



PENGANTAR FISIKA KEDOKTERAN

**ARSHY PRODYANATASARI, DITO ANUROGO,
JANNES BASTIAN SELLY, FITRIYANTI, FETRONELA RAMBU BOBU,
NURUL FUADI, SRI ZELVIANI, MUH. SAID L., SITI NURRAHMI,
SEFRILITA RISQI ADIKANING RANI**

PENGANTAR FISIKA KEDOKTERAN

**Arshy Prodyanatasari
Dito Anurogo
Jannes Bastian Selly
Fitriyanti
Fetronela Rambu Bobu
Nurul Fuadi
Sri Zelviani
Muh. Said L.
Sitti Nurrahmi
Sefrilita Risqi Adikaning Rani**



GET PRESS INDONESIA

PENGANTAR FISIKA KEDOKTERAN

Penulis :

Arshy Prodyanatasari
Dito Anurogo
Jannes Bastian Selly
Fitriyanti
Fetronela Rambu Bobu
Nurul Fuadi
Sri Zelviani
Muh. Said L.
Sitti Nurrahmi
Sefrilita Risqi Adikaning Rani

ISBN : 978-623-125-057-5

Editor : Dr. Neila Sulung, S.Pd., Ns., M.Kes.

Penyunting : Ilda Melisa, Amd., Kep.

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd.

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Februari 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Pengantar Fisika Kedokteran ini.

Buku ini membahas Radiologi medis, Radiasi Ionisasi dan Perlindungan Radiasi, Ultrasonografi, Terapi Radiasi, Fisika Jaringan dan Radiobiologi, Elektrokardiografi (EKG) dan Elektromiografi (EMG), Prinsip Gerak Tubuh dan Biomekanika, Penggunaan Energi dalam Kedokteran, Fisika dalam Diagnostik Laboratorium, Biofisika dan Ilmu Pengetahuan tentang Material Kedokteran.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Februari 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 RADIOLOGI MEDIS.....	1
1.1 Sejarah Radiologi	1
1.2 Dasar-Dasar Radiologi	4
1.3 Jenis-Jenis Pemeriksaan Radiologi	6
1.4 Prosedur dan Persiapan Melakukan Radiodiagnostik ..	6
1.5 Peralatan Pengukur Dosis Radiasi	7
1.6 Satuan Radiasi dan Nilai Ambang Batas untuk Pajanan Radiasi Ionisasi.....	7
1.7 Efek Radiasi	8
1.8 Ketentuan Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi ...	12
DAFTAR PUSTAKA.....	19
BAB 2 RADIASI IONISASI DAN PERLINDUNGAN RADIASI	23
2.1 Pengantar	24
2.1.1 Definisi dan Jenis-jenis Radiasi Ionisasi	24
2.1.2 Sejarah Penemuan dan Penerapan Radiasi Ionisasi dalam Kedokteran.....	24
2.1.3 Pentingnya Pemahaman Radiasi Ionisasi dalam Konteks Kesehatan	24
2.2 Dasar Fisika Radiasi Ionisasi	25
2.2.1 Prinsip Dasar Fisika Radiasi	25
2.2.2 Interaksi Radiasi dengan Materi: Absorpsi, Scatter, dan Transmisi.....	26
2.3 Sumber Radiasi Ionisasi dalam Kedokteran	26
2.3.1 Alat-alat Medis yang Menghasilkan Radiasi Ionisasi.....	26
2.3.2 Radiasi Ionisasi Alami dan Buatan dalam Konteks Medis.....	27
2.3.3 Radiasi dalam Diagnosis dan Terapi Medis.....	28
2.4 Efek Biologis Radiasi Ionisasi	28

2.4.1 Interaksi Radiasi dengan Sel dan Jaringan	
Biologis	28
2.4.2 Efek Radiasi pada DNA dan Potensi Mutagenik.....	29
2.4.3 Respon Immunologis terhadap Paparan Radiasi	29
2.5 Prinsip-prinsip Perlindungan Radiasi.....	30
2.5.1 Konsep ALARA (<i>As Low As Reasonably Achievable</i>)	30
2.5.2 Penggunaan Pelindung dan Perisai Radiasi.....	30
2.5.3 Protokol Keselamatan dan Pengawasan Dosis Radiasi	30
2.6 Teknologi Nanopartikel dalam Perlindungan Radiasi	31
2.6.1 Pengembangan Nanomaterial untuk Perlindungan Radiasi	31
2.6.2 Nanoteknologi dalam Deteksi dan Mitigasi Efek Radiasi	32
2.6.3 Studi Kasus: Penggunaan Nanopartikel dalam Terapi Radiasi.....	33
2.7 Aspek Hukum dan Etika dalam Penggunaan Radiasi..	34
2.7.1 Regulasi Internasional dan Nasional tentang Penggunaan Radiasi.....	34
2.7.2 Etika dalam Penggunaan Radiasi pada Pasien dan Penelitian.....	35
2.7.3 Kasus-kasus Kontroversial dan Studi Etika terkait Radiasi.....	35
2.8 Masa Depan dan Inovasi dalam Perlindungan Radiasi.....	35
2.8.1 Tren Terkini dan Penelitian Masa Depan dalam Fisika Radiasi	35
2.8.2 Peran Kecerdasan Buatan dan Big Data dalam Manajemen Risiko Radiasi	36
2.8.3 Visi Futuristik: Perlindungan Radiasi dalam Konteks Perjalanan Antariksa dan Kolonisasi Planet	36
2.9 Konklusi dan Rekomendasi	37
2.9.1 Konklusi	37
2.9.2 Implikasi untuk Praktisi Medis, Peneliti, dan Masyarakat.....	37

2.9.3 Arah Masa Depan dan Pertanyaan Terbuka di Bidang Ini	37
2.9.4 Rekomendasi	38
DAFTAR PUSTAKA	41
BAB 3 ULTRASONOGRAFI	45
3.1 Pendahuluan	45
3.2 Gelombang <i>Ultrasound</i>	45
3.3 Interaksi Gelombang <i>Ultrasound</i> dengan Materi	46
3.4 Teknik Ultrasonografi (USG)	47
3.5 Pemanfaatan USG dalam Bidang Kedokteran	51
3.5.1 USG Diagnosis	52
3.5.2 USG Terapi (Intervensi)	53
3.5.3 USG untuk Panduan Prosedur Tertentu	53
DAFTAR PUSTAKA	54
BAB 4 TERAPI RADIASI	55
4.1 Pendahuluan	55
4.2 Jenis Terapi Radiasi	57
4.2.1 Terapi radiasi eksternal	57
4.2.2 Terapi Radiasi Internal (Brakiterapi)	59
4.3 Prosedur Kerja Terapi Radiasi	62
4.4 Dampak Terapi Radiasi	66
DAFTAR PUSTAKA	70
BAB 5 FISIKA JARINGAN DAN RADIOBIOLOGI	71
5.1 Pendahuluan	71
5.2 Klasifikasi Radiasi dalam Radiobiologi	72
5.2.1 Radiasi Ionisasi	72
5.2.2 Radiasi Non-Ionisasi	74
5.3 Siklus Sel dan Kematian Sel	75
5.4 Paparan Radiasi Pada Sel	76
5.5 Jenis – Jenis Kerusakan Sel	78
5.5.1 Efek Somatik dan Genetik	79
5.5.2 Efek Stokastik dan Deterministik	79
5.6 Kurva Kelangsungan Hidup Sel	80
5.7 Kurva Dosis - Respon	81
DAFTAR PUSTAKA	84
BAB 6 ELEKTROKARDIOGRAFI (EKG) DAN ELEKTROMIOGRAFI (EMG)	85

6.1 Jantung.....	85
6.2 Kelistrikan pada Sel Jantung.....	86
6.2.1 Konduksi pada Sel Otot Jantung.....	86
6.2.2 Konduksi pada Sel Pacemaker	89
6.2.3 Siklus Jantung	91
6.3 Elektrokardiografi (EKG).....	91
6.3.1 Cara kerja Elektrokardiografi (EKG)	93
6.3.2 Jenis-jenis Elektrokardiografi (EKG)	98
6.4 Otot.....	99
6.5 Elektromiografi (EMG)	101
6.5.1 Fungsi Elektromiografi (EMG)	103
6.5.2 Jenis-Jenis Elektromiografi (EMG)	104
6.5.3 Cara Kerja Elektromiografi (EMG).....	105
DAFTAR PUSTAKA.....	108
BAB 7 PRINSIP GERAK TUBUH DAN BIOMEKANIKA.....	109
7.1 Pendahuluan	109
7.2 Hukum-Hukum Newton.....	110
7.2.1 Hukum Pertama Newton	110
7.2.2 Hukum Kedua Newton	111
7.2.3 Hukum Ketiga Newton.....	112
7.3 Analisis Gaya dan Kegunaan Klinik.....	114
7.4 Prinsip dalam Mekanika Tubuh.....	117
DAFTAR PUSTAKA.....	119
BAB 8 PENGGUNAAN ENERGI DALAM KEDOKTERAN....	121
8.1 Konsep Dasar Energi.....	121
8.2 Konsep Dasar Energi.....	123
8.3 Jenis Energi dalam Bidang Kedokteran.....	125
8.3.1 Energi Metabolisme	125
8.3.2 Energi Elektrokimia	126
8.3.3 Energi Listrik dalam Kardiovaskular	127
8.3.4 Energi Pada Proses Diagnostik.....	128
8.3.5 Energi Laser	130
8.3.6 Energi Ultrasonik	131
8.3.7 Energi Termal.....	131
8.3.8 Energi Nuklir	131
8.3.9 Energi Mekanik.....	132
8.3.10 Energi Biokimia.....	132

8.3.11 Energi Magnetik.....	132
8.3.11 Energi Gravitasi.....	132
8.3.12 Energi Cahaya (Selain dalam tTerapi Cahaya).....	132
8.3.13 Energi Sonik (Suara)	132
DAFTAR PUSTAKA.....	133
BAB 9 FISIKA DALAM DIAGNOSTIK LABORATORIUM....	135
9.1 Pendahuluan	135
9.2 Fisika dalam Diagnostik Laboratorium	135
9.2.1 Pemeriksaan Darah.....	136
9.2.2 Pemeriksaan Urine	137
9.2.3 Elektrokardiogram (EKG)	138
9.2.4 Radiografi Sinar-X	139
9.2.5 Ultrasonografi (USG)	141
9.2.6 Computed Tomography Scan (CT Scan).....	142
9.2.7 Magnetic Resonance Imaging (MRI)	144
DAFTAR PUSTAKA.....	146
BAB 10 BIOFISIKA DAN ILMU PENGETAHUAN	
TENTANG MATERIAL KEDOKTERAN	147
10.1 Pendahuluan	147
10.2 Biomaterial.....	148
10.2.1 Collagen	148
10.2.2 Printing 3D	150
10.2.3 Perancah Vaskular biodegradable	152
10.2.4 Pektin.....	154
10.3 Material dalam Fiksasi Fraktur	156
10.3.1 Keramik kalsium fosfat	157
10.3.2 Keramik glass	161
10.3.3 Polimer	162
10.3.4 Komposit.....	164
DAFTAR PUSTAKA.....	166
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Spektrum gelombang suara	46
Gambar 3.2. Jenis probe USG dan kegunaannya	48
Gambar 3.3. Salah satu citra sonografi (sonogram)	49
Gambar 3.4. Tahap pemrosesan sinyal dalam teknik USG.....	50
Gambar 4.1. Terapi Radiasi	55
Gambar 5.1. Proses Ionisasi.....	72
Gambar 5.2. Peran Radiasi Pengion.....	73
Gambar 5.3. Siklus Sel Pada Periode S dan M.....	75
Gambar 5.4. Perbedaan Kerusakan Pada DNA Secara Langsung dan Tidak Langsung.....	76
Gambar 5.6. Grafik Hubungan Fraksi Sel Yang Bertahan Hidup dengan Dosis pada <i>Low LET</i> dan <i>High LET</i>	80
Gambar 5.7. Sketsa kurva respon dosis untuk induksi kanker (kurva A, B, C, D) dan respons jaringan (kurva E)	81
Gambar 5.8. Sketsa kurva Kelangsungan Hidup Sel yang Merspon awal (A) dan akhir (B).....	82
Gambar 6.1. Bagian-bagian Jantung	86
Gambar 6.2. Konduksi jantung (proses depolarisasi jantung).....	87
Gambar 6.3. Gambaran Potensial Aksi Sel Pacemaker dan Sel Otot jantung	90
Gambar 6.4. Kaitan antara Sistem Konduksi Jantung dengan Gambaran EKG	92
Gambar 6.4. Lokasi Pemasangan Elektroda-Elektroda Ekstremitas dan Prekordial.....	96
Gambar 6.5. Bentuk Dasar EKG Normal dan Nama-Nama Interval	97
Gambar 6.7. Jenis-jenis otot.....	100
Gambar 6.8. Pemeriksaan saraf pasien menggunakan Elektromiografi.....	101
Gambar 7.1. Kelembaman bekerja pada mobil yang direm.....	111

Gambar 7.2. Benda dipengaruhi gaya (F) ; timbul percepatan (a)	112
Gambar 7.3. Gaya aksi dan gaya reaksi	113
Gambar 7.4. Tiga klas sistem pengumpul	114
Gambar 7.5. Traksi leher, traksi otot, traksi kulit, traksi kepala dan traksi kaki	117
Gambar 8.1. Energi yang dihasilkan oleh sel-sel tubuh	126
Gambar 8.2. Pengukuran ECG	128
Gambar 8.3. Pengukuran MRI dan CT scan	130
Gambar 8.4. Pemanfaatan energi laser	131
Gambar 9.1. Elektrokardiogram	139
Gambar 9.2. Foto Rontgen yang diambil oleh Rontgen	140
Gambar 9.3. Magnetic Resonance Imaging	144
Gambar 10.1. Fotografi mahkota cetak 3D yang dipasang pada gigi penyangga model phantom.....	151
Gambar 10.2. Proses pencetakan 3D MA-NG-GelMA dalam bentuk heksagram.	151
Gambar 10.3. Platform berbasis karagenan hibrida untuk aplikasi penyembuhan luka.....	153
Gambar 10.4. Skema fungsi potensial biopolimer pektin setelah cedera usus (A). Pektin dapat berfungsi sebagai penutup dengan fungsi mekanis dan penghalang (B). Pektin Juga dapat berfungsi sebagai perancah penyembuhan luka	155
Gambar 10.5. Radiografi menunjukkan penerapan semen kalsium fosfat (Norian SRS).	159
Gambar 10.6. Tindak lanjut osteotomi pada radius distal yang diobati dengan pengganti tulang hidroksiapatit/kalsium sulfat.....	161
Gambar 10.7. Ilustrasi kemungkinan penerapan pelapis kaca bioaktif pada implan penahan beban	162

Gambar 10.8. (A) Lembaran PGA dipotong kecil-kecil
(lebar 5–10 mm) dan (B) sekitar 3–10
lembar digunakan untuk menutupi
setiap luka..... 164

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Tingkat panduan dosis radiodiagnostik untuk setiap pemeriksaan pada orang dewasa.....	5
Tabel 1.2. Satuan Radiasi	7
Tabel 1.3. Perkembangan rekomendasi dosis maksimal yang diizinkan bagi pekerja radiasi untuk eluruh tubuh	15
Tabel 1.4. Perkembangan rekomendasi dosis maksimal yang diizinkan bagi pekerja radiasi untuk seluruh tubuh.....	16
Tabel 3.1. Nilai impedansi akustik beberapa material	47
Tabel 3.2. Kecepatan gelombang ultrasound (c) dan atenuasi (α) pada beberapa jaringan	51

BAB 1

RADIOLOGI MEDIS

Oleh Arshy Prodyanatasari

1.1 Sejarah Radiologi

Perkembangan radiologi dimulai dengan penemuan Sinar-X yang ditemukan oleh Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895. Wilhelm Conrad Roentgen merupakan seorang ahli fisika di Universitas Wurzburg, Jerman. Roentgen pertama kali menemukan sinar-X pada saat melakukan eksperimen dengan sinar katoda. Pada saat itu dia melihat timbulnya sinar fluoresensi yang berasal dari kristal barium platinosida dalam tabung Crookes-Hittorf yang dialiri listrik. Roentgen segera menyadari akan temuannya itu, sehingga terus melanjutkan penyelidikannya dan ditemukannya sinar yang disebutnya sinar baru atau sinar-X. Sebagai bentuk penghormatan kepada Wilhelm Conrad Roentgen atas hasil temuannya, maka di kemudian hari dinamakan sinar Rontgen.

