

**PENGANTAR
FISIKA KEDOKTERAN**

PENGANTAR FISIKA KEDOKTERAN

(Biolistrik, Biomagnetik, Biooptika, Radiasi Nuklir, Teknologi Sinar-X, dan MRI)

Bambang Murdaka Eka Jati



GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS

PENGANTAR FISIKA KEDOKTERAN

Biolistrik, Biomagnetik, Biooptika, Radiasi Nuklir, Teknologi Sinar-X, dan MRI

Penulis:

Bambang Murdaka Eka Jati

Penyunting bahasa:

Ratna Mariastuti

Desain sampul:

Pram's

Tata letak isi:

Didi

Zendy

Penerbit:

Gajah Mada University Press

Anggota IKAPI dan APPTI

Ukuran : 15,5 × 23 cm; xx + 322 hlm

ISBN:

Redaksi:

Jl. Sendok CT VIII Karanggayam, Caturtunggal

Depok, Sleman, D.I. Yogyakarta 55281

Telp./Fax : (0274) 561037

ugmpress.ugm.ac.id | gmupress@ugm.ac.id

Cetakan pertama: -

Hak penerbitan © 2022 Gajah Mada University Press

Dilarang mengutip dan memperbanyak tanpa izin tertulis dari penerbit, sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apa pun, baik cetak, photoprint, microfilm, dan sebagainya.

PRAKATA

Penulis bersyukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena dengan ridha-Nya telah dapat menyelesaikan penulisan buku teks ini. Harapan penulis, buku ini dapat memberikan kemanfaatan bagi pembaca. Tentu saja, buku ini diharapkan tidak hanya untuk dibaca, tetapi jika memungkinkan untuk dapat diterapkan dalam keseharian sehingga pembaca dapat melakukan aktivitas secara lebih bijaksana.

Buku ini diberi judul *Pengantar Fisika Kedokteran* yang terkait topik Listrik-Magnet, Gelombang Elektromagnet-Optika, Radiasi Nuklir, serta Teknologi Sinar-X dan MRI. Hal tersebut dapat dimaknai bahwa buku ini memuat materi fisika yang diterapkan pada sejumlah kasus yang berkaitan dengan ilmu kedokteran. Kata “Pengantar” pada judul buku ini bermakna tingkat landasan pengetahuannya adalah Fisika Dasar. Artinya, landasan teoretis yang digunakan dan persamaan matematika yang terlibat masih sederhana.

Buku ini ditulis oleh penulis yang berlatar belakang fisika medis sehingga sejumlah peristilahan merupakan peristilahan dalam ilmu fisika. Walaupun demikian, paparan materi di dalam buku ini diupayakan sedekat mungkin dengan karakter ilmiah dalam ilmu kedokteran. Hal tersebut dikaitkan dengan pengalaman penulis sebagai dosen pengampu mata kuliah Fisika Kedokteran di Departemen Fisika (FMIPA) dan di Fakultas Kedokteran Gigi, UGM.

Berhubung landasan fisika yang dipakai adalah Fisika Dasar yang diterapkan pada ilmu kedokteran, buku ini cocok digunakan sebagai buku teks bagi mahasiswa program sarjana Fisika (Kelompok Berbasis Keahlian/KBK: Fisika Terapan dan Fisika Medis), program sarjana (Pendidikan Dokter dan Keperawatan, Pendidikan Dokter Gigi) pada mata kuliah terintegrasi, juga bagi mahasiswa sekolah vokasi pada program studi Metrologi serta Rekam Medis. Bahkan, bidang ilmu apa pun yang berkaitan dan memerlukan topik ini dapat memanfaatkannya. Tentu saja, penulis menjadi lebih gembira jika semakin banyak pihak yang menggunakannya.

Selain itu, diharapkan, sejumlah pemaparan di dalam buku ini juga dimaksudkan untuk dapat menginspirasi gagasan kepada pembaca guna melakukan kegiatan penelitian yang menghasilkan karya ilmiah. Tentu saja, karya ilmiah tersebut dapat digunakan untuk mengikuti lomba Pekan

Ilmiah Mahasiswa Nasional (Pimnas) ataupun dalam rangka membuat skripsi. Bukankah masalah yang berkaitan dengan kesehatan manusia terus berkembang? Nah, semoga buku ini sebagai salah satu sarana untuk menjawabnya.

