rancangan (Design Sky Light), luminan langit yang digunakan sebagai patokan perancangan yaitu kondisi langit yang terjadi sebanyak 90%. Untuk Indonesia dipakai 10.000 lux
- Hukum Kuadrat terbalik adalah hukum yang mengatakan bahwa intensitas cahaya akan menjadi seperempat setiap kali jarak digandakan

Hukum Kuadrat Terbalik

- Hubungan antara iluminansi terhadap jarak: $E = I/d^2$
- Untuk intensitas luminus yang sama:
 $E_1 d_1^2 = E_2 d_2^2$



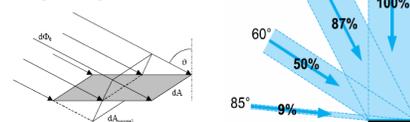
- Berlaku untuk sumber titik: jarak titik ke sumber sekurang-kurangnya lima kali dimensi terbesar sumber cahaya

Hukum Cosinus Lambert

- Iluminansi yang diterima suatu permukaan bervariasi terhadap sudut datang θ (diukur terhadap normal bidang permukaan):

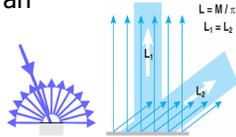
$$E_\theta = E \cos \theta$$

$$= (I/d^2) \cos \theta$$



Permukaan Lambertian

- Permukaan yang luminansinya sama jika dilihat dari segala arah; sebagian besar permukaan difus adalah Lambertian
- Permukaan Lambertian dengan luminansi 1 cd/m^2 akan meradiasikan πA lumen (A luas permukaan) ke arah 2π steradian, dengan eksitasi luminus $\pi (= \pi A/A)$ lumen/m²



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

Konversi Satuan Cahaya

- $1 \text{ lumen} = 1,464 \times 10^{-3} \text{ watt}$ (pada 555 nm)
 $= (1/4\pi) \text{ candela}$ (jika isotropik)
- $1 \text{ lux} (= \text{lm/m}^2) = 0,093 \text{ footcandle} (= \text{lm/ft}^2)$
 $= 10^{-4} \text{ phot} (= \text{lm/cm}^2)$
- $1 \text{ cd/m}^2 = \pi \text{ apostilb} (= \text{cd}/\pi/\text{m}^2)$
 $= 0,0929 \text{ cd/ft}^2$
 $= 0,2919 \text{ footlambert} (= \text{cd}/\pi/\text{ft}^2)$

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

26

Contoh Soal

Misalkan sebuah permukaan difus berbentuk lingkaran dengan jari-jari 1 meter dan faktor refleksi 85% menerima fluks cahaya sebesar 100π lumen pada bidang permukaannya. Berapakah luminansi, L , pada permukaan tersebut?

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

27

Solusi

Luas permukaan $A = \pi r^2 = \pi(1 \text{ m})^2 = \pi \text{ m}^2$

Iluminansi pada permukaan:

$$E = \Phi/A$$

$$= (100\pi \text{ lm})/(\pi \text{ m}^2) = 100 \text{ lm/m}^2 (=100 \text{ lux})$$

Eksitasi luminus pada permukaan:

$$M = \rho E$$

$$= (0,85)(100 \text{ lm/m}^2) = 85 \text{ lm/m}^2$$

Luminansi pada permukaan:

$$L = M/\pi$$

$$= (85 \text{ lm/m}^2)/\pi = 27,1 \text{ cd/m}^2$$

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

28

Jenis-jenis sumber cahaya

- Berdasarkan kealamiannya sumber cahaya dapat dibedakan menjadi :
 - Sumber pencahayaan alami :
Matahari, bintang, bulan
 - Sumber pencahayaan buatan :
Lampu penerangan