Penemuan Wilhelm Conrad Roentgen merupakan suatu revolusi dalam dunia kedokteran. Hal ini disebabkan karena hasil penemuan tersebut dapat dimanfaatkan sebagai piranti untuk pemeriksaan bagian-bagian tubuh manusia yang belum pernah bisa dicapai dengan cara konvensional. Salah satu visualisasi hasil penemuan Roentgen adalah foto jari-jari tangan istrinya yang dibuat dengan mempergunakan kertas potres yang diletakkan di bawah tangan istrinya dan disinari dengan sinar baru itu (sinar-X). Selain itu, Rontgen juga memperoleh foto benda logam (pistol dan kompas) yang berada di dalam kotak.

Dalam penyelidikan selanjutnya, Rontgen menemukan hampir semua sifat sinar Rontgen, baik sifat kimia dan fisiknya, Akan tetapi ada satu sifat yang belum diketahuinya, yaitu sifat biologik yang dapat merusak sel-sel hidup. Sifat-sifat yang ditemukan Rontgen, diantaranya: (1) sinar dapat bergerak dalam garis lurus, (2) sinar tidak dipengaruhi oleh medan magnetik, (3) memiliki daya tembus yang semakin kuat jika sumber tegangan

listrik semakin besar, dan (4) sinar mampu menghitamkan kertas potret.

Para ilmuwan terus menggali tentang penemuan-penemuan yang telah ditemukan oleh penemu terdahulu, diantaranya penelitian tentang Sinar Rontgen yang ditemukan oleh Wilhelm Conrad Roentgen. Berdasarkan hasil penemuan para peneliti, sinar rontgen dapat memberikan efek biologik ke manusia, diantaranya: (1) kelainan biologik berupa kerusakan sel-sel hidup dalam tingkat adanya perubahan warna hingga menghitam pada kulit, (2) kerontokan rambut, (3) lecet pada kulit hingga nekrosis, dan (4) tumor kulit ganas atau kanker kulit. Dalam perkembangan ilmu pengetahuan tentang radiologi, selama dasawarsa pertama dan kedua abad ini, diketahui banyak ahli radiologi menjadi korban sinar rontgen dan nama-namanya tercantum dalam buku berjudul *Das Ehrenbuch der Roentgenologen und Radiologen aller Nationen* yang diterbitkan dalam Kongres Internasional Radiologi tahun 1959 di Munich.

Pada penemuan Sinar-X memberikan dampak adanya demam penggunaan radiasi pada masyarakat. Radiasi sinar-X dapat menimbulkan efek negatif bagi manusia, seiring dengan perkembangan dan kemajuan teknologi kedokteran, radiasi dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan manusia, khususnya di dunia kedokteran. Pemanfaatan radiasi ini meliputi radiodiagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir (Yani, 2021). Ketiga jenis bidang ini mempunyai sumber-sumber radiasi yang spesifikasi fisiknya berbeda dan memiliki faktor resiko yang berbeda pula. Semua tindakan radiasi, baik untuk diagnostik, terapi, dan kedokteran nuklir harus selalu melalui proses justifikasi, limitasi, dan optimasi agar pasien, petugas, dan lingkungan di sekitar mendapatkan keuntungan sebesar mungkin dengan resiko sekecil mungkin.

Pemanfaatan radiasi harus dilakukan dengan tepat dan hati-hati demi keselamatan, keamanan, dan kesehatan pekerja serta pasien. Keselamatan dan kesehatan terhadap pemanfaatan nilai radiasi pengion dikenal sebagai keselamatan radiasi. Keselamatan radiasi merupakan upaya yang dilakukan untuk menciptakan kondisi yang sedemikian rupa agar efek radiasi pengion terhadap

manusia dan lingkungan tidak melampaui nilai batas yang ditentukan.

Pada Undang-Undang Nomor 36 Tahun 2009 tentang Kesehatan Kerja, pada pasal 164 disebutkan bahwa upaya kesehatan kerja ditujukan untuk melindungi pekerja agar hidup sehat dan terbebas dari gangguan kesehatan serta pengaruh buruk yang diakibatkan oleh pekerjaan. Apabila memperhatikan isi pasal tersebut, maka instansi kesehatan seperti rumah sakit termasuk dalam kriteria tempat kerja yang memiliki berbagai ancaman bahaya yang dapat menimbulkan dampak kesehatan yang tidak hanya berdampak pada pelaku langsung yang bekerja di rumah sakit, akan tetapi juga berdampak pada pasien maupun pengunjung rumah sakit. Hal ini menuntut pihak pengelola rumah sakit untuk memperhatikan dan menerapkan upaya kesehatan dan keselamatan kerja di rumah sakit.

Pemerintah juga mengatur kesehatan dan keselamatan kerja yang memanfaatkan radiasi pengion dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 63 Tahun 2000 tentang Keselamatan dan Kesehatan terhadap Pemanfaatan radiasi Pengion. Peraturan tersebut dipertegas lagi dalam Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 8 Tahun 2011 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologidiagnostik dan intervensional. Pengeluaran peraturan ini bertujuan untuk menjamin keselamatan, kesehatan, dan ketentraman baik pekerja, pasien, pengunjung, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup.

Radiografer merupakan tenaga kesehatan yang memiliki kompetensi dengan tugas, wewenang, dan tanggung jawab untuk melakukan kegiatan radiografi, imejing, kedokteran nuklir, dan radioterapi pada pelayanan kesehatan dalam upaya peningkatan kualitas pelayanan kesehatan. Secara umum tugas dan tanggung jawab radiografer sebagai berikut (Ramadhan, 2020):

1. Melakukan pemeriksaan pasien secara radiografi meliputi pemeriksaan untuk radiodiagnostik dan imejing termasuk kedokteran nuklir dan ultrasonografi (USG).
2. Melakukan teknik penyinaran radiasi pada radioterapi

3. Menjamin terlaksananya penyelenggaraan pelayanan kesehatan bidang radiologi/radiografi sebatas kewenangan dan tanggung jawabnya.
4. Menjamin akurasi dan keamanan tindakan proteksi radiasi dalam mengoperasikan peralatan radiologi atau sumber radiasi.
5. Melakukan tindakan jaminan mutu peralatan radiografi.

1.2 Dasar-Dasar Radiologi

Radiologi adalah cabang ilmu kedokteran yang mempelajari tentang teknologi pencitraan, baik gelombang elektromagnetik maupun gelombang mekanik yang bertujuan untuk memindai bagian dalam tubuh manusia dengan tujuan untuk mendeteksi adanya suatu penyakit. Pelayanan radiologi pada rumah sakit merupakan salah satu bagian yang terintegrasi dari pelayanan kesehatan secara menyeluruh. Pelayanan radiologi ini berfungsi sebagai unit pelayanan radiodiagnostik imejing dan radiologi intervensi. Tujuan pelayanan radiodiagnostik dan radiologi adalah sebagai penegakan diagnosis dan terapi pada pasien. Pada penyelenggaraan pelayanan radiologi harus sesuai dengan standar mutu (Wulandari, 2021).

Radiologi diagnostik merupakan salah satu pelayanan radiasi di rumah sakit yang bertujuan untuk menegakkan diagnosis pasien. Pada radiologi diagnostik mengimplementasikan radiasi sinar-X. Pemeriksaan Sinar-X diagnostik bertujuan untuk mendapatkan citra obyek bagian tubuh yang diperiksa. Saat ini kecanggihan teknologi pencitraan berdampak pada peningkatan potensi penerimaan dosis radiasi ke pasien. Untuk mengendalikan penerimaan dosis pasien, Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) melakukan pemberlakuan nilai tingkat acuan diagnostik (*Diagnostic Reference Level/DRL*) yang diberlakukan tidak hanya untuk radiografi diagnostik, tetapi juga untuk CT, mamografi, dan fluoroskopi (Eri, 2015). DRL merupakan bagian dari proses optimalisasi proteksi kepada pasien pada proses radiologi diagnostik. DRL merupakan nilai kuartil ketiga dari distribusi doses yang terekam pada satu jenis pemeriksaan yang dilakukan dengan menggunakan suatu pesawat sinar-X tertentu, yang mengartikan

bahwa 75% dari bacaan terukur berada di bawah nilai tertentu (Walker, 2012). Penggunaan pesawat radiodiagnostik yang pada umumnya berlangsung secara singkat mengakibatkan pengukuran radiasi tidak bisa diukur dengan surveiometer. Hal ini disebabkan karena alat tersebut tidak dapat memberikan respon yang baik jika waktu pengukuran hanya dalam waktu detik. Sedangkan untuk pengukuran dosis radiasi yang berada pada suatu ruangan dalam diukur dengan dosimeter, dimana alat ini mencatat dosis radiasi secara akumulatif selama jangka waktu pemantauan. Pengukuran paparan dosis radiasi ketika tegangan operasi maksimal dan jarak 1 m dapat menggunakan mini dosimeter seri 6100 (Maryanto, 2008).

Pemeriksaan radiodiagnostik bertujuan untuk mendapatkan informasi yang akurat mengenai kelainan yang diderita oleh pasien, sehingga pencitraan pada film radiografi harus dapat memberikan informasi yang akurat yang diperlukan oleh dokter dalam mendiagnosis penyakit yang diderita pasien. Dalam upaya mengoptimalkan dosis radiasi yang diterima oleh pasien yang menjalani pemeriksaan radiodiagnostik, diperlukan informasi dosis yang diterima oleh pasien untuk memaksimalkan proteksi radiasi saat pasien menjalani pemeriksaan tersebut (Yuliati, 2006).

Tabel 1.1. Tingkat panduan dosis radiodiagnostik untuk setiap pemeriksaan pada orang dewasa

No	Jenis Pemeriksaan	Posisi Pemeriksaan	Level Dosis Permukaan Kulit* (mGy)
1	Lumbar (<i>lumbar spine</i>)	AP Lateral LSJ	10 30 40
2	Abdomen	AP	10
3	Pelvis	AP	10
4	Sendi panggul (<i>hip joint</i>)	AP	10
5	Paru (<i>chest</i>)	PA Lateral	0,4 1,5

No	Jenis Pemeriksaan	Posisi Pemeriksaan	Level Dosis Permukaan Kulit* (mGy)
6	Torakal (<i>Thoracic spine</i>)	AP	7
		Lateral	20
7	Gigi (<i>Dental</i>)	AP	7
		Lateral	5
8	Kepala (<i>Skul</i>)	PA	5
		Lateral	3

*Di dalam udara dengan hamburan balik dan merupakan nilai untuk kombinasi film screen convensional dalam kecepatan relatif 200, sedangkan untuk kombinasi film screen kecepatan tinggi (400-600) nilai tersebut hendaknya sikurangi dengan faktor 2-3.

1.3 Jenis-Jenis Pemeriksaan Radiologi

Pemeriksaan radiologi memiliki peran penting dalam menegakkan diagnosis dokter. Hasil dari prosedur prosedur medis tersebut akan menentukan skrinning, perawatan lanjutan, dan mendeteksi kondisi serta penyakit tertentu. Ada beberapa jenis metode yang sesuai dengan tujuan pemeriksaannya, diantaranya yaitu: (1) X-Ray atau Radiografi, (2) *Computer Tomography* (CT) Scan, (3) Magnetic zResonance Imaging (MRI), (4) Pencitraan Ultrasound (USG), (5) Mamografi, (6) Fluoroskopi, dan (7) Positron Emission Tomography (PET) Scan (Hulmansyah, 2020; Zamri, 2020; Mertiana, 2021; Apostolopoulos, 2022)

1.4 Prosedur dan Persiapan Melakukan Radiodiagnostik

Pada proses radiodiagnostik menggunakan sinar-X dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. Radiografi konvensional tanpa persiapan, dimana pasien dapat datang langsung untuk melakukan foto rontgen tanpa harus adanya persiapan terlebih dahulu. Radiografi ini biasanya digunakan untuk pemeriksaan tulang atau toraks.

2. Radiografi konvensional dengan persiapan, dimana proses radiografi memerlukan persiapan sebelumnya. Radiografi dengan persiapan seperti rontgen bagian perut dimana pasien harus melakukan puasa selama minimal beberapa jam agar kondisi usus menjadi lebih bersih dan hasil foto rontgen yang diperoleh bisa lebih jelas memperlihatkan kelainan yang diderita pasien pada bagian yang difoto rontgen.

1.5 Peralatan Pengukur Dosis Radiasi

Peralatan yang dapat digunakan sebagai pengukur dosis radiasi, antara lain: (1) kamar ionisasi, (2) pipa Geiger Muller, (3) Meja Sintilasi, (4) meja proporsional, (5) Badge film, (6) Dosimeter termoluminescent (TLD), (7) Dosimeter Ionisasi, dan (8) Surveymeter (Dewilza, 2023; Natalia, 2022; Putri, 2021).

1.6 Satuan Radiasi dan Nilai Ambang Batas untuk Paparan Radiasi Ionisasi

Perkiraan intensitas risiko dari suatu paparan, serangkaian unit atau satuan radiasi diciptakan untuk bermacam-macam dosis kepentingan tertentu. *The International Commission on Radiological Unit and Measurements* (ICRU) telah merekomendasikan bahwa sistem satuan terdahulu yang merupakan sistem CGS (*centimeter-gram-second*) diganti dengan ekuivalen SI (*International System of Unit*).

Tabel 1.2. Satuan Radiasi (Harrianto, 2009)

Parameter	SI	CGS	Konversi
Aktivitas (kecepatan perusakan (desintegrasi per detik))	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq
			1 Bq = $2,703 \times 10^{-11}$ Ci
Dosis paparan (kuantitas sinar-)	Coulomb/kg udara atau	Rontgen (R)	1 C/kg udara = 3876 R

Parameter	SI	CGS	Konversi
X atau radiasi Gamma pada titik pajanan)	C/kg.udara		1 R = 258 μ C/kg.udara
Kecepatan dosis (dosis per menit)	Coulomb/kg. udara tiap jam	Rontgen /jam	1 C/kg udara = 3876 R
			1 R = 258 μ C/kg.udara
Dosis absorpsi (kuantitas radiasi yang diabsorpsi per unit massa jaringan tubuh	Gray (Gy)	Rad	1 Gy = 1 J/kg
			1 Gy = 100 rad
			1 rad = 0,01 Gy
			1 rad = 100 ergs
Dosis ekuivalen (dosis absorpsi, estimasi efek biologis relatif dari suatu pajanan radiasi)	Sievert (Sv)	Rem	1 Sv = 100 rem
			1 rem = 0,01 Sv

Satuan radiasi yang lain adalah Rontgen (R), dimana merupakan satuan dari banyaknya radiasi (unit of expoure) yang menimbulkan ionisasi di udara pada 0,001293 gram udara sebanyak satu satuan muatan elektrostatis. Radiasi sinar-X yang mengenai suatu area tertentu dikenal dengan nama satuan rap (*Roentgen Area Product*), dimana 1 rap sebanding dengan 100 R pada setiap 100 cm2. Penyerapan energi radiasi, 1 rad senilai dengan besar dosis penyerapan energi radiasi sebanyak 100 erg pada setiap gram benda/jaringan.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/gr} = 0,01 \text{ J/Kg. Jaringan}$$

1.7 Efek Radiasi

Radiasi pengion adalah radiasi yang bersumber dari pancaran sinar-x atau sinar gamma. Radiasi pengion memiliki satuan yaitu dosis erithema yang merupakan banyaknya radiasi sinar-x yang dapat menyebabkan kulit kemerahan.