Buku ini ditulis, sebagian, berdasar pengalaman penulis selama tugas mengajar mata kuliah Fisika Kedokteran. Karenanya penulis sangat mengapresiasi Pak Gabriel (Universitas Udayana, Bali) dengan buku teksnya yang telah menjadi inspirasi utama selama mengajar dan tentunya juga pada sajian di dalam buku ini. Adapun materi yang disajikan di dalam buku ini merupakan kelanjutan dari buku teks yang telah terbit sebelumnya yaitu *Pengantar Fisika Kedokteran (Mekanika, Fluida, Gelombang, dan Kalor)*. Adapun paparan pada buku teks ini meliputi: Biolistrik, Biomagnet, Gelombang Elektromagnetik, Optika dan Indra Penglihatan, Atom dan Radiasi Nuklir, Sinar-X dan Tomografi, serta MRI.

Berhubung buku ini ditulis untuk difungsikan sebagai buku teks maka orientasi sajian di dalamnya adalah untuk mudah dimengerti oleh pembaca. Karenanya, buku ini disajikan dalam bahasa yang sederhana dan meminimalisasi keterlibatan persamaan matematika yang rumit. Selain itu, penekanan pesan pada buku teks tentu berbeda dengan majalah ilmiah yang selalu mengacu hasil riset terkini. Sebagai buku teks, buku ini lebih berorientasi pada sistematika materi ajar. Karenanya bersifat lebih terstruktur yang berbasis pengalaman penulis dalam mengajar sehingga bisa saja referensi yang digunakan sudah cukup tua, namun tetap digunakan karena berperan sebagai landasan dari perkembangan ilmu terkini.

Penulis meyakini buku ini masih jauh dari sempurna. Karenanya, segala masukan dari pembaca akan penulis terima dengan senang hati. Diharapkan dari masukan tersebut dapat penulis manfaatkan untuk perbaikan pada cetakan berikutnya. Akhir kata, penulis ucapkan terima kasih kepada semua pembaca buku ini.

Yogyakarta, April 2022

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
BAB I BIOLISTRIK.....	1
1.1 Dasar-Dasar Kelistrikan.....	3
1.2 Listrik Frekuensi Rendah dan Tinggi.....	20
1.3 Sengatan Listrik.....	29
1.4 Kelistrikan di Dalam Tubuh.....	35
1.5 Elektroda.....	46
1.6 Isyarat Listrik Tubuh dan Produk Peralatannya.....	49
Soal-Soal Latihan BAB I.....	68
BAB II BIOMAGNETIK.....	71
2.1 Dinamika Kemagnetan.....	72
2.2 Magnet dan Jaringan Tubuh.....	78
2.3 <i>Flowmeter</i> Magnet.....	80
2.4 Isyarat Magnetis.....	83
Soal-Soal Latihan BAB II.....	86
BAB III GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK.....	89
3.1 Gelombang Elektromagnetik: Karakteristik dan Sumbernya.....	90
3.2 Spektrum Gelombang Elektromagnetik dan Komponennya.....	98
3.3 Besaran Fisika pada Gelombang Elektromagnetik.....	102
3.4 Cahaya dan Alat Ukurnya.....	107
3.5 Sinar dalam Bidang Kedokteran.....	113
3.6 Laser.....	117
Soal-Soal Latihan BAB III.....	121
BAB IV BIOOPTIKA DAN INDRA PENGLIHATAN.....	123
4.1 Melihat Benda dan Kesan Warna Benda.....	124
4.2 Optika.....	128
4.3 Cacat Lensa.....	132
4.4 Mata.....	136

4.5	Ide Teknologi Berbasis Mata.....	150
4.6	Karakter Mata.....	154
4.7	Tes Mata dan Peralatannya.....	156
	Soal-Soal Latihan BAB IV.....	164
BAB V	ATOM DAN RADIASI NUKLIR.....	167
5.1	Atom.....	168
5.2	Radioaktivitas.....	175
5.3	Disintegrasi Nuklir.....	181
5.4	Radioisotop dan Radiasinya.....	184
5.5	Radasi Pengion pada Jaringan Tubuh.....	186
5.6	Terapi Radiasi.....	194
5.7	Proteksi Radiasi.....	203
5.8	Detektor Radiasi.....	207
5.9	Radioisotop untuk Diagnostik dan Pengobatan.....	215
	Soal-Soal Latihan BAB V.....	226
BAB VI	SINAR-X DAN TOMOGRAFI.....	229
6.1	Hakikat Sinar-X.....	230
6.2	AC.....	237
6.3	Untai Listrik pada Sinar-X.....	242
6.4	Tabung Sinar-X.....	245
6.5	Produksi Sinar-X.....	247
6.6	Citra Sinar-X.....	251
6.7	CT-Scan.....	253
	SOAL-SOAL LATIHAN BAB VI.....	257
BAB VII	MRI.....	259
7.1	Sejarah MRI.....	260
7.2	NMR.....	265
7.3	Teknologi MRI.....	272
7.4	Dinamika MRI.....	283
	Soal-Soal Latihan BAB VII.....	284
	KUNCI JAWABAN.....	285
	SOAL EVALUASI PRA-UAS.....	299
	DAFTAR PUSTAKA.....	307
	LAMPIRAN.....	311
	GLOSARIUM.....	315
	INDEKS.....	317
	TENTANG PENULIS.....	321