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

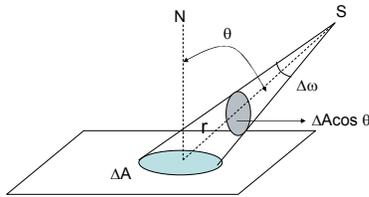
29

- Berdasarkan ukurannya dapat dibedakan menjadi :
 - sumber cahaya titik
 - sumber cahaya garis
 - sumber cahaya bidang
 Perhitungan tingkat penerangan dilakukan berdasarkan ukuran sumber cahaya. Sedangkan pengukurannya menggunakan lux meter

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

30

Tingkat Penerangan dari sumber titik



S = sumber cahaya titik

ΔA = Luas bidang

N = garis normal bidang

r = jarak sumber ke bidang

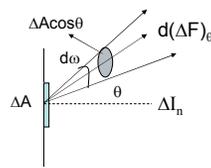
$$E = \frac{dF}{dA} = \frac{I \cos \theta}{r^2}$$

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

31

Tingkat Penerangan dari sumber cahaya bidang

- Luminansi (permukaan bercahaya)



$$\Delta I_{\theta} = \frac{d(\Delta F)_{\theta}}{d\omega}$$

Hukum Lambert :

$$\Delta I_{\theta} = \Delta I_n \cos \theta$$

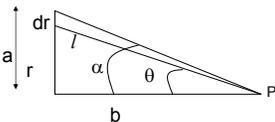
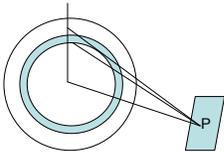
ΔIn = Intensitas pada arah normal terhadap bidang

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

32

- Untuk permukaan diffuse sempurna

$$L_{\theta} = \frac{\Delta I_{\theta}}{\Delta A \cos \theta} = \frac{\Delta I_n \cos \theta}{\Delta A \cos \theta} = \frac{\Delta I_n}{\Delta A}$$



$$\Delta I_{\theta} = L \Delta A \cos \theta = L \cdot 2\pi r \cdot \Delta r \cos \theta$$

$$l = b \sec \theta$$

$$r = b \tan \theta$$

$$\Delta r = b \sec^2 \theta \cdot \Delta \theta$$

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

33

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= \frac{\Delta I_{\theta} \cos \theta}{l^2} = \frac{L \cdot 2\pi \cdot b \tan \theta \cdot b \sec^2 \theta \cdot \Delta \theta \cdot \cos^2 \theta}{b^2 \sec^2 \theta} \\ &= 2\pi \cdot L \sin \theta \cos \theta \Delta \theta \\ E_p &= \int_0^{\alpha} 2\pi \cdot L \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta = \pi L \sin^2 \alpha = \frac{\pi L a^2}{a^2 + b^2} \\ &= \frac{L A}{a^2 + b^2}; A = \text{luas piringan} \end{aligned}$$

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

34

Kebutuhan Iluminansi

No	Kerja Visual	Iluminansi (lux)
1	Penglihatan biasa	100
2	Kerja kasar dengan detail besar	200
3	Kerja umum dengan detail wajar	400
4	Kerja yang lumayan dengan detail kecil (studio, gambar, menjahit)	600
5	Kerja keras, lama, detail kecil (perakitan barang halus, menjahit dgn tangan)	900
6	Kerja sangat keras, lama detail sangat kecil (pemotongan batu mulia, tisik halus, mengukur benda sangat kecil)	1300-2000
7	Kerja luar biasa keras, detail sangat kecil (arloji dan pembuatan instrumen kecil)	2000-3000

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

Alat-alat Ukur Cahaya

- Luxmeter -> iluminansi
- Luminansi-meter -> luminansi
- Bola integrator -> fluks luminus
- Intensitas-meter -> intensitas luminus
- Reflektometer -> faktor refleksi

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

36

Luxmeter

- Digunakan untuk mengukur iluminansi (tingkat pencahayaan) pada suatu permukaan dalam satuan lux (lx) atau footcandle (fc)
- 1 lux = tingkat pencahayaan pada permukaan seluas 1 m² yang dijatuhkan fluks luminus sebesar 1 lumen
- 1 footcandle = tingkat pencahayaan pada permukaan seluas 1 ft² yang dijatuhkan fluks luminus sebesar 1 lumen