Pada pemanfaatan radiasi pengion, terdapat efek radiasi yang diterima oleh pekerja di bagian radiologi, pasien, maupun masyarakat. Intensitas gangguan kesehatan yang diakibatkan adanya radiasi ionisasi bergantung pada cara masuk radiasi ke tubuh dan jenis sinar yang meradiasi, dimana partikel alfa paling mudah ditahan dengan perisai, sedangkan partikel gamma dan sinar-X lebih sukar. Efek radiasi yang dapat diderita oleh pekerja radiasi, diantaranya adalah:

1. Efek Somatik merupakan efek radiasi yang dapat dirasakan secara langsung oleh orang yang menerima radiasi tersebut. Efek somatik dibedakan menjadi dua, yaitu:
 - a. Efek Stokastik, yaitu efek yang peluang timbulnya berasal dari fungsi dosis radiasi yang tanpa suatu nilai dosis ambang
 - b. Efek non stokastik, yaitu efek yang tingkat keparahannya bervariasi menurut dosis dan hanya akan timbul apabila dosis ambang dilampaui
2. Efek Genetik merupakan efek biologis dari radiasi kepada generasi yang belum lahir, yang disebabkan adanya kerusakan molekul DNA pada sperma atau ovarium yang disebabkan oleh radiasi.

Efek biologis dari radiasi pengion yang diterima oleh manusia dapat terjadi kepada individu yang terpapar radiasi (efek somatik) maupun akibat keturunan dari orang tua yang pernah terpapar radiasi (efek herediter/genetik). Efek somatik dapat dibagi menjadi dua, yaitu efek deterministik dan efek stokastik. Sedangkan efek genetik (herediter) keseluruhannya bersifat stokastik (Dance, 2014). Efek deterministik yang dialami oleh seseorang yang terpapar radiasi dapat berupa kerusakan kulit, kerusakan sistem hematopoietik sumsum tulang, kerusakan lensa mata, dan sindrom radiasi. Efek deterministik dapat diminimalisir dengan pengaturan dosis radiasi dengan menggunakan dosis radiasi yang aman. Tingkat keparahan efek deterministik dapat berbeda setiap individu, serta dipengaruhi oleh besar dosis yang diterimanya (Dance, 2014; Eastman, 2015). Radiasi stokastik dapat terjadi meskipun dalam dosis yang direkomendasikan. Efek

stokastik ini dipengaruhi oleh efek probabilitas, dimana meski dalam dosis radiasi yang rendah dapat meningkatkan potensi tumor dan kerusakan kegenik. Berdasarkan hal tersebut tidak ada nilai ambang batas aman yang dapat memproteksi pajanan Sinar-X agar benar-benar aman. Salah satu efek stokastik yang membahayakan adalah terjadinya kanker atau kelainan genetik pada pasien yang mengalami efek stokastik dari paparan radiasi (Eastman, 2015). Radiasi juga dapat menyebabkan timbulnya penyakit, diantaranya adalah:

1. Radiodermatitis, yaitu peradangan yang terjadi pada bagian kulit yang disebabkan oleh penyinaran lokal dengan dosis tinggi.
2. Katarak, yaitu penyakit pada bagian mata yang disebabkan adanya penyinaran mata dengan dosis di atas 1,5 Gy dengan masa tenang antara 5-10 tahun.
3. Sterilitas, yaitu adanya penurunan tingkat kesuburan reproduksi sampai kemandulan yang disebabkan adanya penyinaran pada kelenjar kelamin.

Berdasarkan prosesnya, radiasi dapat berbentuk radiasi efek cepat, menghasilkan sindrom radiasi akut (usus, darah, SSP, gangguan fertilitas, dan efek radiasi lambat. Pajanan akut dengan dosis besar sekitar 30-50 Gy atau 2000-5000 rad dapat mengakibatkan kematian dengan edema serebri dalam waktu 48 jam, Pada dosis yang lebih rendah sebesar 1-20 Gy, kematian yang diakibatkan oleh adanya kerusakan saluran pencernaan atau depresi hematopoiesis dalam jangka waktu ± 1 bulan (Harrianto, 2015).

Penelitian yang dilakukan oleh Kelompok Studi Life Span Study (LSS) terkait efek stokastik dari paparan radiasi pada kanker, dimana LSS melakukan penelitian terhadap korban bom aton dan diperoleh hasil bahwa efek stokastik yang diderita adalah risiko terjadinya kanker, khususnya kanker ginjal, kanker panggul, kanker ureter, dan kanker payudara pada perempuan, sistem pencernaan, kandung kemih, ovarium pada perempuan, paru-paru, usus besar, kerongkongan, kandung empedu, hati, dan perut (Ozasa, 2012). Selain itu peneliti bernama Richardson et al

melakukan penelitian tentang hubungan antara radiasi terhadap kejadian leukimia dimana diperoleh hasil bahwa adanya hubungan yang kuat antara paparan radiasi dengan kejadian leukimia. *Relative risk mortalitas* leukimia yang diakibatkan oleh paparan radiasi sebesar 2,96 per Gy diketahui menunjukkan dampak terhadap terjadinya kelainan hematologis dan resiko solid tumor (Leurald, 2015; Li Ci, 2010; Preston, 2007).

Berdasarkan efek-efek radiasi yang ditimbulkan, maka perusahaan memiliki tanggung jawab untuk melakukan upaya kesehatan bagi para pekerjanya dengan melakukan tindakan pengendalian, baik secara teknis dan administratif. Cara terbaik dalam upaya pengendalian bahaya radiasi adalah dengan menghilangkan sumber bahaya yang ada. Akan tetapi jika sumber bahaya tersebut tidak dapat dikendalikan sepenuhnya, maka pengendalian dapat dilakukan dengan penggunaan alat pelindung diri (APD). Berdasarkan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja serta Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor Per.01/MEN/1981 tentang kewajiban melaporkan penyakit akibat kerja, dimana setiap pengurus memberitahukan syarat-syarat memberikan APD, kewajiban, dan hak tenaga kerja untuk memakai APD, kewajiban pengurus menyediakan APD, dan wajib bagi tenaga kerja untuk menggunakannya demi mencegah penyakit akibat kerja. APD merupakan alat proteksi berupa kelengkapan yang wajib digunakan pada saat bekerja sesuai dengan tingkat bahaya dan resiko untuk menjaga keselamatan pekerja itu sendiri dan orang disekitarnya. APD yang biasa digunakan oleh pekerja radiasi atau bagian radiologi, yaitu: (1) apron proteksi tubuh, (2) penahan radiasi gonad, (3) sarung tangan proteksi, (4) penahan radiasi, (5) masker, (6) sarung tangan (gloves), dan (7) alat ukur radiasi.

Penggunaan APD atau alat proteksi radiasi dan personal radiasi dapat bermanfaat untuk mengurangi dan melindungi radiografer sebagai pekerja radiasi di rumah sakit dari bahaya kesehatan, baik efekstokastik, non stokastik, maupun infeksi toksik dalam menjalankan tugasnya. Bahaya potensial di rumah sakit dapat mengakibatkan penyakit dan kecelakaan akibat kerja yang berasal dari radiasi. Penggunaan APD merupakan salah

satu pelindung bagi radiografer untuk melindungi dari bahaya potensial dari radiasi maupun penyakit lainnya. Radiografer dalam bekerja sering kurang maksimal dalam penggunaan APD bahkan kurang tersedianya APD di instalasi radiologi rumah sakit.

1.8 Ketentuan Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Prinsip keselamatan kerja harus dilakukan dengan baik, pengambilan keputusan dilakukan secara rasional untuk menurunkan besarnya dosis paparan radiasi terhadap pekerja radiologi, pasien, serta masyarakat. Tiga prinsip penting dari proteksi radiasi yang dicanangkan dalam *Consensus International Commission on Radiological Protection* (ICR), yaitu:

1. **Prinsip Justifikasi.** Prinsip ini memnitik beratkan pada kebermanfaatan radiasi yang harus lebih besar daripada dampak yang ditimbulkan.
2. **Prinsip Optimalisasi Proteksi.** Optimalisasi proteksi radiasi harus disesuaikan dengan prinsip ALARA (as low as reasonably achievable) dan memperhatikan faktor sosial ekonomi.
3. **Prinsip Limitasi Dosis.** Pembatasan dosis yang diterima oleh individu selain dari paparan medis tidak boleh melebihi batas yang direkomendasikan oleh *Consensus International Commission on Radiological Protection* (ICRP).

Upaya dalam menunjang kenyamanan dan keamanan para pekerja radiasi, pasien, dan lingkungan sekitar, diperlukan beberapa hal yang harus diperhatikan untuk mencegah terjadinya kebocoran radias pada laboratorium radiologi, diantaranya adalah (Ayu, 2020; Aprizka, 2020; Pratomawawi, 2019; Ancilla, 2016; Fairusiyyah, 2016):

1. Lokasi bagian radiologi. Lokasi bagian radiologi perlu dipertimbangkan sedemikian rupa sama halnya seperti laboratorium klinik, yaitu ditempatkan secara sentral agar mudah dicapai dari poliklinik, kamar bedah, bangsal, unit perawatan intensif, dan sebagainya.

2. Kekuatan dan besarnya peralatan radiologi. Penggunaan alat radiologi baik dari kapasitas kekuatan dan besarnya peralatan harus mempertimbangkan tipe rumah sakit yang akan dibangun. Hal ini berpengaruh kepada kapasitas dan intensitas menggunakan alat radiologi dalam melakukan radiodiagnostik kepada pasien sebagai penegakan diagnosa dokter.
3. Proteksi radiasi peralatan roentgen dan dinding ruangan. Pada penggunaan alat radiologi, perlu diperhatikan proteksi radiasi peralatan tersebut, baik dari sisi paparan radiasi yang dipancarkan ke lingkungan, dinding ruangan dimana alat-alat ditempatkan. Hal ini bertujuan untuk menjamin keamanan pasien, pekerja radiologi, karyawan, serta masyarakat umum. Proteksi radiasi peralatan roentgen yang dilakukan, meliputi:
 - a. Tabung roentgen, gelas timah hitam, tabir, fluoroskopi konvensional, diafragma, filter tambahan, karet timah hitam pada tabir, dan meja bucky harus memenuhi persyaratan *International Committee on Radiation Protection* (ICPR) yang merupakan badan *International Society of Radiology*.
 - b. Tersedianya alat proteksi radiologi bagi pekerja radiasi, seperti radiologi atau karyawan, seperti sarung tangan yang dilapisi timah hitam dan jubah proteksi yang terbuat dari karet hitam setebal 0,5 mm Pb.
 - c. Adanya meja pengontrol alat roentgen yang berada di belakang dinding proteksi dengan ketebalan ekuivalen dengan 2 mm Pb atau gelas timah hitam dengan ketebalan 2 mm Pb.
 - d. Sesuai ketentuan Departemen Kesehatan, luas ruangan sebesar 4x3x2,8 m. Hal ini bertujuan agar memungkinkan memasukkan tempat tidur pasien secara leluasa
 - e. Dinding ruangan terbuat dari batu bata yang dipasang secara melintang, dimana 1 bata jika dipasang memanjang harus menggunakan 2 batu bata. Jenis batu bata yang digunakan harus memiliki kualitas yang baik

berukuran 10x20 cm. Ketebalan plesteran bata minimal 25 cm dengan komposisi plesteran menggunakan campuran semen dan pasir tertentu. Apabila dinding ruangan radiologi menggunakan dinding beton, maka ketebalan dinding harus dibuat minimal 15 cm. Hal ini ekuivalen dengan 2 mm Pb.

- f. Penempatan alat-alat radiologi harus sesuai dengan pedoman Departemen Kesehatan atau ahli radiologi dengan spesifikasi tinggi ruangan minimum 280 cm, jendela boleh ditempatkan 2 m di atas dinding untuk meringankan biaya proteksi radiasi ke lingkungan.
 - g. Penggunaan kawat listrik harus sesuai dengan ketentuan yang berlaku dan harus dilakukan grounding.
4. Aksesoris yang digunakan dalam pemeriksaan rontgen, seperti karet tabir penguat dan film mutlak harus dalam keadaan yang baik untuk mencegah timbulnya artefak.
 5. Ukuran kamar gelap yang digunakan minimal 3x2x2,8 m dan terdapat bak-bak pencucian film dengan dinding berupa porselin putih jika pencucian dilakukan secara manual, serta lantai terbuat dari bahan yang mudah diberihkan.

Proteksi radiasi merupakan tindakan yang dilakukan untuk mengurangi adanya pengaruh radiasi yang dapat merusak akibat adanya paparan radiasi (Akhadi, 2019). Berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pngion dan Keamanan Sumber Radioaktif, setiap orang atau badan yang memanfaatkan tenaga nuklir seperti tenaga yang berasal dari sumber radiasi pengion wajib memiliki izin pemanfaatan dan memenuhi persyaratan keselamatan radiasi, meliputi: (1) persyaratan manajemen, (2) persyaratan proteksi radiasi, (3) persyaratan teknik, dan (4) verifikasi keselamatan yang bertujuan mencapai keselamatan pekerja dan anggota masyarakat (Dianasari, 2017).

Tabel 1.3. Perkembangan rekomendasi dosis maksimal yang diizinkan bagi pekerja radiasi untuk seluruh tubuh (Yunus, 2019; Rahmayani, 2020)

Dosis maksimal yang diizinkan	Tahun	Keterangan
30 R/Tahun Sinar-X 100 Kv atau 70 R/Tahun Sinar-X 200 Kv	1925	Direkomendasikan oleh A. Mutscheller & R.M Sievent
0,2 R/hari atau 1 R/minggu	1934	Direkomendasikan oleh Komisi Internasional untuk proteksi terhadap Sinar-X
15 rem/tahun atau 0,3 rem/minggu	1950	Direkomendasikan oleh <i>The International Committee on Radiological Protection</i> (ICRP)
5 rem/tahun atau 0,1 rem/minggu	1958	Direkomendasikan oleh <i>The International Committee on Radiological Protection</i> (ICRP)
50 mSv/tahun	1977	Direkomendasikan oleh ICRP mengikuti prinsip <i>as low as reasonably achievable</i> (ALARA)
20 mSv/tahun	1990	Direkomendasikan oleh ICRP, dirata-rata untuk 5 tahun, dan tidak boleh >50 mSv/tahun

Berdasarkan peraturan Bapeten Nomor 15 Tahun 2014 pasal 25, nilai batas dosis radiasi yang diperbolehkan untuk masyarakat umum, yaitu: (1) dosis efektif sebesar 1 mSv dalam satu tahun, (2) dosis ekuivalen untuk lensa mata 15 mSv dalam satu tahun, dan (3) dosis ekuivalen untuk kulit 50 mSv dalam satu tahun. Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BATAN) Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam pemanfaatan tenaga nuklir menyatakan bahwa setiap emegang izin dalam

melaksanakan ketentuan asal 25 wajib menyediakan perlengkapan proteksi radiasi yang tertuang dalam Pasal 36 ayat 2, yaitu (Nuklir, 2013) (Mufida, 2020; Yani, 2021):

1. Peralatan pemantauan tingkat radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja, yang meliputi: (1) alat ukur dosis atau laju dosis, (2) alat ukur kontaminasi permukaan, dan (3) alar ukur kontaminasi udara
2. Peralatan pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas dan instalasi yang disesuaikan dengan pemanfaatan tenaga nuklir dan diatur tersendiri dalam Peraturan Kepala BAPETEN.
3. Peralatan pemantauan dosis perorangan , diantaranya: (a) film badge, (b) thermoluminisensi dosimeter (TLD) badge, (c) radiofotoluminisensi, atau (d) dosimeter pembaca langsung
4. Peralatan protektif radiasi, meliputi: (a) Pakaian proteksi paling minimal apron dan jas laboratorium yang terbuat dari bahan sesuai standar yang ditentukan, (b) Peralatan protektif perlindungan pernafasan, (c) Sarung tangan yang terbuat dari bahan sesuai ketentuan, (d) Pelindung organ, dan (e) Glove box

Tabel 1.4. Perkembangan rekomendasi dosis maksimal yang diizinkan bagi pekerja radiasi untuk seluruh tubuh (Yunus, 2019; Rahmayani, 2020)

Dosis maksimal yang diizinkan	Tahun	Keterangan
30 R/Tahun Sinar-X 100 Kv atau 70 R/Tahun Sinar-X 200 Kv	1925	Direkomendasikan oleh A. Mutscheller & R.M Sievent
0,2 R/hari atau 1 R/minggu	1934	Direkomendasikan oleh Komisi Internasional untuk proteksi terhadap Sinar-X
15 rem/tahun atau 0,3	1950	Direkomendasikan oleh

Dosis maksimal yang diizinkan	Tahun	Keterangan
rem/minggu		<i>The International Committee on Radiological Protection (ICRP)</i>
5 rem/tahun atau 0,1 rem/minggu	1958	Direkomendasikan oleh <i>The International Committee on Radiological Protection (ICRP)</i>
50 mSv/tahun	1977	Direkomendasikan oleh ICRP mengikuti prinsip <i>as low as reasonably achievable (ALARA)</i>
20 mSv/tahun	1990	Direkomendasikan oleh ICRP, dirata-rata untuk 5 tahun, dan tidak boleh >50 mSv/tahun

Berdasarkan peraturan Bapeten Nomor 15 Tahun 2014 pasal 25, nilai batas dosis radiasi yang diperbolehkan untuk masyarakat umum, yaitu: (1) dosis efektif sebesar 1 mSv dalam satu tahun, (2) dosis ekuivalen untuk lensa mata 15 mSv dalam satu tahun, dan (3) dosis ekuivalen untuk kulit 50 mSv dalam satu tahun. Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BATAN) Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam pemanfaatan tenaga nuklir menyatakan bahwa setiap emegang izin dalam melaksanakan ketentuan asal 25 wajib menyediakan perlengkapan proteksi radiasi yang tertuang dalam Pasal 36 ayat 2, yaitu (Nuklir, 2013) (Mufida, 2020; Yani, 2021):

1. Peralatan pemantauan tingkat radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja, yang meliputi: (1) alat ukur dosis atau laju dosis, (2) alat ukur kontaminasi permukaan, dan (3) alar ukur kontaminasi udara
2. Peralatan pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas dan instalasi yang disesuaikan dengan pemanfaatan tenaga nuklir dan diatur tersendiri dalam Peraturan Kepala BAPETEN.