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Efek sengatan listrik oleh AC frekuensi 60 Hz pada durasi 1 sekon	33
Tabel 1.2	Nilai potensial kontak pada beragam bahan elektroda....	46
Tabel 4.1	Titik dekat seseorang bergantung pada usianya	136
Tabel 5.1	Perbedaan karakteristik antara jenis radiasi α , β , γ	174
Tabel 5.2	Umur paruh dan jenis radiasinya pada sejumlah unsur radioaktif	180
Tabel 5.3	Sejumlah contoh radioisotop dan karakteristiknya yang digunakan untuk medis	182
Tabel 5.4	Nilai kesetaraan rad terhadap R oleh radiasi sinar-X pada sejumlah tegangan terpasang dan sinar gamma pada sejumlah jaringan dan energi radiasi	185
Tabel 5.5	Nilai RBE oleh radiasi GEM dan partikel	191
Tabel 5.6	Dosis maksimum diperkenankan bagi pekerja radiasi dan masyarakat umum	200
Tabel 5.7	Perbandingan antara dosis organ kritis dengan dosis gonade ketika radioisotopnya sejenis.....	219
Tabel 6.1	Spektrum GEM dan karakteristiknya	227
Tabel 6.2	Faktor atenuasi pada sejumlah bahan	248

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	(a) Dipol listrik di ruang bermedan listrik sehingga menderita torsi, (b) dipol listrik oleh H_2O bermomen dipol listrik dari atom hidrogen ke oksigen	5
Gambar 1.2	(a) Tanpa medan listrik maka momen dipol listriknya berarah acak, (b) adanya medan listrik membuat momen dipol listrik terorientasi sejajar dengan medan listrik.....	7
Gambar 1.3	Bagan kapasitor; (a) pelat sejajar, (b) silinder, dan (c) bola.....	8
Gambar 1.4	(a) Bagan sebuah neraca elektronis dengan memanfaatkan regangan pegas dan melibatkan sensor kapasitif, (b) kapasitor silinder dapat dimanfaatkan untuk mengukur kedalaman air.....	10
Gambar 1.5	Sejumlah pola (a) DC berupa tetapan (2) dan fungsi waktu (1, 3, 4), (b) AC fungsi waktu (1, 2).....	11
Gambar 1.6	Bagan untai tertutup yang salah satu titiknya diketanahkan sehingga dengan KVL dapat ditentukan arus listrik mengalir dan potensial listriknya di setiap titik	15
Gambar 1.7	Sebuah untai listrik yang memuat dua buah <i>loop</i> yang melibatkan 2 baterai dan 5 buah resistor	16
Gambar 1.8	Bagan arus listrik (fungsi waktu) untuk: (a) DC dan (b) AC	18
Gambar 1.9	Pola arus listrik searah: (a) setengah gelombang, (b) arus searah penuh memuat desir, (c) arus searah murni, (d) arus galvanik terputus, dan (e) pola gigi gergaji....	19
Gambar 1.10	Pola arus listrik bolak-balik: (a) sinusoidal, (b) farodik, (c) sentakan farodik, dan (d) sentakan sinusoidal.....	20
Gambar 1.11	Arus farodik; (a) murni, (b) Smart-Bristow, dan (c) hasil simulasi elektronik	22
Gambar 1.12	Tipe impuls yang dimodifikasi: (a) segiempat, (b) trapesoidal, (c) segitiga, (d) gigi gergaji, dan (e) depolarisasi	23
Gambar 1.13	Bagan untai LC	23