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

Luxmeter

- Terdiri dari badan, sel cahaya (*photo cell*) atau sensor cahaya, dan tampilan (*display*)
- Sensor cahaya terdiri dari input optik, filter, dan detektor



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

38

Luxmeter

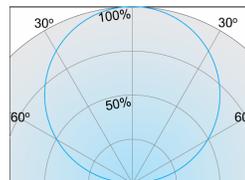
- Cahaya yang jatuh pada sensor mengandung energi -> dikonversi menjadi arus listrik
- Arus listrik dibaca, dikalkulasi harganya, dan hasilnya ditampilkan pada keluaran analog, digital, atau tampilan video
- Pembacaan umumnya terdiri dari gabungan seluruh panjang gelombang cahaya

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

39

Input Optik

- Dipertimbangkan dari ukuran sumber dan sudut pengamatan
- Sel silikon termasuk permukaan yang sangat difus : difusor cosinus

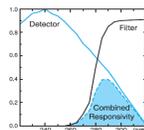


Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

40

Filter

- Rentang frekuensi filter berkurang seiring dengan bertambahnya ketebalan
- Lapisan filter yang banyak akan memberikan faktor transmisi setara dengan perkalian faktor transmisi masing-masing filter
- Filter bekerja berdasarkan absorpsi ataupun interferensi



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

41

- Dipertimbangkan dari sensitivitas, ketahanan terhadap radiasi sinar tak tampak, linearitas, stabilitas, umur
- Fotodiode silikon : bahan lapisan-P pada permukaan peka cahaya dan bahan N pada substrat membentuk sambungan P-N, menghasilkan arus yang sebanding dengan cahaya datang



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

42

Detektor

- Fotodioda vakum *solar-blind* : didasarkan pada efek fotoemisif, berupa tabung bipolar yang terdiri dari permukaan katoda fotoemisif yang memancarkan elektron sebanding dengan cahaya datang, serta anoda yang bertugas 'mengumpulkan' elektron yang telah terpancar
- *Thermopile* multi-sambungan : mengukur yang diradiasikan, sensor di-segel dalam vakum untuk mencegah transfer kalor kecuali dari radiasi



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

Aplikasi Luxmeter

- Pengukuran tingkat pencahayaan di sekolah, rumah sakit, industri, laboratorium, jalan, dll.
- Pengukuran tingkat pencahayaan yang diterima benda-benda pameran pada museum, galeri seni, ruang arsip, dll.
- Pengukuran distribusi intensitas cahaya lumener (lampu)
- Video, fotografi, arsitektur

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

44

Luminansi-meter

- Digunakan untuk mengukur luminansi pada suatu arah dan permukaan tertentu dalam satuan candela/m² (cd/m²) atau footlambert (fl)
- 1 candela = intensitas cahaya dari permukaan dengan luas proyeksi 1 m² yang memancarkan fluks luminus sebesar 1 lumen jika ditinjau dari sudut ruang sebesar 1 steradian

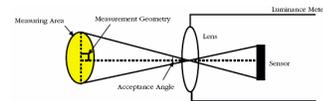


Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

45

Luminansi-meter

- Terdiri dari lensa obyektif, *mask* pengukuran, *photomultiplier*, lensa mata, cermin, dan tampilan
- Dalam pengukuran harus mempertimbangkan sudut penerimaan instrumen, luas permukaan yang diukur, serta geometri pengukuran terhadap sumber cahaya



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

46

Luminansi-meter

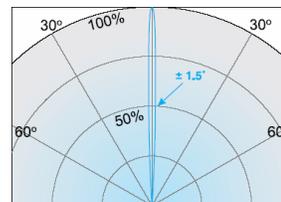
- Bayangan dari daerah yang diukur dibentuk oleh lensa obyektif pada *mask* pengukuran
- Sebagian cahaya diteruskan kepada *photomultiplier*, dikalkulasi, dan ditampilkan hasilnya pada keluaran
- Sebagian cahaya dipantulkan kepada cermin, dipantulkan lagi ke lensa mata

Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

47

Lensa

- Umumnya digunakan sistem lensa ganda dengan sudut penglihatan kurang dari 4°
- Adanya pengurangan sinyal yang diterima



Fisika Bangunan - I Jeffry Handoko P. S.T, M.T

48

Aplikasi Luminansi-meter

- Pengukuran luminansi dari televisi, monitor komputer
- Pengukuran luminansi dan pemerataan luminansi permukaan jalan
- Pengukuran kesilauan yang disebabkan oleh lampu, dsb.

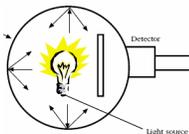
Bola Integrator

- Digunakan untuk mengukur fluks luminus yang dipancarkan suatu sumber cahaya (lampu) dalam satuan lumen
- 1 lumen = laju energi cahaya yang setara dengan 1/683 watt pada 555 nm
- Berupa dua bagian 1/2 bola yang disatukan, permukaan dalamnya berwarna putih, sangat reflektif dan difus



Bola Integrator

- Dilengkapi dengan penghalang (mencegah diterimanya cahaya langsung) serta lubang untuk meletakkan sensor luxmeter
- Cahaya dari sumber dipantulkan berkali-kali sebelum diterima oleh sensor
- Diameter dalam bola harus sekurang-kurangnya 10 kali dimensi terbesar dari lampu (2 kali untuk lampu tabung)



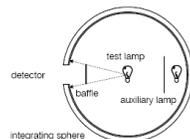
Bola Integrator

- Fluks luminus dari lampu yang diuji:

$$\Phi = EA(1 - \rho)/\rho$$
 dengan
 E iluminansi tak langsung dari lampu uji
 A luas permukaan dalam bola integrator
 ρ faktor refleksi permukaan dalam bola integrator

Bola Integrator

- Faktor refleksi tidak selalu diketahui
- Digunakan lampu referensi yang telah diketahui harga fluks luminusnya
- Disarankan menggunakan lampu bantu dengan penghalang untuk mengoreksi efek dari aksesoris lampu



Bola Integrator

- Fluks luminus dari lampu yang diuji:

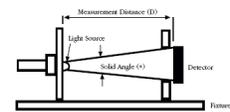
$$\Phi = \Phi_S (E/E_S)(E_{HS}/E_H)$$
 dengan
 Φ_S fluks luminus lampu referensi
 E iluminansi tidak langsung dari lampu uji
 E_S iluminansi tidak langsung dari lampu refr.
 E_{HS} iluminansi tidak langsung dari lampu bantu (lampu referensi dimatikan)
 E_H iluminansi tidak langsung dari lampu bantu (lampu uji dimatikan)

Intensitas-meter

- Digunakan untuk mengukur intensitas luminus yang dihasilkan suatu sumber cahaya pada suatu arah tertentu dalam satuan candela
- 1 candela = intensitas cahaya yang dihasilkan suatu sumber cahaya sebesar 1 lumen ditinjau dari sudut ruang sebesar 1 steradian

Intensitas-meter

- Terdiri dari detektor cahaya serta pengatur jarak
- Tergantung pada susunan geometris terhadap sumber cahaya
- Sudut ruang diketahui dari luas permukaan detektor dan jarak antara sumber-detektor
- Detektor memberikan pembacaan fluks luminus dalam lumen



Referensi

- Gigahertz-Optik Tutorial. 2002.
- Kaufman, John (ed.). *IES Lighting Handbook, Fifth Edition*. 1972.
- Lindsey, Jack L. *Applied Illumination Engineering, Second Edition*. 1997.
- Minolta. *The Language of Light, From Perception to Instrumentation*.
- Ryer, Alex. *Light Measurement Handbook*. 1998.