3. Peralatan pemantauan dosis perorangan , diantaranya: (a) film badge, (b) thermoluminisensi dosimeter (TLD) badge, (c) radiofotoluminisensi, atau (d) dosimeter pembaca langsung
4. Peralatan protektif radiasi, meliputi: (a) Pakaian proteksi paling minimal apron dan jas laboratorium yang terbuat dari bahan sesuai standar yang ditentukan, (b) Peralatan protektif perlindungan pernafasan, (c) Sarung tangan yang terbuat dari bahan sesuai ketentuan, (d) Pelindung organ, dan (e) Glove box

DAFTAR PUSTAKA

- Ancila, C. and Hidayanto, E., 2016. Analisis dosis paparan radiasi pada instalasi radiologi dental panoramik. *Youngster Physics Journal*, 5(4), pp.441-450.
- Apostolopoulos, I.D., Papathanasiou, N.D., Apostolopoulos, D.J. and Panayiotakis, G.S., 2022. Applications of generative adversarial networks (GANs) in positron emission tomography (PET) imaging: A review. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 49(11), pp.3717-3739.
- Aprizka, S.S., 2020. Penerapan Proteksi Radiasi pada Pekerja Radiasi di Instalasi Radiologi RS Naili DBS, RS Selaguri, dan RS Unand (Doctoral dissertation, Universitas Andalas).
- Ayu, M.S.K., 2020. Proteksi Radiasi Pada Pasien, Pekerja, dan Lingkungan di Dalam Instalasi Radiologi. Inst. Ilmu Kesehat. Str. Indones.
- Dance, D.R., Christofides, S., Maidment, A.D.A., McLean, I.D. and Ng, K.H., 2014. Diagnostic radiology physics: A handbook for teachers and students. endorsed by: American association of physicists in medicine, asia-oceania federation of organizations for medical physics, european federation of organisations for medical physics.
- Dewilza, N., Rad, A.M., Kes, M.T., Yudha, S. and Kes, M.T., 2023. Dasar-Dasar CT-Scan. Deepublish.
- Dianasari, T. and Koesyanto, H., 2017. Penerapan manajemen keselamatan radiasi di instalasi radiologi rumah sakit. *Unnes Journal of Public Health*, 6(3), pp.174-183.
- Eastman, G.W., Wald, C. and Crossin, J., 2015. Radiologi klinis belajar dari awal: Dari gambar ke diagnosis. *Indonesia: Penerbit Buku Kedokteran EGC*.
- Eri, H., & Dewi, K. (2015). Dosis pasien pada pemeriksaan rutin sinar-x radiologi diagnostik. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 16(2), 71-84.
- Fairusiyah, N., Widjasena, B. and Ekawati, E., 2016. Analisis Implementasi Manajemen Keselamatan Radiasi Sinar-X Di Unit Kerja Radiologi Rumah Sakit Nasional Diponegoro

- Semarang Tahun 2016. Jurnal Kesehatan Masyarakat (Undip), 4(3), pp.514-527.
- Harrianto, Ridwan. (2015). Buku Ajar Kesehatan Kerja. Penerbit Buku Kedokteran EGC
- Hulmansyah, D., 2020. Prosedur Pemeriksaan Magnetic Resonance Spectroscopy (MRS) Kepala pada Kasus Tumor Otak di Instalasi Radiologi RS Awal Bros Pekanbaru. *Journal of STIKes Awal Bros Pekanbaru*, 1(1), p.318871.
- Leuraud, K., Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., Gillies, M., O'hagan, J.A., Hamra, G.B., Haylock, R., Laurier, D., Moissonnier, M. and Schubauer-Berigan, M.K., 2015. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *The Lancet Haematology*, 2(7), pp.e276-e281.
- Li, C.I., Nishi, N., McDougall, J.A., Semmens, E.O., Sugiyama, H., Soda, M., Sakata, R., Hayashi, M., Kasagi, F., Suyama, A. and Mabuchi, K., 2010. Relationship between radiation exposure and risk of second primary cancers among atomic bomb survivors. *Cancer research*, 70(18), pp.7187-7198.
- Maryanto, D. and Solichin, A.Z., 2008. Analisis Keselamatan Kerja Radiasi Pesawat Sinar-X di Unit Radiologi RSU Kota Yogyakarta. In *Yogyakarta: Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir*.
- Mertiana, W.D., Sardjono, T.A. and Hikmah, N.F., 2021. Peningkatan Kontras Citra Mamografi Digital dengan Menggunakan CLAHE dan Contrast Stretching. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), pp. A222-A227.
- Mufida, W., Utami, A.P. and KM, S., 2021. Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Ditinjau Dari Peralatan Proteksi Radiasi Di Instalasi Radiologi.
- Natalia, Y., 2022. Studi Implementasi Alat Arduino Mega 2560 dan Prototipe Geiger Counter pada Surveymeter Nuklir untuk Mengukur Radiasi Nuklir (Doctoral dissertation, Universitas Matana).
- Nuklir, B.P.T., 2013. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan

- Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Republik Indonesia.
- Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., Kasagi, F., Soda, M., Grant, E.J., Sakata, R., Sugiyama, H. and Kodama, K., 2012. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiation research*, 177(3), pp.229-243.
- Putri, S., 2021. Pengukuran Dosis Radiasi Pada Pemeriksaan Radiografi Thorax Anak (Doctoral dissertation, Fakultas Kesehatan Dan Keteknisian Medis).
- Pratamawawi, D.N.P., Hidayat, L.H., Hartami, E., Septina, F. and Swastirani, A., 2019. Dasar-Dasar Keselamatan Pasien pada Praktik Dokter Gigi. Universitas Brawijaya Press.
- Rahmayani, R., Sahara, S. and Zelviani, S., 2020. Pengukuran Dan Analisis Dosis Proteksi Radiasi Sinar-X Di Unit Radiologi Rs. Ibnu Sina Yw-Umi. JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya, 7(1), pp.87-96.
- Ramadhan, A.Z., Sitam, S., Azhari, A. and Epsilawati, L., 2020. Gambaran kualitas dan mutu radiograf. *Jurnal Radiologi Dentomaksilofasial Indonesia (JRDI)*, 3(3), pp.43-48.
- Walker, C. and van der Putten, W., 2012. Patient dosimetry and a novel approach to establishing Diagnostic Reference Levels in dental radiology. *Physica Medica*, 28(1), pp.7-12.
- Wulandari, D.A. and Lesmana, T.C., 2021. Analisa Performance Instalasi Radiologi Dalam Upaya Pemenuhan Standar Pelayanan Minimal (Spm) Di Rumah Sakit Condong Catur Yogyakarta. *Jurnal Manajemen Kesehatan Indonesia*, 9(2), pp.87-92.
- Yani, I., Pratiwi, A.D. and Yunawati, I., 2021. Studi Deskriptif Proteksi Radiasi dan Penerapannya di Instalasi Radiologi Rumah Sakit. *HIGEIA (Journal of Public Health Research and Development)*, 5(3).
- Yani, I., Pratiwi, A.D. and Yunawati, I., 2021. Studi Deskriptif Proteksi Radiasi dan Penerapannya di Instalasi Radiologi Rumah Sakit. *HIGEIA (Journal of Public Health Research and Development)*, 5(3).

- Yuliati, H. and Kusumawati, D.D., 2006. Terimaan Dosis Radiasi Foto Thorak oleh Pasien Anak. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Fungsional Teknis non Peneliti*, pp.155-164.
- Yunus, B. and Bandu, K., 2019. Efek radiasi sinar-x pada anak-anak. *Makassar Dental Journal*, 8(2).
- Zamri, A.F., 2020. *Studi Deskriptif Hasil Pemeriksaan USG Transabdominal dan MSCT Scan Abdomen Pada Penderita Tumor Ginekologi Di RS Wahidin Sudirohusodo Makassar Periode Januari–Juni 2019* (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).

BAB 2

RADIASI IONISASI DAN PERLINDUNGAN RADIASI

Oleh Dito Anurogo



A high-tech laboratory with scientists examining a glowing, translucent nanoparticle structure, set in an atmosphere of cutting-edge science and innovation. Designed by: Dito Anurogo with AI.

2.1 Pengantar

2.1.1 Definisi dan Jenis-jenis Radiasi Ionisasi

Radiasi ionisasi, dalam esensinya, merupakan sejenis energi yang diemisikan oleh beberapa sumber, baik alami maupun buatan, yang cukup kuat untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul, sehingga mengionisasi mereka. Jenis radiasi ionisasi ini beragam, mulai dari sinar gamma, sinar-X, hingga partikel alfa dan beta. Masing-masing jenis memiliki karakteristik, sumber, dan aplikasi yang berbeda. Sinar gamma, misalnya, memiliki daya tembus yang tinggi dan sering digunakan dalam prosedur diagnostik medis, sementara partikel alfa memiliki daya tembus yang lebih rendah tetapi potensial kerusakannya lebih tinggi jika masuk ke dalam tubuh.

2.1.2 Sejarah Penemuan dan Penerapan Radiasi Ionisasi dalam Kedokteran

Sejarah radiasi ionisasi terkait erat dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan kedokteran. Ditemukannya sinar-X oleh Wilhelm Roentgen pada akhir abad ke-19 menjadi tonggak awal pemanfaatan radiasi dalam medis. Ini diikuti dengan penemuan radioaktivitas oleh Marie Curie, yang membuka jalan bagi pengembangan berbagai teknik diagnostik dan terapeutik. Sejak itu, radiasi ionisasi telah menjadi alat penting dalam kedokteran, mulai dari penggunaan sinar-X untuk pencitraan, hingga pemanfaatan radioisotop dalam terapi kanker dan teknik pencitraan seperti PET scan.

2.1.3 Pentingnya Pemahaman Radiasi Ionisasi dalam Konteks Kesehatan

Memahami radiasi ionisasi tidak hanya penting bagi para profesional medis tetapi juga masyarakat umum. Dalam konteks kesehatan, radiasi ionisasi memegang peranan ganda sebagai alat diagnostik dan terapeutik yang berharga, sekaligus sebagai faktor risiko yang harus diatur dengan hati-hati. Efek biologis radiasi, seperti kerusakan DNA dan potensi mutagenik, memerlukan pemahaman mendalam untuk mengoptimalkan manfaat dan meminimalkan risiko. Oleh karena itu, pengetahuan tentang cara

kerja, efek, dan tindakan perlindungan radiasi menjadi penting, tidak hanya untuk menghindari efek samping yang berbahaya tetapi juga untuk memanfaatkan potensinya dalam meningkatkan kualitas layanan kesehatan.

Pemahaman ini juga menjadi penting dalam merancang protokol keselamatan, baik bagi tenaga medis maupun pasien, untuk menghindari paparan radiasi yang tidak perlu atau berlebihan. Dengan demikian, bab ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang radiasi ionisasi dalam konteks kedokteran, mulai dari dasar fisiknya, aplikasi medis, hingga pertimbangan etika dan keselamatan.

2.2 Dasar Fisika Radiasi Ionisasi

2.2.1 Prinsip Dasar Fisika Radiasi

Radiasi ionisasi, pada intinya, adalah fenomena fisika di mana partikel atau gelombang energi memiliki kekuatan cukup untuk mengionisasi atom atau molekul dengan cara melepaskan atau menambahkan elektron. Prinsip ini berakar pada konsep energi dan interaksi partikel. Energi yang terkandung dalam radiasi ionisasi bergantung pada sifat gelombang atau partikelnya. Sifat dualistik ini, sebagai gelombang dan partikel, merupakan fondasi utama dalam memahami bagaimana radiasi berinteraksi dengan materi. Radiasi dengan energi lebih tinggi memiliki potensi ionisasi yang lebih besar, yang merupakan aspek kunci dalam aplikasinya dalam kedokteran dan penelitian.

2.2.2 Jenis-jenis Partikel dan Gelombang pada Radiasi Ionisasi

Terdapat dua kategori utama radiasi ionisasi: radiasi partikel dan radiasi gelombang elektromagnetik. Radiasi partikel meliputi partikel alfa (inti helium), beta (elektron atau positron), dan neutron, yang masing-masing memiliki karakteristik energi dan daya tembus yang berbeda. Partikel alfa, misalnya, memiliki daya ionisasi tinggi tetapi daya tembus rendah. Sementara itu, radiasi gelombang elektromagnetik seperti sinar-X dan sinar gamma, tidak memiliki massa dan bermuatan netral, memungkinkan mereka menembus materi lebih dalam. Setiap jenis radiasi ini memiliki implikasi berbeda dalam konteks medis, terutama terkait dengan

bagaimana mereka dihasilkan, dikontrol, dan digunakan dalam diagnosa dan terapi.

2.2.3 Interaksi Radiasi dengan Materi: Absorpsi, Scatter, dan Transmisi

Ketika radiasi ionisasi berinteraksi dengan materi, terjadi beberapa fenomena utama: absorpsi, scatter, dan transmisi. Absorpsi terjadi ketika energi dari radiasi diserap oleh materi, yang bisa mengakibatkan ionisasi atom atau molekul. Proses ini sangat penting dalam terapi radiasi, di mana serapan energi oleh jaringan kanker mengakibatkan kerusakan pada sel-sel kanker. Scatter, atau hamburan, adalah proses di mana arah radiasi berubah setelah bertabrakan dengan materi, yang penting dalam pencitraan diagnostik seperti radiografi, karena mempengaruhi kualitas gambar. Transmisi adalah perjalanan radiasi melalui suatu materi tanpa mengalami perubahan yang signifikan. Pemahaman mendalam tentang ketiga interaksi ini krusial untuk mengoptimalkan penggunaan radiasi dalam kedokteran, baik untuk memastikan kualitas diagnostik yang tinggi maupun untuk meminimalkan dosis radiasi yang tidak perlu pada pasien dan tenaga medis.

Dalam konteks ini, fisika radiasi ionisasi tidak hanya menjadi fondasi teoritis, tetapi juga panduan praktis dalam pengembangan dan penerapan teknologi medis berbasis radiasi. Pemahaman yang mendalam tentang dasar-dasar ini membantu dalam perancangan alat yang lebih efisien dan aman, serta dalam penentuan protokol dan prosedur yang mengoptimalkan manfaat dan meminimalkan risiko terkait radiasi.