Gambar 1.14	Pola osilasi: (a) <i>sustain</i> , (b) <i>unsustain</i> , (c) <i>damped</i> , (d) <i>undamped</i>	24
Gambar 1.15	Dimensi elektroda dan sasaran [(a) dimensi sasaran terlalu besar, (b) dimensi sasaran optimal], keseimbangan posisi elektroda-kulit [(c) tidak seimbang sebab $a < b$, (d) seimbang sebab $a = b$]	26
Gambar 1.16	Sebuah organ (paha) dililiti kabel AC frekuensi tinggi	27
Gambar 1.17	Pola lilitan kabel: (a) helik ceper, (b) <i>grid</i> , (c) helik tunggal, dan (d) helik ganda	27
Gambar 1.18	Penempatan sekring dan saklar: (kiri) benar, sebab di kawat <i>L</i> , dan (kanan) salah, sebab di kawat <i>N</i>	30
Gambar 1.19	Bagan KSL: (a) sengatan makro, (b) sengatan mikro, (c) contoh KSL, (d) sebaran tahanan di tubuh kita, dan (e) contoh KSL.....	32
Gambar 1.20	Bagan neuron (atas) di dalam sistem saraf motoris....	36
Gambar 1.21	(a) Ion <i>K</i> terdifusi dari konsentrasi tinggi ke rendah, (b) kondisi larutan ketika setimbang, membrannya menjadi sebuah dipol listrik.....	38
Gambar 1.22	Bagan sebaran ion di dalam dan di luar sel	39
Gambar 1.23	Sel dalam keadaan istirahat; (a) penampilan ionnya (<i>Na⁺</i>) dan (b) penampilan muatan listriknya.....	40
Gambar 1.24	Bagan potensial listrik pada membran sel ketika: (a) epolarisasi, (b) depolarisasi.....	41
Gambar 1.25	Aktivitas tegangan pada membran sel ketika membran dalam kondisi istirahat.....	41
Gambar 1.26	Bagan membran sel dan potensial aksi: (a) semula, (b) ada rangsangan, sehingga terjadi depolarisasi.....	42
Gambar 1.27	Periode potensial listrik pada membran sel	43
Gambar 1.28	Pola potensial aksi yang bergantung pada jenis selnya: (a) akson, (b) sel otot bergaris, (c) sel otot jantung	43
Gambar 1.29	(a) Bagan saraf sinapsis, (b) aliran listrik pada saraf sinapsis	44
Gambar 1.30	(a) Depolarisasi spontan pada miokardium, (b) kecepatan dasar membran sel otot jantung	44
Gambar 1.31	Bagan dinamika <i>natural rate</i>	45
Gambar 1.32	Jantung dan alat bantu <i>pacemaker</i>	46
Gambar 1.33	Bagan: (a) elektroda jarum dan (b) elektroda mikropipet	48

Gambar 1.34	Bagan elektroda <i>floating</i>	48
Gambar 1.35	(a) Bagan jantung beserta fungsinya, dan (b) lokasi titik berdenyut yang memberikan beda potensial oleh biolistrik jantung	50
Gambar 1.36	(a) Bagan-bagan garis ekuipotensial oleh denyut jantung, dan (b) bagan momen dipol listriknya	51
Gambar 1.37	(a) Bagan 3 bidang proyeksi pada tubuh pasien, dan (b) bagan 3 titik berbeda potensial pada proyeksi bidang frontal	52
Gambar 1.38	(a) Bagan praktis penentuan Lead I, II, III, dan (b) penentuan beda potensial Lead I, II, III dengan menggunakan resistor 5 kohm	53
Gambar 1.39	Hasil rekam EKG oleh: (a) Lead I, (b) Lead II, dan (c) Lead III	53
Gambar 1.40	Prinsip kerja EKG berdasar informasi potensial listrik dari tubuh pasien hingga tersajikan pada unit penampil	54
Gambar 1.41	Pola gelombang hasil perekaman dengan EKG.....	55
Gambar 1.42	Makna pola gelombang hasil rekam EKG: (a) <i>PR</i> segmen, (b) <i>QRS</i> kompleks, (c) <i>ST</i> segmen, (d) gelombang <i>T</i> , dan (e) gelombang <i>U</i>	56
Gambar 1.43	Potret EEG ketika sedang digunakan dan direkam oleh komputer.....	57
Gambar 1.44	Bagan kerja EEG.....	57
Gambar 1.45	Sistem elektroda EEG: (a) dari samping, dan (b) dari atas	58
Gambar 1.46	Bagan pola gelombang EEG: (a) δ , (b) θ , (c) α , dan (d) β	59
Gambar 1.47	Bagan cara mengukur potensial aksi sel otot tunggal	60
Gambar 1.48	Bagan kerja EMG pada serat otot	61
Gambar 1.49	Bagan pola potensial listrik (<i>A, B, C</i>) fungsi waktu pada sinyal EMG otot bisep	61
Gambar 1.50	(a) Bagan penentuan laju konduksi saraf motoris, (b) hasil pemantauan sinyalnya di layar osiloskop	62
Gambar 1.51	(a) Bagan penentuan laju konduksi saraf sensoris, (b) hasil pantau sinyal di layar osiloskop	63
Gambar 1.52	EKG dan proses pemantauannya	64
Gambar 1.53	Bagan kerja EKG.....	64