2.3 Sumber Radiasi Ionisasi dalam Kedokteran

2.3.1 Alat-alat Medis yang Menghasilkan Radiasi Ionisasi

Dalam dunia kedokteran, terdapat berbagai alat yang menghasilkan radiasi ionisasi untuk keperluan diagnostik dan terapeutik. Misalnya, mesin sinar-X, yang merupakan salah satu alat paling fundamental, digunakan untuk menghasilkan gambar struktur internal tubuh. Pemindai CT (*Computed Tomography*) juga mengandalkan radiasi ionisasi untuk menghasilkan gambar cross-

sectional dari tubuh yang lebih detail. Selain itu, dalam terapi radiasi yang digunakan untuk mengobati kanker, alat seperti linear accelerators digunakan untuk mengarahkan sinar radiasi ke jaringan kanker dengan presisi tinggi. Pentingnya alat-alat ini dalam kedokteran modern tidak bisa dilebih-lebihkan, tetapi penggunaannya harus selalu diimbangi dengan kesadaran akan potensi risiko radiasi.

2.3.2 Radiasi Ionisasi Alami dan Buatan dalam Konteks Medis

Radiasi ionisasi tidak hanya berasal dari peralatan medis, tetapi juga dari sumber alami dan buatan lainnya. Radiasi latar belakang alami, seperti radon yang berasal dari tanah dan batuan, serta radiasi kosmik dari luar angkasa, merupakan contoh radiasi ionisasi alami. Di sisi lain, radiasi buatan, seperti yang dihasilkan dalam reaktor nuklir atau alat-alat medis, menjadi sumber penting dalam aplikasi medis. Memahami perbedaan antara sumber radiasi alami dan buatan ini penting, terutama dalam mengevaluasi dan mengelola risiko paparan radiasi, baik untuk pasien maupun tenaga medis.

Pemahaman ini menjadi krusial dalam konteks pencegahan dan perlindungan terhadap potensi bahaya yang dapat ditimbulkan oleh radiasi. Misalnya, di fasilitas medis, langkah-langkah perlindungan dan keselamatan harus dipertimbangkan tidak hanya terhadap radiasi buatan yang berasal dari peralatan medis, tetapi juga terhadap paparan radiasi latar belakang alami yang mungkin ada.

Dalam pengaturan medis, penggunaan radiasi buatan, seperti dalam radiografi, CT scan, dan terapi radiasi, memerlukan protokol keselamatan yang ketat untuk memastikan bahwa pasien dan tenaga medis terlindungi dari dosis radiasi yang tidak perlu atau berlebihan. Ini termasuk penggunaan perisai pelindung, pengaturan dosis radiasi yang tepat, dan pemantauan terus-menerus atas tingkat paparan radiasi.

Selain itu, untuk radiasi alami, seperti radon, penting untuk memahami cara-cara mengurangi paparan, terutama di daerah dengan tingkat radon alami yang tinggi. Ini bisa melibatkan ventilasi

yang memadai di gedung dan pemantauan berkala untuk memastikan tingkat radon tetap pada kisaran yang aman.

Secara lebih luas, penelitian dan pendidikan mengenai sumber-sumber radiasi alami dan buatan, serta efeknya terhadap kesehatan manusia, penting untuk meningkatkan kesadaran dan pengetahuan di kalangan masyarakat umum. Dengan pemahaman yang lebih baik, masyarakat dapat membuat keputusan yang lebih terinformasi tentang paparan radiasi, baik dalam pengaturan medis maupun dalam kehidupan sehari-hari.

2.3.3 Radiasi dalam Diagnosis dan Terapi Medis

Radiasi ionisasi memainkan peran kunci dalam banyak prosedur diagnostik dan terapeutik. Dalam bidang diagnostik, teknik seperti radiografi, CT scan, dan PET (*Positron Emission Tomography*) scan mengandalkan radiasi ionisasi untuk menghasilkan gambar internal tubuh. Metode-metode ini memungkinkan deteksi kondisi seperti patah tulang, tumor, dan penyakit vaskular dengan detail yang tidak mungkin diperoleh melalui metode non-radiasi. Dalam terapi, radiasi ionisasi digunakan dalam radioterapi untuk mengobati berbagai jenis kanker. Dengan mengarahkan radiasi ke jaringan kanker secara presisi, sel kanker dapat dihancurkan atau pertumbuhannya diperlambat, seringkali dengan meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat di sekitarnya. Penggunaan radiasi dalam kedokteran harus selalu berada di bawah prinsip pengurangan risiko dan pengawasan dosis yang ketat, untuk memastikan bahwa manfaatnya melebihi potensi bahaya.

2.4 Efek Biologis Radiasi Ionisasi

2.4.1 Interaksi Radiasi dengan Sel dan Jaringan Biologis

Radiasi ionisasi, ketika berinteraksi dengan sel dan jaringan biologis, dapat mengakibatkan perubahan signifikan pada tingkat molekuler dan seluler. Saat radiasi menembus jaringan tubuh, ia dapat menyebabkan ionisasi molekul, terutama air, yang merupakan komponen utama dari sel. Proses ini menghasilkan radikal bebas, yang dapat merusak komponen sel, termasuk protein, lipid, dan DNA. Kerusakan ini tergantung pada jenis dan dosis

radiasi, serta jenis jaringan yang terpapar. Sel-sel dengan tingkat pembelahan yang tinggi, seperti sel-sel kulit atau sel darah, umumnya lebih sensitif terhadap radiasi. Efek radiasi dapat berkisar dari kerusakan ringan yang dapat diperbaiki oleh mekanisme perbaikan sel, hingga kerusakan yang cukup parah yang mengakibatkan kematian sel atau malformasi.

2.4.2 Efek Radiasi pada DNA dan Potensi Mutagenik

DNA merupakan target utama dan paling kritis dari efek radiasi ionisasi. Radiasi dapat menyebabkan berbagai jenis kerusakan pada DNA, seperti pemutusan untai ganda, pemutusan untai tunggal, serta perubahan atau mutasi pada basa DNA. Kerusakan ini dapat berakibat pada kesalahan dalam replikasi dan transkripsi DNA, yang pada gilirannya dapat menyebabkan mutasi genetik. Dalam beberapa kasus, mutasi ini mungkin tidak signifikan, tetapi dalam kasus lain, terutama jika mempengaruhi gen tertentu, seperti gen yang mengatur siklus sel atau reparasi DNA, dapat meningkatkan risiko terjadinya kanker. Pentingnya pemahaman tentang efek radiasi pada DNA terletak pada kemampuannya untuk menentukan dosis radiasi yang aman dan efektif, terutama dalam konteks terapi radiasi dan perlindungan radiasi.

2.4.3 Respon Immunologis terhadap Paparan Radiasi

Paparan radiasi juga mempengaruhi sistem imun. Radiasi ionisasi dapat menyebabkan perubahan pada fungsi sel imun, seperti limfosit, dan dapat mengubah respons imun tubuh. Misalnya, paparan radiasi dalam dosis tinggi dapat menyebabkan penurunan jumlah limfosit, yang mengurangi kemampuan tubuh untuk melawan infeksi dan penyakit. Sebaliknya, dalam beberapa kasus, radiasi dapat merangsang respons imun, sebuah fenomena yang dimanfaatkan dalam beberapa bentuk terapi kanker, di mana radiasi digunakan untuk merangsang sistem imun melawan sel kanker. Memahami dinamika ini penting tidak hanya untuk mengelola efek samping radiasi dalam pengobatan kanker tetapi juga dalam penelitian dan pengembangan strategi perlindungan radiasi yang lebih efektif.

2.5 Prinsip-prinsip Perlindungan Radiasi

2.5.1 Konsep ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*)

Konsep ALARA merupakan prinsip fundamental dalam pengelolaan radiasi, yang menekankan pada minimisasi paparan radiasi kepada individu dan lingkungan sejauh yang wajar dan praktis. Prinsip ini berakar pada pengakuan bahwa paparan radiasi, terlepas dari dosisnya, selalu memiliki potensi risiko. Oleh karena itu, tujuan utamanya adalah untuk menyeimbangkan manfaat penggunaan radiasi dengan risiko yang mungkin ditimbulkannya. Ini melibatkan penggunaan strategi seperti optimasi teknik pencitraan untuk mengurangi dosis radiasi, membatasi jumlah paparan radiasi yang tidak perlu, dan menggunakan peralatan yang meminimalkan emisi radiasi. ALARA bukan hanya prinsip teknis, tetapi juga filosofi kerja yang mengutamakan keselamatan dalam setiap aspek penggunaan radiasi.

2.5.2 Penggunaan Pelindung dan Perisai Radiasi

Penggunaan pelindung dan perisai radiasi adalah salah satu aspek kunci dalam praktik perlindungan radiasi. Bahan pelindung seperti timbal digunakan dalam apron, kacamata, dan perisai lainnya untuk melindungi pengguna dan pasien dari paparan radiasi yang tidak perlu. Perisai ini dirancang untuk menyerap atau menghamburkan radiasi, sehingga mengurangi jumlah radiasi yang mencapai tubuh. Selain itu, perisai radiasi juga digunakan dalam desain ruang di mana alat-alat radiasi digunakan, seperti ruang sinar-X atau ruang CT scan, untuk memastikan bahwa radiasi tidak menyebar ke area lain. Pemilihan dan penggunaan perisai yang tepat sangat penting, tidak hanya untuk melindungi tenaga kesehatan tetapi juga untuk memastikan keselamatan pasien dan publik.

2.5.3 Protokol Keselamatan dan Pengawasan Dosis Radiasi

Protokol keselamatan dan pengawasan dosis radiasi adalah komponen penting dalam mengelola risiko yang terkait dengan penggunaan radiasi. Protokol ini mencakup pedoman tentang cara penggunaan alat radiasi, prosedur untuk menghindari paparan yang tidak perlu, dan pedoman untuk mengevaluasi dan mengawasi dosis

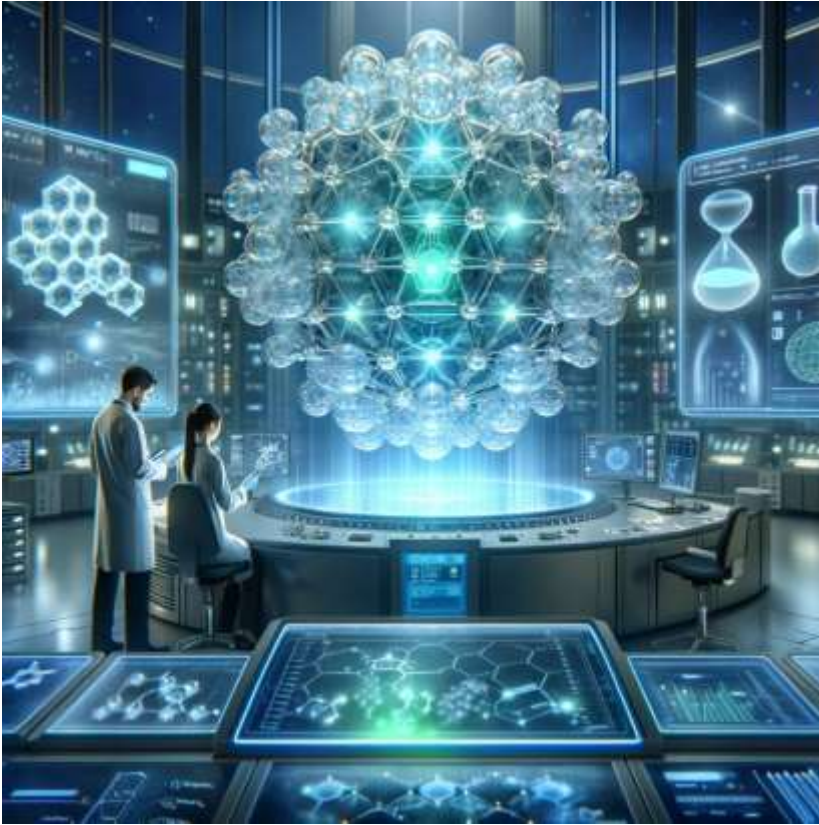
radiasi yang diterima oleh individu. Pengawasan dosis melibatkan penggunaan dosimeter, yang dapat dipakai oleh tenaga kesehatan untuk memantau paparan radiasi yang diterima selama periode waktu tertentu. Selain itu, ada sistem pemantauan lingkungan untuk mendeteksi dan mengevaluasi tingkat radiasi di fasilitas kesehatan. Protokol ini juga mencakup pelatihan dan pendidikan reguler bagi tenaga kesehatan tentang risiko radiasi dan cara mengelolanya, memastikan bahwa semua yang terlibat dalam penggunaan radiasi memiliki pengetahuan yang diperlukan untuk melakukan tindakan yang aman dan bertanggung jawab.

Melalui penerapan prinsip ALARA, penggunaan pelindung radiasi yang efektif, dan penerapan protokol keselamatan yang ketat, risiko yang terkait dengan penggunaan radiasi ionisasi dalam kedokteran dapat diminimalisir. Ini menjamin bahwa manfaat penting yang diberikan oleh teknologi berbasis radiasi dalam diagnosis dan pengobatan dapat dinikmati dengan mempertahankan standar keselamatan dan kesehatan yang tinggi.

2.6 Teknologi Nanopartikel dalam Perlindungan Radiasi

2.6.1 Pengembangan Nanomaterial untuk Perlindungan Radiasi

Dalam beberapa dekade terakhir, nanoteknologi telah muncul sebagai bidang inovatif dalam pengembangan material perlindungan radiasi. Nanomaterial, dengan ukuran partikelnya yang sangat kecil (biasanya antara 1-100 nanometer), menunjukkan sifat unik yang berpotensi untuk revolusi dalam perlindungan radiasi. Nanopartikel khusus telah dikembangkan untuk menyerap atau menghamburkan radiasi ionisasi lebih efektif daripada material konvensional. Misalnya, nanopartikel berbasis timbal atau bismut telah diteliti untuk kemampuan penyerapan sinar-X dan sinar gamma yang lebih baik. Keunggulan utama dari nanopartikel ini adalah kemampuan mereka untuk disesuaikan untuk aplikasi spesifik, seperti perlindungan radiasi yang ringan dan fleksibel untuk pakaian pelindung, atau pengembangan perisai radiasi yang lebih efisien untuk peralatan medis.



A futuristic scene of advanced nanotechnology use in radiation protection. Designed by: Dito Anurogo with AI

2.6.2 Nanoteknologi dalam Deteksi dan Mitigasi Efek Radiasi

Selain dalam perlindungan, nanoteknologi juga memainkan peran penting dalam deteksi dan mitigasi efek radiasi. Nanosensor, yang menggabungkan nanopartikel dengan sistem deteksi, telah dikembangkan untuk mengidentifikasi dan mengukur tingkat radiasi dengan kepekaan dan akurasi yang tinggi. Ini sangat berguna dalam pemantauan lingkungan dan keselamatan di fasilitas yang menangani radiasi. Selain itu, nanoteknologi telah dieksplorasi dalam mengembangkan metode untuk mitigasi efek radiasi, terutama dalam konteks medis. Nanopartikel tertentu telah diteliti untuk kemampuannya mengurangi kerusakan yang disebabkan

oleh radiasi pada sel dan jaringan, dengan menyerap radikal bebas atau memfasilitasi proses perbaikan sel.

Nanopartikel yang digunakan dalam konteks mitigasi radiasi ini dapat bertindak sebagai antioksidan nano-dimensi, menargetkan dan meminimalkan kerusakan oksidatif yang disebabkan oleh radiasi. Penelitian ini memiliki potensi besar dalam meningkatkan hasil terapi radiasi, mengurangi efek samping, dan bahkan dalam perawatan dan pemulihan pasca-radiasi.

Di samping aplikasi medis, nanoteknologi juga menawarkan solusi untuk mitigasi dampak radiasi dalam industri dan lingkungan. Misalnya, nanopartikel dapat digunakan dalam pembersihan lingkungan yang terkontaminasi radiasi, mengikat dan menetralkan partikel radioaktif. Ini merupakan kemajuan yang penting, terutama di lokasi-lokasi yang terkena dampak kebocoran radiasi atau kecelakaan nuklir.