Gambar 1.54	(a) Bagan kerja ERG, (b) sinyal keluaran ERG di layar osiloskop	66
Gambar 1.55	Potret ERG ketika sedang digunakan untuk pengetesan retina pasien	66
Gambar 1.56	(a) Bagan keempat elektroda EOG ditempatkan, (b) layar sasaran	67
Gambar 1.57	Potret sebuah mesin EOG ketika sedang dioperasikan	68
Gambar 2.1	Bagan medan magnet luar dan medan magnet internal (di dalam bahan): (a) diamagnetik, (b) paramagnetik, dan (c) feromagnetik	74
Gambar 2.2	Momen dipol magnet: (a) setara dengan magnet batang, dan (b) terpengaruh oleh medan magnet luar	75
Gambar 2.3	(a) Bagan eksperimen Faraday untuk menghasilkan GGL induksi, (b) bagan sederhana <i>flowmeter</i> magnet	82
Gambar 2.4	Bagan blok dari <i>flowmeter</i> magnet	83
Gambar 2.5	Bagan penggunaan MCG (Gabriel, 1996).....	85
Gambar 2.6	Contoh data hasil rekam MCG (Gabriel, 1996).....	86
Gambar 3.1	Bagan GEM sebagai gelombang transversal	91
Gambar 3.2	Bagan gelombang transversal; tanda anak panah adalah arah getar gelombang	92
Gambar 3.3	Medan listrik yang dikerahkan oleh muatan listrik yang mengalami percepatan	96
Gambar 3.4	(a) Bagan spektrum GEM, dan (b) spektrum cahaya ..	99
Gambar 3.5	Bagan proses momentum linier oleh GEM yang mengenai sebuah titik muatan listrik.....	104
Gambar 3.6	Bagan elemen energi dU yang dibawa oleh GEM ke sumbu x	105
Gambar 3.7	Sebaran daya pada radiasi cahaya sebagai fungsi panjang gelombang tersebut (Gabriel, 1996).....	108
Gambar 3.8	Bagan eksperimen pengukuran kuat cahaya pada bohlam-2	110
Gambar 3.9	(a) Bagan fotometer Lummer dan Brodhun, (b) ketika kuat cahaya bohlam-1 masih berbeda dengan bohlam-2, (c) ketika kuat cahaya oleh bohlam-1 sama dengan oleh bohlam-2 (Gabriel, 1996).....	111
Gambar 3.10	(a) Bagan luxmeter, dan (b) bagan kerjanya	112

Gambar 3.11	Cahaya merambat di dalam fiber optik oleh pantulan sempurna	114
Gambar 3.12	(a) Bagan teknis untuk menghasilkan berkas laser, (b) elektron atau molekul tereksitasi baterai, kemudian mengalami emisi spontan, (c) hasil emisi spontan digunakan untuk melakukan emisi stimulasi pada partikel tereksitasi tetangganya	118
Gambar 3.13	Bagan pengaruh radiasi laser (pada beragam material laser) pada kulit putih yang bersih	120
Gambar 4.1	(a) Bagan keberadaan cahaya warna primer dan cahaya warna sekunder, (b) lacak cahaya di layar oleh tiga buah senter yang masing-masing memberikan cahaya primer berbeda	125
Gambar 4.2	(a) Gaun merah terkesan (oleh mata) tetap berwarna merah bila dijatuhkan cahaya putih, tetapi menjadi hitam bila dijatuhkan cahaya hijau atau biru; (b) papan dicat hasil campuran cat pigmen kuning dengan biru terlihat hijau ketika dijatuhkan cahaya putih.....	126
Gambar 4.3	(a) Bagan filter merah yang meneruskan cahaya merah dan (b) cahaya putih yang melewati filter kuning dan biru merah maka hanya cahaya hijau saja yang diteruskan	127
Gambar 4.4	(a) Cahaya putih melewati filter magenta dan jatuh di layar hijau, (b) cahaya putih melewati filter kuning dan jatuh di layar hijau	128
Gambar 4.5	Stephen Hawking (kiri) memberikan kuliah jarak jauh (di Cambridge, UK) dengan teknologi holografi	131
Gambar 4.6	Bagan aberasi speris oleh lensa yang terlalu cembung	133
Gambar 4.7	(a) Aberasi koma menyebabkan objek (berupa titik) membentuk bayangan (berupa koma); (b) pada astigmatisme sebuah objek menghasilkan dua bayangan; (c) objek yang tegak, oleh cacat medan, menyebabkan bayangan tampak melengkung	134
Gambar 4.8	(a) Bagan objek-bayangan oleh cacat distorsi, (b) diafragma di belakang lensa (positif), dan (c) diafragma di depan lensa (positif)	135

Gambar 4.9	(a) Aberasi kromatis oleh lensa positif, dan (b) oleh lensa negatif	135
Gambar 4.10	Upaya mengatasi aberasi kromatis pada lensa: (a) positif, dan (b) negatif	136
Gambar 4.11	(a) Bagan bola mata, (b) sejumlah komponen bola mata	137
Gambar 4.12	Bagan pembentukan bayangan pada bola mata	139
Gambar 4.13	Bola mata yang membiaskan sinar dari objek untuk mata: normal (atas), rabun jauh (kiri-bawah), dan rabun dekat (kanan-bawah)	143
Gambar 4.14	Bagan lintasan sinar dari objek pada cacat mata: (a) rabun jauh, (b) rabun dekat, dan (c) astigmatisme; adapun (d) menampilkan contoh objek terlihat paling jelas (pada sudut 20°) pada penderita astigmatisme	144
Gambar 4.15	Bagan kamera: (a) lubang jarum sederhana, dan (b) lubang jarum berlensa	151
Gambar 4.16	(a) Potret sebuah kamera digital yang berpenampilan serupa dengan kamera analog, (b) potret sebuah kamera digital minimalis hanya sebesar korek api.....	152
Gambar 4.17	Potret sebuah kacamata 3D.....	153
Gambar 4.18	(a) Bagan sistem holografi, (b) bentuk penyederhanaan kamera 3D	153
Gambar 4.19	(a) Peristiwa otak mengingat benda atau peristiwa, (b) kesetaraan antara mengingat objek oleh otak dengan sistem CCTV	154
Gambar 4.20	Bagan pencermian mata secara: (a) langsung, dan (b) tak langsung	157
Gambar 4.21	(a) Potret sebuah oftalmoskop, dan (b) tonometer Schoitz.....	158
Gambar 4.22	Bagan pemakaian tonometer Schoitz	159
Gambar 4.23	Bagan kerja retinoskop.....	159
Gambar 4.24	Perangkat retinoskop: (a) melibatkan cermin pemantul cahaya, dan (b) pencahayaan mandiri	160
Gambar 4.25	Bagan cara pengukuran daya lensa-x: (a) lensa standar, (b) lensa gabungan	161
Gambar 4.26	Bagan kerja sebuah lensometer.....	162
Gambar 4.27	Lensometer: (a) manual, (b) terotomatisasi	162
Gambar 4.28	Diameter pupil senilai jumlah diameter dari dua lubang lingkaran yang terlihat bersentuhan (Gabriel, 1996)....	163