Pemanfaatan nanoteknologi dalam deteksi dan mitigasi efek radiasi juga membuka jalan untuk penelitian lebih lanjut mengenai aplikasi yang lebih luas. Potensi pengembangan sistem pemantauan radiasi yang lebih canggih, yang dapat terintegrasi dengan jaringan cerdas atau sistem IoT (Internet of Things) untuk pemantauan real-time, adalah area yang menjanjikan. Sistem seperti ini bisa sangat berguna dalam pengawasan keselamatan di fasilitas nuklir, rumah sakit, dan industri yang menggunakan atau menghasilkan radiasi. Selain itu, dalam konteks penelitian, nanoteknologi memberikan kesempatan untuk memahami lebih dalam tentang mekanisme kerusakan seluler yang disebabkan oleh radiasi dan cara-cara mengatasinya. Ini dapat membantu dalam pengembangan terapi baru dan lebih efektif untuk kondisi yang disebabkan atau diperburuk oleh paparan radiasi.

2.6.3 Studi Kasus: Penggunaan Nanopartikel dalam Terapi Radiasi

Salah satu aplikasi yang menarik dari nanoteknologi dalam kedokteran adalah penggunaannya dalam terapi radiasi. Nanopartikel telah digunakan untuk meningkatkan efektivitas terapi radiasi terhadap sel kanker. Sebagai contoh, nanopartikel emas telah diteliti karena kemampuannya untuk meningkatkan

penyerapan radiasi pada sel kanker. Ketika nanopartikel emas diinjeksikan ke dalam tumor dan kemudian terkena radiasi, mereka dapat meningkatkan dosis radiasi yang diterima oleh sel kanker tanpa meningkatkan dosis pada jaringan sehat di sekitarnya. Ini memungkinkan penargetan yang lebih efektif dan mengurangi efek samping pada pasien. Penelitian ini masih berlangsung, tetapi potensinya untuk meningkatkan hasil terapi kanker sangat signifikan.

Melalui kemajuan dalam nanoteknologi, ada peluang yang besar untuk tidak hanya meningkatkan perlindungan terhadap radiasi tetapi juga meningkatkan diagnosis, terapi, dan mitigasi efek radiasi. Nanopartikel menawarkan pendekatan baru yang sangat menjanjikan dalam perang melawan efek negatif radiasi, baik dalam konteks medis maupun lingkungan.

2.7 Aspek Hukum dan Etika dalam Penggunaan Radiasi

2.7.1 Regulasi Internasional dan Nasional tentang Penggunaan Radiasi

Regulasi penggunaan radiasi merupakan aspek penting yang menjamin keamanan dan efektivitasnya, baik dalam praktik medis maupun dalam penelitian. Secara internasional, organisasi seperti *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dan *World Health Organization* (WHO) menetapkan pedoman dan standar untuk penggunaan radiasi, termasuk aspek keselamatan, perlindungan, dan pengawasan. Pada tingkat nasional, masing-masing negara memiliki regulasi tersendiri yang mengatur penggunaan dan penanganan radiasi. Regulasi ini mencakup perizinan untuk pengoperasian peralatan radiasi, standar keselamatan untuk fasilitas radiasi, dan pengawasan dosis radiasi bagi tenaga medis dan pasien. Kepatuhan terhadap regulasi-regulasi ini esensial untuk mencegah penyalahgunaan radiasi dan untuk melindungi masyarakat dari paparan radiasi yang tidak perlu atau berbahaya.

2.7.2 Etika dalam Penggunaan Radiasi pada Pasien dan Penelitian

Aspek etika dalam penggunaan radiasi sangat penting, terutama dalam konteks medis. Pertimbangan etis melibatkan pengambilan keputusan tentang kapan dan bagaimana menggunakan radiasi, dengan mempertimbangkan manfaat potensial dibandingkan dengan risiko. Hal ini termasuk memastikan bahwa pasien mendapat informasi yang cukup tentang prosedur yang melibatkan radiasi, risikonya, dan alternatif yang tersedia, sehingga mereka dapat memberikan persetujuan yang terinformasi. Dalam penelitian, etika menjadi pusat dalam merancang studi yang melibatkan paparan radiasi, memastikan bahwa risiko bagi subjek penelitian diminimalkan dan selalu ada manfaat ilmiah yang jelas. Peneliti juga harus mematuhi prinsip-prinsip etika penelitian, termasuk peninjauan dan persetujuan oleh komite etika penelitian.

2.7.3 Kasus-kasus Kontroversial dan Studi Etika terkait Radiasi

Telah ada beberapa kasus kontroversial dalam sejarah yang berkaitan dengan penggunaan radiasi, yang menyoroti pentingnya etika dan regulasi yang kuat. Salah satu contohnya adalah insiden Chernobyl, yang menunjukkan konsekuensi bencana penggunaan radiasi yang tidak aman. Kasus lainnya termasuk eksperimen medis tanpa persetujuan yang memadai pada pasien, penggunaan radiasi dalam perang, dan penanganan limbah radioaktif. Studi kasus-kasus ini memberikan pelajaran penting tentang pentingnya keselamatan radiasi, perlindungan lingkungan, dan perlunya transparansi serta tanggung jawab etis dalam penggunaan radiasi.

2.8 Masa Depan dan Inovasi dalam Perlindungan Radiasi

2.8.1 Tren Terkini dan Penelitian Masa Depan dalam Fisika Radiasi

Dunia fisika radiasi terus berkembang dengan adanya inovasi dan penelitian yang berfokus pada peningkatan efektivitas dan keamanan penggunaan radiasi. Salah satu tren terkini adalah pengembangan material pelindung radiasi yang lebih ringan, fleksibel, dan efisien, seperti penggunaan nanomaterial yang telah

dibahas sebelumnya. Penelitian juga sedang berfokus pada pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi radiasi pada tingkat molekuler, yang bisa membuka jalan untuk strategi perlindungan dan terapi yang lebih tepat. Selain itu, terdapat peningkatan minat dalam pengembangan teknologi non-ionisasi untuk pengganti beberapa aplikasi radiasi ionisasi dalam medis, seperti penggunaan ultrasonik atau MRI, yang menawarkan metode alternatif yang lebih aman untuk pencitraan diagnostik.

2.8.2 Peran Kecerdasan Buatan dan Big Data dalam Manajemen Risiko Radiasi

Kecerdasan buatan (AI) dan big data menawarkan potensi besar dalam manajemen risiko radiasi. AI dapat digunakan untuk memprediksi penyebaran radiasi dalam lingkungan tertentu, mengoptimalkan protokol perlindungan radiasi, dan bahkan dalam desain alat-alat radiasi yang lebih aman. Dengan menganalisis data yang besar dan kompleks dari berbagai sumber, AI bisa membantu dalam membuat keputusan yang lebih tepat mengenai paparan radiasi dan perlindungan yang diperlukan. Big data juga berperan dalam memantau dan menganalisis tren paparan radiasi pada populasi atau lingkungan tertentu, yang bisa memberikan wawasan berharga untuk pengembangan kebijakan kesehatan publik dan standar keselamatan.

2.8.3 Visi Futuristik: Perlindungan Radiasi dalam Konteks Perjalanan Antariksa dan Kolonisasi Planet

Salah satu bidang yang paling menarik dan futuristik dalam perlindungan radiasi adalah aplikasinya dalam konteks perjalanan antariksa dan kolonisasi planet. Di luar atmosfer Bumi, astronot terpapar pada tingkat radiasi yang jauh lebih tinggi, terutama dari radiasi kosmik dan partikel matahari. Mengembangkan metode perlindungan radiasi yang efektif adalah kunci untuk misi jangka panjang, seperti misi ke Mars atau pembangunan habitat di luar Bumi. Ini termasuk pengembangan pakaian antariksa yang dapat melindungi dari radiasi, serta material bangunan untuk habitat yang dapat menahan paparan radiasi luar angkasa. Selain itu, pemahaman tentang efek biologis radiasi dalam kondisi

mikrogravitasi dan pada jarak jauh dari Bumi juga penting untuk memastikan kesehatan jangka panjang para astronot.

2.9 Konklusi dan Rekomendasi

2.9.1 Konklusi

Bab ini telah menyelidiki berbagai aspek penting dari radiasi ionisasi dalam konteks kedokteran, mulai dari dasar fisiknya, aplikasi dalam medis, hingga pertimbangan etika dan sosial. Kita telah melihat bagaimana radiasi digunakan dalam alat-alat medis untuk diagnosis dan terapi, serta efek biologisnya pada sel dan DNA. Pentingnya perlindungan radiasi telah ditekankan, baik melalui prinsip ALARA, penggunaan pelindung dan perisai, serta protokol keselamatan yang ketat. Nanoteknologi telah diidentifikasi sebagai bidang inovatif dalam perlindungan dan pengelolaan risiko radiasi. Aspek hukum dan etika telah dibahas untuk menyoroti kebutuhan regulasi yang ketat dan pemikiran etis dalam penggunaan radiasi. Akhirnya, kita telah menjelajahi tren masa depan dan inovasi dalam bidang ini, termasuk peran AI dan big data, serta aplikasi radiasi dalam perjalanan antariksa dan kolonisasi planet.

2.9.2 Implikasi untuk Praktisi Medis, Peneliti, dan Masyarakat

Untuk praktisi medis, pemahaman yang mendalam tentang radiasi ionisasi penting dalam menjamin penggunaan yang aman dan efektif dalam diagnosa dan terapi. Peneliti di bidang ini harus terus mengeksplorasi metode baru untuk meningkatkan efektivitas perlindungan radiasi dan mengurangi efek sampingnya. Masyarakat pada umumnya juga perlu diberikan pendidikan tentang radiasi, untuk mengurangi ketakutan dan kesalahpahaman serta untuk memungkinkan keputusan yang lebih terinformasi terkait dengan pemeriksaan kesehatan dan pilihan pengobatan.

2.9.3 Arah Masa Depan dan Pertanyaan Terbuka di Bidang Ini

Masih ada banyak pertanyaan terbuka dan arah masa depan yang menarik dalam studi radiasi. Bagaimana kita bisa mengembangkan teknologi perlindungan radiasi yang lebih efektif dan terjangkau? Apa peran AI dan big data dalam mengoptimalkan penggunaan radiasi, terutama dalam penelitian medis? Bagaimana

kita dapat mempersiapkan tantangan penggunaan radiasi dalam konteks perjalanan antariksa jangka panjang dan kolonisasi planet? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini akan membentuk masa depan penggunaan radiasi dalam kedokteran dan di luar itu, dengan potensi untuk mengubah secara signifikan cara kita mendiagnosis dan mengobati penyakit, serta memperluas batas-batas pengetahuan dan teknologi manusia.

2.9.4 Rekomendasi

Untuk Peneliti:

Fokus pada Inovasi Material Baru: Penelitian tentang material baru untuk perlindungan radiasi, khususnya nanomaterial, harus diperluas untuk menemukan solusi yang lebih efektif dan efisien.

Integrasi dengan AI dan Big Data: Menjelajahi cara-cara untuk mengintegrasikan kecerdasan buatan dan big data dalam pengelolaan risiko radiasi, yang bisa membantu dalam pemodelan dan prediksi paparan radiasi.

Studi Longitudinal Efek Radiasi: Melakukan studi jangka panjang tentang efek radiasi pada kesehatan manusia, terutama dalam konteks paparan jangka panjang dan dosis rendah.

Untuk Pendidik:

Kurikulum Terintegrasi: Mengembangkan kurikulum yang mengintegrasikan konsep fisika radiasi dengan aplikasi klinisnya untuk mahasiswa kedokteran dan fisika medis.

Penyuluhan tentang Radiasi: Menyediakan informasi dan pendidikan yang jelas dan akurat tentang radiasi kepada masyarakat umum, untuk mengurangi ketakutan dan miskonsepsi.

Pelatihan Keselamatan Radiasi: Menyediakan pelatihan keselamatan radiasi untuk profesional kesehatan, memastikan bahwa mereka memahami dan dapat menerapkan protokol keselamatan.

Untuk Masyarakat:

Edukasi dan Kesadaran: Menyediakan akses ke informasi yang akurat tentang penggunaan dan keselamatan radiasi, serta manfaatnya dalam medis dan teknologi.

Partisipasi dalam Diskusi Publik: Mendorong partisipasi aktif dalam diskusi tentang penggunaan energi nuklir dan teknologi radiasi, memastikan suara masyarakat didengar dalam pembuatan kebijakan.

Untuk Pemerintah:

Regulasi dan Pengawasan: Mengembangkan dan memperkuat regulasi yang mengatur penggunaan radiasi, termasuk pengawasan ketat terhadap fasilitas medis dan industri.

Investasi dalam Riset dan Pengembangan: Menyediakan dana dan sumber daya untuk riset terkait radiasi, termasuk studi tentang efek jangka panjang dan pengembangan teknologi baru.

Kebijakan Perlindungan Publik: Menyusun kebijakan untuk melindungi masyarakat dari paparan radiasi yang tidak perlu, terutama dalam konteks kecelakaan nuklir dan limbah radioaktif.

Untuk Akademisi:

Kolaborasi Interdisipliner: Mendorong kolaborasi antar berbagai disiplin ilmu untuk penelitian terpadu tentang radiasi, termasuk fisika, biologi, kedokteran, dan teknik.

Pengembangan Program Studi: Menawarkan program studi yang terkait dengan fisika radiasi dan perlindungannya, memperkaya wawasan akademis dan profesional di bidang ini.

Untuk Pebisnis:

Pengembangan Produk Inovatif: Mendorong pengembangan dan komersialisasi produk perlindungan radiasi yang baru dan lebih efektif.

Penerapan Standar Keselamatan: Memastikan bahwa perusahaan yang menggunakan atau memproduksi teknologi radiasi mematuhi standar keselamatan yang tinggi.

Untuk Pengambil Kebijakan:

Kebijakan Berbasis Bukti: Membuat kebijakan yang didukung oleh penelitian ilmiah terkini, memastikan bahwa kebijakan tersebut mencerminkan pemahaman terbaru tentang risiko dan manfaat radiasi.

Dialog dengan Komunitas Ilmiah: Melibatkan komunitas ilmiah dalam pembuatan kebijakan yang berkaitan dengan regulasi dan penggunaan radiasi, memastikan keputusan yang diambil berdasarkan keahlian dan bukti.

Peningkatan Kesadaran Publik: Mendorong program untuk meningkatkan kesadaran publik tentang penggunaan dan keselamatan radiasi, termasuk implikasi sosial dan etika dari penggunaannya.

DAFTAR PUSTKA

- Boschi, F. & Spinelli, A. (2020). Nanoparticles for Cerenkov and Radioluminescent Light Enhancement for Imaging and Radiotherapy. *Nanomaterials*, 10. <https://doi.org/10.3390/nano10091771>.
- Buchberger, B., Scholl, K., Krabbe, L., Spiller, L., & Lux, B. (2022). Radiation exposure by medical X-ray applications. *GMS German Medical Science*, 20. <https://doi.org/10.3205/000308>.
- Bryant, P. (2020). Communicating radiation risk: the role of public engagement in reaching ALARA. *Journal of Radiological Protection*, 41, S1 - S8. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abd348>.
- Busato, F., Khouzai, B., & Mognato, M. (2022). Biological Mechanisms to Reduce Radioresistance and Increase the Efficacy of Radiotherapy: State of the Art. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms231810211>.
- Chew, M., Jones, B., Hill, M., Bradley, D., & Bradley, D. (2021). Radiation, a two-edged sword: From untoward effects to fractionated radiotherapy. *Radiation Physics and Chemistry*, 178, 108994. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108994>.
- Chmil, V., Filipová, A., & Tichý, A. (2023). Looking for the phoenix: the current research on radiation countermeasures. *International Journal of Radiation Biology*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2173822>.
- Dahiya, D., Kichloo, A., Tuma, F., Albosta, M., & Wani, F. (2021). Radiation Proctitis and Management Strategies. *Clinical Endoscopy*, 55, 22 - 32. <https://doi.org/10.5946/ce.2020.288>.
- Einstein, A. (2020). Medical Radiation Exposure to the U.S. Population: The Turning Tide. *Radiology*, 200200. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200200>.

- Exten, R. (2020). Shedding light on the dark side of radiology. Nursing. <https://doi.org/10.1097/01.NURSE.0000654164.00376.99>.
- Fionda, B., Boldrini, L., D'Aviero, A., Lancellotta, V., Gambacorta, M., Kovács, G., Patarnello, S., Valentini, V., & Tagliaferri, L. (2020). Artificial intelligence (AI) and interventional radiotherapy (brachytherapy): state of art and future perspectives. *Journal of Contemporary Brachytherapy*, 12, 497 - 500. <https://doi.org/10.5114/jcb.2020.100384>.
- Furukawa, S., Nagamatsu, A., Neno, M., Fujimori, A., Kakinuma, S., Katsube, T., Wang, B., Tsuruoka, C., Shirai, T., Nakamura, A., Sakaue-Sawano, A., Miyawaki, A., Harada, H., Kobayashi, M., Kobayashi, J., Kunieda, T., Funayama, T., Suzuki, M., Miyamoto, T., Hidema, J., Yoshida, Y., & Takahashi, A. (2020). Space Radiation Biology for "Living in Space". *BioMed Research International*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4703286>.
- Jit, B., Pradhan, B., Dash, R., Bhuyan, P., Behera, C., Behera, R., Sharma, A., Alcaraz, M., & Jena, M. (2021). Phytochemicals: Potential Therapeutic Modulators of Radiation Induced Signaling Pathways. *Antioxidants*, 11. <https://doi.org/10.3390/antiox11010049>.
- Kazmierska, J., Hope, A., Spezi, E., Beddar, S., Nailon, W., Osong, B., Ankolekar, A., Choudhury, A., Dekker, A., Redalen, K., & Traverso, A. (2020). From multisource data to clinical decision aids in radiation oncology: the need for a clinical data science community. *Radiotherapy and Oncology: Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.09.054>.
- Lawler, N., Ho, D., Evans, C., Wallace, V., & Iyer, K. (2020). Convergence of terahertz radiation and nanotechnology. *Journal of Materials Chemistry C*, 8, 10942-10955. <https://doi.org/10.1039/d0tc01716g>.
- Liu, T., Yang, K., & Liu, Z. (2020). Recent advances in functional nanomaterials for X-ray triggered cancer therapy. *Progress*

- in Natural Science: Materials International.
<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.09.009>.
- Mansouri, E., Mesbahi, A., Malekzadeh, R., & Mansouri, A. (2020). Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration. *Radiation and Environmental Biophysics*, 59, 583 - 600.
<https://doi.org/10.1007/s00411-020-00865-8>.
- Mehdipour, A., Yousefi-Ahmadipour, A., Kennedy, D., & Arababadi, M. (2021). Ionizing radiation and toll like receptors: A systematic review article. *Human Immunology*.
<https://doi.org/10.1016/j.humimm.2021.03.008>.
- Netherton, T., Cardenas, C., Rhee, D., Court, L., & Beadle, B. (2020). The Emergence of Artificial Intelligence within Radiation Oncology Treatment Planning. *Oncology*, 1-11.
<https://doi.org/10.1159/000512172>.
- Omer, H. (2021). Radiobiological effects and medical applications of non-ionizing radiation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28, 5585 - 5592. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.071>.
- Radojevic, M., Milosavljevic, N., Miladinović, T., Janković, S., & Folic, M. (2022). Review of compounds that exhibit radioprotective and/or mitigatory effects after application of diagnostic or therapeutic ionizing radiation. *International Journal of Radiation Biology*, 1-20.
<https://doi.org/10.1080/09553002.2022.2110308>.
- Sagkrioti, E., Biz, G., Takan, I., Asfa, S., Nikitaki, Z., Zanni, V., Kars, R., Hellweg, C., Azzam, E., Logotheti, S., Pavlopoulou, A., & Georgakilas, A. (2022). Radiation Type- and Dose-Specific Transcriptional Responses across Healthy and Diseased Mammalian Tissues. *Antioxidants*, 11.
<https://doi.org/10.3390/antiox11112286>.
- Sheng, K. (2020). Artificial intelligence in radiotherapy: a technological review. *Frontiers of Medicine*, 14, 431 - 449.
<https://doi.org/10.1007/s11684-020-0761-1>.
- Shin, E., Lee, S., Kang, H., Kim, J., Kim, K., Youn, H., Jin, Y., Seo, S., & Youn, B. (2020). Organ-Specific Effects of Low Dose

- Radiation Exposure: A Comprehensive Review. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.566244>.
- Szatkowska, M., & Krupa, R. (2020). Regulation of DNA Damage Response and Homologous Recombination Repair by microRNA in Human Cells Exposed to Ionizing Radiation. *Cancers*, 12. <https://doi.org/10.3390/cancers12071838>.
- Tamaddondoust, R., Wong, A., Chandrashekhar, M., Azzam, E., Alain, T., & Wang, Y. (2022). Identification of Novel Regulators of Radiosensitivity Using High-Throughput Genetic Screening. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms23158774>.
- Tian, X., Li, C., Liu, H., Li, P., He, J., & Gao, W. (2021). Applications of artificial intelligence in radiophysics. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 17, 1603 - 1607. https://doi.org/10.4103/jcrt.jcrt_1438_21.
- Zanzonico, P. (2020). Physics, Instrumentation, and Radiation Safety and Regulations. *Clinical Nuclear Medicine*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39457-8_1.

BAB 3

ULTRASONOGRAFI

Oleh Jannes Bastian Selly

3.1 Pendahuluan

Ultrasonografi (*ultrasonography*) atau dikenal dengan istilah USG, merupakan suatu teknik pencitraan terhadap suatu obyek tertentu yang letaknya tersembunyi dan tidak bisa dilihat secara langsung oleh indera penglihatan manusia. Cara kerja USG memanfaatkan prinsip pemantulan gelombang suara yang berfrekuensi tinggi (*ultrasound*). Dalam bidang kesehatan, terutama kedokteran, pemanfaatan teknik USG dibedakan untuk keperluan diagnostik maupun terapi. Untuk keperluan diagnostik, pencitraan USG digunakan untuk mendiagnosa penyakit yang mungkin terjadi, melalui citra yang ditampilkan jaringan atau organ target (Utari, 2011). Sedangkan untuk keperluan terapi, gelombang *ultrasound* yang digunakan adalah gelombang yang sangat presisi *High Intensity Focused Ultrasound* (HIFU) untuk menghancurkan jaringan abnormal dalam tubuh, tanpa melalui proses pembedahan ataupun radiasi yang memiliki resiko merusak jaringan disekitar target (Bushberg *et al.*, 2002).

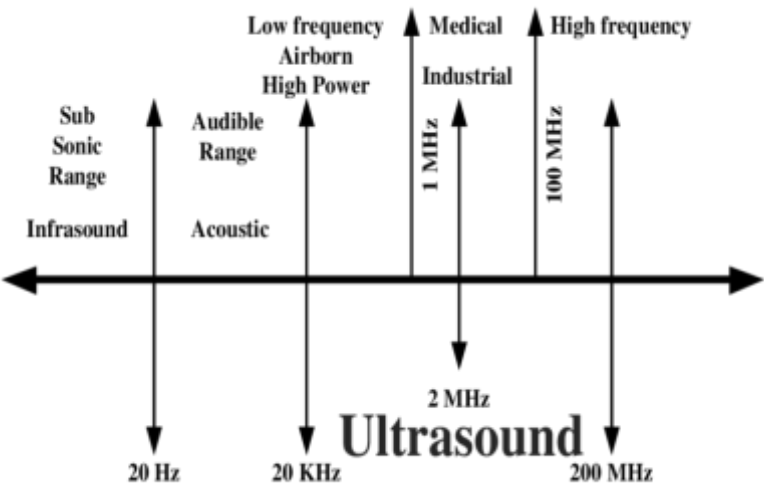
Pencitraan menggunakan teknik USG, dari segi keamanan masih menjadi rekomendasi khususnya untuk pencitraan janin dan rahim. Akan tetapi, citra USG sedikit lebih sulit untuk diinterpretasikan sehingga membutuhkan keahlian dan keterampilan khusus dari dokter. Dalam bab ini, akan dijelaskan secara rinci tentang prinsip kerja teknik USG dan pemanfaatannya dalam bidang kedokteran baik untuk diagnosa maupun terapi.

3.2 Gelombang *Ultrasound*

Gelombang suara merupakan bentuk energi mekanika yang menyebar melalui medium tertentu yang kontinu dan elastis dengan cara memampatkan dan menipiskan partikel sehingga mengubah susunannya. Gelombang suara dibedakan menjadi dua tipe yaitu

gelombang longitudinal dan gelombang transversal. Perbedaan antara jenis gelombang ini adalah pada arah gerak partikel dan arah perambatannya. Gerak partikel pada gelombang longitudinal, searah dengan perambatannya, sedangkan pada gelombang transversal, arah gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambatnya.

Berdasarkan frekuensi, gelombang bunyi dibedakan menjadi tiga jenis yaitu *infrasound*, *audiosound*, dan *ultrasound*. Gelombang infrasound memiliki frekuensi getar pada rentang nilai di bawah 20 Hz. Gelombang audiosound memiliki frekuensi pada rentang 20 Hz sampai 20 kHz, sedangkan gelombang ultrasound memiliki frekuensi di atas 20 kHz. Spektrum gelombang suara ditunjukkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Spektrum gelombang suara (Maadi, 2013)

3.3 Interaksi Gelombang *Ultrasound* dengan Materi

Interaksi antara gelombang *ultrasound* dengan materi ditentukan oleh sifat akustik materi tersebut, salah satunya adalah impedansi akustik. Impedansi akustik (*Z*) merupakan besaran fisis yang dihitung dengan mempertimbangkan faktor densitas medium (ρ) dengan kecepatan perambatan gelombang *ultrasound* (*c*) dalam medium menggunakan persamaan (p3.1)

$$Z = \rho c \quad (\text{p3.1})$$

Impedansi akustik memiliki satuan rayl, dimana 1 rayl = 1 kg/(m²s). Informasi nilai impedansi akustik beberapa material jaringan dalam tubuh ditampilkan dalam Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1. Nilai impedansi akustik beberapa material (Testoni, 2014)

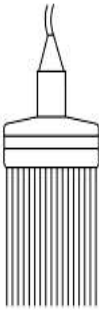
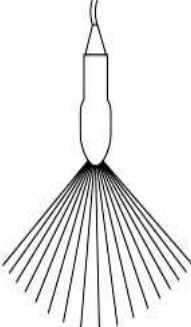
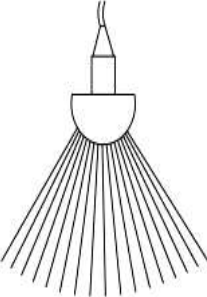
	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$c \left[\frac{m}{s} \right]$	$Z \left[\frac{kg}{m^2s} \right] (\times 10^6)$
Udara (STP)	1.2	330	0.0004
Darah	1060	1570	1.62
Tulang	1380-1810	4080	3.75-7.38
Lemak	920	1460	1.35
Paru-paru	400	900	0.36
Otot	1070	1580	1.65-1.74
Air	1000	1480	1.5

Nilai impedansi akustik suatu jaringan atau organ, berbanding lurus terhadap jumlah energi yang dipantulkan. Berdasarkan data pada Tabel 3.2, dapat diperoleh informasi bahwa tulang memiliki nilai impedansi akustik yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan udara, maka hampir semua energi yang dibawa oleh gelombang *ultrasound* akan dipantulkan kembali ke permukaan. Oleh karena itu pencitraan pada area yang terhalang oleh tulang, sebaiknya menggunakan teknik pencitraan lain seperti CT-scan, karena penggunaan USG tidak akan menghasilkan citra sonografi yang jelas.

3.4 Teknik Ultrasonografi (USG)

Teknik Ultrasonografi (USG) dalam bidang kedokteran memanfaatkan gelombang *ultrasound* pada rentang frekuensi 2MHz hingga 15MHz (Bushberg *et al.*, 2002). Gelombang *ultrasound* dihasilkan, oleh komponen transduser atau probe yang terbuat dari bahan kristal *piezoelektrik*. Probe USG terdiri dari tiga jenis yaitu probe sejajar (*linear*) umumnya digunakan untuk memindai bagian kecil yang dangkal di bawah permukaan kulit, seperti kelenjar tiroid pada leher. Probe jenis lain adalah probe cembung atau probe linear

melengkung (*curvilinear*), umumnya digunakan untuk pemindaian dibagian abdomen karena sudut pandangnya yang lebih luas dan daya tembus yang lebih dalam. Probe jenis ketiga adalah array bertahap atau probe jantung, ciri utamanya adalah memiliki lensa dan susunan berbentuk persegi. Probe jenis ini digunakan untuk memindai citra jantung yang kedalamannya paling tinggi. Ketiga jenis probe USG ditampilkan dalam Gambar 3.2.

	Linear Array	Sector (Phased) Array	Curved Linear Array
			
Frequency range	Higher (8–15 MHz)	Lower (2–6 MHz)	Higher (2–12 MHz)
Depth of imaging	Superficial (1–4 cm)	Deeper (4–8 cm)	Intermediate (2–6 cm)
Field of view	Linear, limited (depends on footprint)	Trapezoidal, wider at depth, narrow at the surface	Trapezoidal, wide at surface and depth

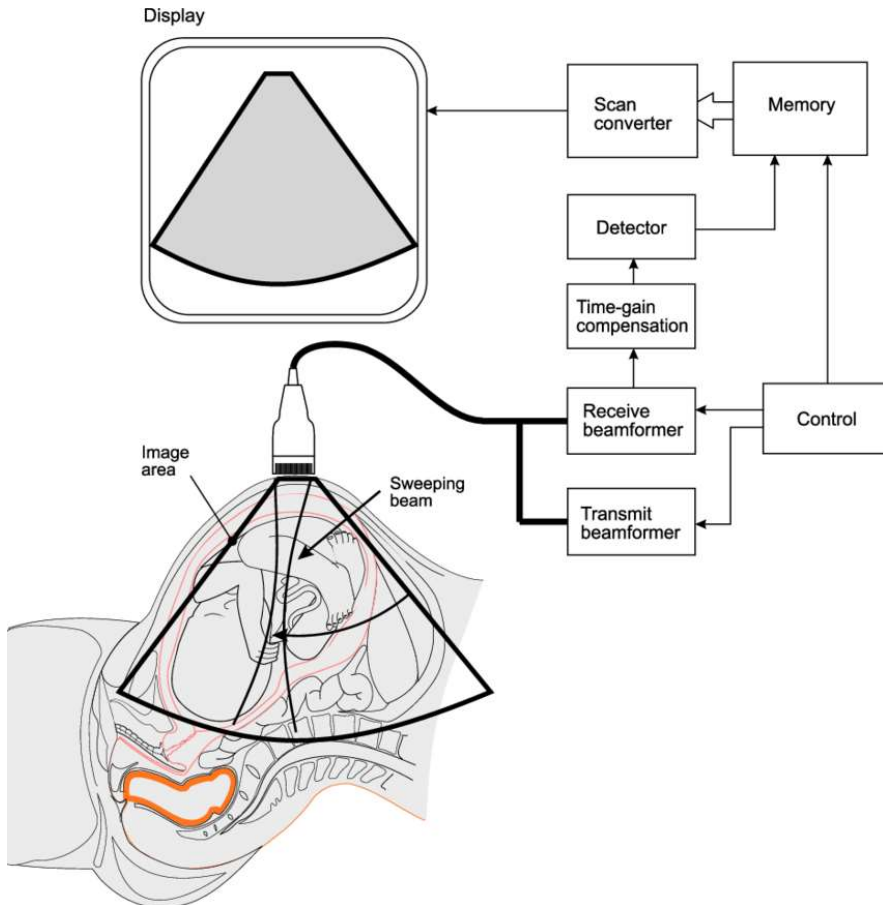
Gambar 3.2. Jenis probe USG dan kegunaannya

Probe dapat bekerja sebagai *transmitter* sekaligus *reciever*. Energi listrik yang diterima oleh probe akan menggetarkan kristal piezoelektrik sehingga timbul gelombang *ultrasound*, yang kemudian ditransmisikan ke dalam tubuh melalui permukaan kulit. Sebaliknya pantulan gelombang (*echo*) dari dalam tubuh setelah mengenai bidang batas jaringan atau organ, diterima oleh probe dan diubah menjadi sinyal listrik melalui sistem komputerisasi yang kemudian diproses dalam bentuk citra sonografi atau sonogram, sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Salah satu citra sonografi (sonogram)

Diagram tahap pencitraan dalam teknik USG ditampilkan dalam Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Tahap pemrosesan sinyal dalam teknik USG (Testoni, 2014)

Sumber gelombang dihasilkan melalui sebuah transduser atau probe. Gelombang ultrasound yang dibangkitkan oleh probe selanjutnya ditransmisikan melalui permukaan kulit kedalam tubuh. Permukaan kulit yang akan diletakan probe sebelumnya diolesi gel khusus sehingga mengurangi gesekan antara probe dengan kulit (Testoni, 2014). Gelombang *ultrasound* yang mengenai obyek tertentu di dalam tubuh akan mengalami pemantulan kembali ke permukaan dalam bentuk echo (gema) dan diterima oleh probe.