Gambar 5.1	Bagan eksperimen Geiger dan Marsden	170
Gambar 5.2	Bagan eksitasi dan deeksitasi elektron pada model atom Bohr	172
Gambar 5.3	Teknik pengukuran paruh ketebalan (HVL) bahan yang diradiasi GEM (sinar gamma atau sinar-X).....	180
Gambar 5.4	Pola pemerosotan intensitas terusan sinar-X pada energi tunggal terkait untuk penentuan HVL pada bahan aluminium.....	180
Gambar 5.5	Pola radiasi pengion pada sasaran (tumor) dan sebaran dosisnya untuk: (a) sinar-X (200 kV), (b) ⁶⁰ Co, dan (c) betatron (22 MeV)	197
Gambar 5.6	(a) Penyinaran dengan satu luasan, (b) penyinaran dengan beberapa luasan: (b.1) dua arah 180°, (b.2) dua arah 90°, (b.3) tiga arah 60°, (b.4) empat arah 45°, dan (b.5) sasaran yang diputar	198
Gambar 5.7	Teknik <i>cross fire</i> dengan dua luasan.....	199
Gambar 5.8	Sebaran dosis dari tiga pasang luasan	199
Gambar 5.9	Bagan sebaran dosis pada terapi radiasi dengan teknik rotasi pada luas sasaran 6 ×10 cm ² dengan sudut putar: (a) 120°, (b) 180°, dan (c) 360° (Gabriel, 1996) ...	200
Gambar 5.10	Bagan GM <i>counter</i> ketika: (a) gas terionisasi oleh radiasi sinar γ , (b) terjadi perubahan beda potensial anoda-katoda, (c) siap dioperasikan kembali	209
Gambar 5.11	Pulsa tegangan oleh beda potensial anoda-katoda....	209
Gambar 5.12	Bagan sebuah PMT yang memuat anoda dan bagian depannya (ujung kiri) berupa kristal NaI(Tl) yang berperan sebagai detektor radiasi sinar γ	210
Gambar 5.13	Bagan kerja PMT (beserta detektornya) sehingga menghasilkan sinyal	210
Gambar 5.14	Sebuah spektrum hasil radiasi sinar γ yang ditampilkan oleh MCA	211
Gambar 5.15	Bagan sebuah pencacah radiasi dengan sampel (serbuk atau cairan yang berada di dalam tabung reaksi)	212
Gambar 5.16	Prinsip <i>rectilinear scanning</i> dengan GM <i>counter</i> paling sederhana	213
Gambar 5.17	Bagan <i>scanning</i> radiasi jaringan sampel dengan kamera gamma, tetapi sekarang CRO sudah digantikan dengan	

	osiloskop digital atau komputer dan kameranya sudah tidak diperlukan lagi	214
Gambar 5.18	Bagan proses pemantauan dinamika radiasi oleh salah satu ginjal pasien dalam bentuk cacah radiasi per menit sebagai fungsi waktu	217
Gambar 5.19	Isotop peradiasi gamma (^{60}Co) digunakan untuk operasi tumor otak secara efektif dan efisien, tetapi untuk tumor volume kecil	226
Gambar 6.1	(a) Bagan atom berat dalam keadaan normal, (b) sebuah elektron kulit K lepas karena ditembak oleh elektron energi besar, (c) transisi elektron ke kulit K mengemisi GEM dalam bentuk sinar-X	233
Gambar 6.2	Bagan interaksi sinar-X dengan atom penyusun objek: (a) hamburan, (b) efek fotolistrik, (c) efek Compton, (d) bentukan pasangan, dan (e) disintegrasi fotonuklir	234
Gambar 6.3	Hukum berbanding terbalik kuadrat terjadi pada intensitas radiasi terhadap jarak dari sumber sinar-X	236
Gambar 6.4	Perbedaan DC dengan AC dinyatakan oleh tegangan fungsi waktu; (a) DC, dan (b) AC	239
Gambar 6.5	(a) Generator bolak-balik penghasil tegangan listrik dua fasa, (b) tegangan sinusoidal dua fasa (A dan B)	240
Gambar 6.6	Untai AC dua fasa	240
Gambar 6.7	(a) Bagan generator AC tiga fasa, dan (b) sinyal tegangan yang dihasilkannya	241
Gambar 6.8	Bagan rangkaian 3 fasa dengan 4 kawat	242
Gambar 6.9	Arus listrik 3 fasa ketika: (a) tidak disearahkan, (b) disearahkan	242
Gambar 6.10	Bagan cara kerja sistem pemotretan objek dengan sinar-X	243
Gambar 6.11	Bagan untai listrik penghasil sinar-X.....	244
Gambar 6.12	(a) Bagan sebuah tabung sinar-X, (b) arus tabung jatuh pada sebuah <i>focal spot</i> selebar 1 mm	245
Gambar 6.13	Konstruksi anoda dari samping (a) dan dari depan (b)	246
Gambar 6.14	Sudut kemiringan pada <i>focal spot</i> lebih landai mampu memancarkan sinar-X lebih fokus; (a) sudut 30° dan (b) sudut 15°	246
Gambar 6.15	Bagan pancaran sinar-X menuju sasaran (target)	247

Gambar 6.16	Nilai tegangan fungsi waktu, pada nilai arus tabung tertentu ketika lebar <i>focal spot</i> -nya: (a) 0,6 mm dan (b) 1,0 mm	247
Gambar 6.17	Bagan peristiwa bremsstrahlung sehingga elektron kehilangan energi sebesar 80 keV	248
Gambar 6.18	Spektrum kontinu sinar-X yang dihasilkan dari bremsstrahlung.....	249
Gambar 6.19	Anoda tungsten; (a) proses didapatkannya sinar-X berenergi diskrit 58 keV, dan (b) karakteristik spektrum diskritnya.....	249
Gambar 6.20	Sinar-X yang dihasilkan oleh anoda berbahan molibdenum dan tungsten	250
Gambar 6.21	Pengaruh kVp terhadap spektrum sinar-X.....	250
Gambar 6.22	Sinar-X yang jatuh di sampel	251
Gambar 6.23	Serapan dan hamburan sinar-X oleh sampel bersifat menyumbang atenuasi (pemerostan) intensitas sinar-X	252
Gambar 6.24	Dua lapisan setengah nilai yang berfungsi untuk pemerostkan intensitas sinar-X sehingga tinggal $\frac{1}{4}$ dari semula	253
Gambar 6.25	(a) Bagan CT <i>scanner</i> , (b) proses pengubahan data analog menjadi data digital sebelum ditampilkan ke layar komputer.....	254
Gambar 6.26	(a) Bagan berkas sinar-X pada CT- <i>scan</i> yang dikaitkan dengan <i>voxel</i> dan pixel, dan tabung sinar-X dan detektornya; (b) detektor diam; dan (c) detektor berputar.....	255
Gambar 6.27	Radiasi sinar-X ke sampel berlintasan spiral.....	255
Gambar 6.28	Citra sampel dari CT- <i>scan</i> berupa penampang lintang organ sampel.....	256
Gambar 7.1	Bagan perjalanan riset menuju hasil teknologi MRI ...	264
Gambar 7.2	Kawat berupa cincin dialiri arus listrik sehingga berperan sebagai dipol listrik; (a) berarah ke atas, dan (b) berarah ke bawah	266
Gambar 7.3	Dipol magnet oleh spin proton ketika (a) spin naik dan (b) spin turun; waktu relaksasi (c) longitudinal dan (d) transversal	267

Gambar 7.4	(a) Di ruang tidak bermedan magnet MDMSPAH berarah acak, (b) ketika berada di ruang bermedan magnet maka populasi energi minimum lebih banyak daripada energi maksimum.....	268
Gambar 7.5	Proses munculnya sinyal NMR dari MDMSPAH; (a) berarah acak, (b) energi minimum, (c) mendapat radiasi RF, dan (d) ketika terjadi relaksasi (Westbrook, 2003).	269
Gambar 7.6	Bagan susunan komponen utama pada spektrometer NMR	273
Gambar 7.7	Contoh sinyal NMR yang dihasilkan dari sebuah molekul	275
Gambar 7.8	Bagan teknik perolehan karakter aliran darah pada ekor tikus dengan NMR	275
Gambar 7.9	(a) Potret sebuah MRI beserta bagian-bagiannya, (b) sistem magnet statis, (c) <i>shim coil</i> , dan (d) koil gradien serta elektromagnet.....	276
Gambar 7.10	Bagan kerja MRI	277
Gambar 7.11	Riset MRI oleh Damadian pada awal perkembangannya; tampak RC masih dililitkan pada tubuh sampel (kiri) dan diperoleh citra (berupa nilai tegangan) di sejumlah lokasi.....	278
Gambar 7.12	Hasil citra MRI ketika sistem elektromagnet dan RC yang berputar.....	279
Gambar 7.13	Bagan kerja MRI secara lengkap.....	279
Gambar 7.14	Sinyal NMR (dalam mV) pada otak sampel di sebuah lokasi dan arah tertentu bila dibanding dengan dua teknik lainnya.....	280
Gambar 7.15	Hasil citra otak dari salah satu sisi kepala oleh RC di sumbu- x , y , dan z berlandaskan relaksasi T_1 dan T_2	281
Gambar 7.16	Citra MRI dari darah bersih (putih) lebih kontras bila dibanding darah kotor (kusam); hal tersebut disebabkan ikatan dengan oksigen pada darah bersih jauh lebih banyak dari darah kotor sehingga waktu relaksasi kedua darah pun berbeda dan itu berakibat hasil citra MRI berbeda.....	282