Echo yang diterima oleh probe sebagai akibat dari pantulan yang terjadi pada permukaan batas jaringan. Echo timbul dari

perbedaan sifat elastisitas medium yang berbeda-beda. Informasi mengenai jarak tempuh perambatan gelombang mulai dari saat dibangkitkan oleh probe hingga diterima kembali inilah yang kemudian diproses menjadi sonogram.

Kecepatan gelombang pantul dari setiap medium yang berbeda-beda, dan atenuasi akibat perbedaan kedalaman jaringan menjadi faktor koreksi yang dihitung dalam penyajian citra sonografi. Sebagai contoh, pada kedalaman sekitar 6 cm dari permukaan kulit, dengan frekuensi gelombang 7.5 MHz, terjadi atenuasi gelombang sebesar 31.5 dB, dan mengalami peningkatan hingga mencapai 52.5 dB pada kedalaman 10 cm. Tabel 3.2. menunjukkan kecepatan gelombang dan atenuasi yang terjadi pada beberapa jaringan tubuh.

Tabel 3.2. Kecepatan gelombang ultrasound (c) dan atenuasi (α) pada beberapa jaringan (Testoni, 2014)

	$c \left[\frac{m}{s} \right]$	$\alpha \left[\frac{dB}{MHz.cm} \right]$
Udara	330	≥ 10
Darah	1575	0.18
Tulang	4080	8
Lemak	1460	0.6
Paru-paru	900	30
Otot	1580	1.5
Air	1480	0.002

Sebagai kompensasi terhadap atenuasi (α) yang terjadi maka, dalam pemrosesan sinyal dilakukan koreksi pada tahapan *Time-Gain Compensation* (TGC), sehingga citra sonografi yang dihasilkan dipastikan akurat.

3.5 Pemanfaatan USG dalam Bidang Kedokteran

Pemanfaatan instrumen USG dalam bidang kedokteran, pada umumnya adalah untuk keperluan diagnosis, terapi, serta panduan dalam melakukan prosedur biopsi.

3.5.1 USG Diagnosis

USG diagnosis merupakan instrumen untuk mengevaluasi kerja sistem-sistem dalam tubuh. Hasil USG diganosis memberikan informasi apakah sistem yang terdiri dari organ dan jaringan dalam tubuh menjalankan fungsinya dengan baik atau tidak. Selain itu juga dapat diperkirakan penyebab kegagalan fungsi dari organ atau jaringan tersebut. Beberapa jenis USG diagnosis adalah:

1. USG Doppler, atau USG vaskular, merupakan teknik USG khusus untuk mengevaluasi pergerakan material tertentu seperti aliran darah melalui pembuluh darah, sehingga diperoleh informasi apakah terdapat kelainan pada sistem peredaran darah atau tidak. Contoh penggunaan USG dopler adalah pada instrumen Ekokardiograf, maupun transcranial doppler.
2. USG Perut (*Abdominal*), merupakan teknik USG menggunakan probe yang diarahkan melintasi permukaan kulit area perut yang memberikan informasi penyebab nyeri pada perut
3. USG Ginjal (*Renal*)
USG ginjal dilakukan untuk menilai ukuran, lokasi dan bentuk ginjal, termasuk struktur terkait seperti ureter dan kandung kemih (*bladder*), apakah terdapat hambatan atau infeksi di dalam atau disekitar organ ginjal.
4. USG Dada (Payudara), merupakan prosedur yang dilakukan apabila terdeteksi kelainan (dapat berupa benjolan) di permukaan dada (payudara). Pemeriksaan lanjutan dapat menggunakan prosedur mamografi jika benjolan berada lebih dalam pada jaringan payudara.
5. USG Panggul, merupakan prosedur yang dilakukan untuk mendapatkan informasi organ-organ yang berada di dalam panggul, diantara perut dan kaki, termasuk kandung kemih. Prostat, ovarium, rahim, dan vagina.
6. USG *Transvaginal*, merupakan prosedur USG panggul, namun pada USG transvaginal, probe dimasukkan ke dalam vagina untuk memeriksa jaringan rahim atau indung telur.

7. USG Thyroid, merupakan prosedur untuk memeriksa ukuran kelenjar tiroid, dan keberadaan lesi di dalam kelenjar
8. USG Transrectal, merupakan prosedur USG dengan memasukkan probe ke dalam rektum, dengan tujuan untuk mendeteksi kondisi abnormal pada jaringan di saluran rektum.

3.5.2 USG Terapi (Intervensi)

USG terapi menghasilkan output getaran akustik yang menimbulkan panas. Energi panas yang dihasilkan bertujuan untuk menghancurkan dan meluruhkan jaringan abnormal yang terdeteksi dalam tubuh. Energi panas yang dihasilkan melalui getaran akustik difokuskan pada target tertentu, hingga terjadi ablasi.

3.5.3 USG untuk Panduan Prosedur Tertentu

Selain diagnosis dan terapi, USG juga dimanfaatkan sebagai panduan untuk mengarahkan jarum untuk mengambil sampel cairan atau jaringan pada prosedur biopsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bushberg, T. J. *et al.* 2002. 'Ultrasound', in *The Essential Physics of Medical Imaging*.
- Maadi, M. 2013. *Integrated Circuit Design for Flip-Chip Bonded Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer*.
- Testoni, N. 2014. *Adaptive multiscale biological signal processing*.
- Utari, E. L. 2011. 'Analisa deteksi tepi janin dengan menggunakan metode prewitt dan canny', in *Simposium Nasional RAPI XIV-2015FT UMS*, pp. 101–110.

BAB 4

TERAPI RADIASI

Oleh Fitriyanti

4.1 Pendahuluan



Gambar 4.1. Terapi Radiasi
(Sumber : loong (2019))

Terapi radiasi atau biasa dikenal dengan istilah Radioterapi, merupakan salah satu bentuk pengobatan kanker dengan radiasi yang diarahkan ke satu titik untuk mengecilkan tumor atau membunuh sel kanker. Radioterapi sering kali menggunakan sinar X, tetapi juga dapat menggunakan proton atau jenis energi lain, seperti sinar gamma, contoh pemberian terapi radiasi ditunjukkan pada gambar 4.1

Terapi radiasi membunuh atau memperlambat pertumbuhan sel dengan menghancurkan DNA-nya. Setelah materi genetik rusak, sel kanker akan berhenti membelah diri dan mulai mati.

Efek terapi radiasi bekerja secara bertahap. Sel kanker mungkin perlu dikenai radiasi selama beberapa hari atau minggu hingga akhirnya hancur. Setelah radioterapi berakhir, sel kanker akan terus mati selama beberapa minggu atau bulan.

Radioterapi, kemoterapi, dan bedah adalah 3 pendekatan paling umum untuk mengobati kanker. Ketiganya sering digunakan bersama, seperti pada kemo-radiasi serentak atau secara berurutan, misalnya radioterapi kemudian bedah.

Berbagai metode dapat digunakan dalam upaya pengobatan penyakit kanker, termasuk salah satunya adalah radioterapi atau terapi radiasi. Terapi ini melibatkan pemberian radiasi tingkat tinggi dengan tujuan utama membunuh sel kanker, mencegah penyebarannya, serta mengecilkan ukuran tumor ganas. Hampir separuh dari pasien yang menerima diagnosis kanker direkomendasikan untuk menjalani terapi radiasi, atau setidaknya 4 dari 10 penderita kanker mendapat saran untuk mengadopsi terapi radiasi sebagai bagian dari rencana pengobatan mereka.

Meskipun radiasi sering dikaitkan dengan penyebab penyakit kanker, dalam konteks terapi ini, dosis radiasi yang digunakan tidak cukup besar untuk memicu perkembangan kanker baru. Pada dosis tinggi, terapi radiasi memiliki efek membunuh atau memperlambat pertumbuhan sel kanker dengan merusak DNA mereka. Sel kanker yang mengalami kerusakan pada DNA dan berhasil diperbaiki dapat berhenti membelah atau mengalami kematian. Setelah sel-sel yang mengalami kerusakan mati, tubuh akan memecah dan mengeliminasi mereka. Namun, penting untuk dicatat bahwa terapi radiasi tidak langsung menyebabkan kematian sel kanker. Diperlukan beberapa hari hingga beberapa minggu perawatan sebelum kerusakan pada DNA membuat seluruh bagian sel kanker mengalami kematian. Sel kanker kemudian akan mengalami penurunan bertahap, mungkin berlangsung selama beberapa minggu atau berbulan-bulan setelah terapi radiasi selesai. Terapi radiasi juga dirancang untuk merusak sel normal sesedikit mungkin, dan sel-sel normal memiliki kemampuan untuk memperbaiki sebagian besar kerusakan yang disebabkan oleh radiasi.

Walaupun fokus utama radioterapi adalah mengobati kanker, metode ini juga diterapkan dalam mengatasi penyakit non-kanker

seperti tumor, penyakit tiroid, dan berbagai kelainan darah. Terapi radiasi dapat diadaptasi untuk mengatasi berbagai kondisi medis.

Kesehatan tubuh ditandai oleh kinerja optimal sel-sel tubuh. Kondisi ketika sel-sel berfungsi secara tidak normal dapat menjadi pemicu penyakit kanker.

Kanker, sebagai salah satu tantangan kesehatan utama di dunia, terus menjadi fokus penelitian dan upaya pengobatan yang tak kenal lelah. Dalam upaya untuk mengatasi dan memerangi pertumbuhan sel kanker yang tidak terkendali, terapi radiasi muncul sebagai senjata penting dalam arsenal pengobatan kanker.

Terapi radiasi, atau radioterapi, melibatkan penggunaan pancaran energi khusus yang ditargetkan untuk merusak dan menghancurkan sel-sel kanker. Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya untuk menargetkan area tertentu di dalam tubuh di mana sel kanker berkembang, dengan upaya minimal merusak jaringan sehat di sekitarnya.

Dalam bab ini, kita akan menjelajahi lebih dalam tentang terapi radiasi: Apa saja jenis dari terapi radiasi, bagaimana cara kerjanya, serta dampaknya terhadap pasien. Dengan pemahaman yang mendalam tentang terapi radiasi, diharapkan pembaca dapat mengambil wawasan yang lebih luas dalam peran kritisnya dalam perang melawan kanker. (loong. 2019)

4.2 Jenis Terapi Radiasi

Terapi radiasi, yang dikenal sebagai radioterapi, dapat dikelompokkan menjadi dua jenis utama: terapi radiasi internal dan terapi radiasi eksternal. Kedua jenis ini memiliki pendekatan yang berbeda dalam memberikan dosis radiasi untuk mengobati sel kanker. Berikut adalah penjelasan singkat mengenai kedua jenis terapi radiasi tersebut:

4.2.1 Terapi radiasi eksternal

Terapi radiasi eksternal merupakan suatu pendekatan pengobatan kanker yang menggunakan tingkat radiasi yang tinggi untuk mengatasi tumor dan sel kanker dari luar tubuh pasien. Metode ini dilakukan dengan menggunakan mesin khusus yang mengarahkan radiasi langsung ke lokasi kanker.

Beberapa jenis terapi radiasi eksternal melibatkan:

1. Terapi Proton:

Teknik ini memanfaatkan proton untuk mengirimkan radiasi langsung ke area tumor. Terapi ini dapat disesuaikan dengan bentuk dan kedalaman tumor, sehingga dapat melindungi sel sehat dari efek penyebaran kanker. Terapi proton dapat digunakan untuk mengatasi berbagai jenis kanker, termasuk prostat, paru-paru, hati, kerongkongan, otak, dan jenis tumor langka lainnya, dengan pengobatan yang disesuaikan oleh dokter.

2. Akselerator Linier MRI:

Pendekatan ini digunakan untuk melacak tumor dengan memanfaatkan gambaran jaringan lunak selama pelaksanaan prosedur. Selama perawatan, MRI memberikan gambaran jaringan dalam tubuh, sementara radiasi diarahkan ke tumor. Teknik ini memungkinkan penyesuaian pengiriman radiasi sesuai kebutuhan. Biasanya, dokter memilih tindakan ini untuk mengatasi beberapa jenis kanker pada jaringan lunak, seperti kanker kepala dan leher serta kanker gastrointestinal.

Perangkat Radioterapi Eksternal umumnya menggunakan Cobalt-60: Alat ini berfungsi menggunakan sumber radiasi Cobalt-60 untuk mengobati kanker dengan menyampaikan radiasi gamma ke area tubuh yang terkena kanker. Radiasi gamma diarahkan secara khusus ke bagian yang terkena, dengan tujuan merusak sel kanker tanpa memberikan dampak sebanyak mungkin pada sel tubuh yang sehat. Proses ini melibatkan penempatan pasien di atas meja pasien (Patient Support Assembly - PSA) yang dapat diatur sehingga bagian tubuh yang akan diobati berada pada sumbu isosentris. Ketinggian meja pasien diatur berdasarkan sinar laser yang dipancarkan dari samping meja pasien. Posisi sinar radiasi diarahkan ke tubuh pasien dengan mengatur posisi gantry dan kepala sumber (*head source*).

Terapi radiasi eksternal mencakup beberapa metode, antara lain:

1. *3D Conformal Radiation Therapy (3D CRT)*, Digunakan untuk mengatasi kanker paru-paru, prostat otak, dan hati. Teknik

ini memanfaatkan gambar tiga dimensi dari tumor untuk memberikan dosis radiasi yang sesuai dengan bentuk tumor, sehingga lebih spesifik menargetkan sel kanker dan mengurangi paparan pada jaringan sehat di sekitarnya.

2. *Image-Guided Radiation Therapy* (IGRT), Terapi radiasi terpadu dengan citra, yang sering digunakan untuk mengobati kanker paru-paru, hati, pankreas, dan kelenjar prostat. IGRT memanfaatkan berbagai modalitas pencitraan seperti sinar-X, CT scan, MRI, atau ultrasonografi untuk menciptakan gambar rinci dari tumor dan jaringan sekitarnya.
3. *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT), melalui jenis terapi ini, efektif dalam menangani ketika tumor berdekatan dengan organ normal di sekitarnya. Metode ini mengatur intensitas radiasi yang diberikan pada berbagai bagian tumor, memungkinkan penyesuaian lebih lanjut untuk menghindari jaringan normal yang sehat.
4. *Volumetric Modulated Arc Therapy* (VMAT), VMAT memungkinkan sinar radiasi untuk bergerak mengelilingi tumor dalam pola busur, memaksimalkan dosis pada tumor dengan meminimalkan paparan pada jaringan sehat, jenis terapi ini menggunakan radiasi untuk mengatasi jenis tumor padat, seperti kanker prostat, hati, dan pankreas. Gleneagles Hospital (2019)

4.2.2 Terapi Radiasi Internal (Brakiterapi)

Terapi radiasi internal, atau brakiterapi, melibatkan penempatan sumber radiasi langsung di dalam atau sangat dekat dengan area yang terkena kanker. Sumber radiasi ini bisa berbentuk benih radioaktif, kateter, atau perangkat lain yang ditempatkan di dalam atau di dekat tumor.

Pada terapi radiasi internal, sumber radiasi dimasukkan ke dalam tubuh.

Perangkat radioterapi internal mengacu pada alat atau perangkat yang digunakan untuk memberikan radiasi langsung ke dalam atau di dekat area yang membutuhkan perawatan. Berbeda dengan radioterapi eksternal yang mengarahkan sinar radiasi dari

luar tubuh, radioterapi internal, juga dikenal sebagai brakiterapi, memasukkan sumber radiasi secara langsung ke dalam atau dekat tumor. Beberapa contoh perangkat radioterapi internal melibatkan penggunaan implant atau perangkat yang ditempatkan di dalam tubuh, seperti:

1. Benang Emas: Benang emas kecil yang ditanamkan di dalam atau di sekitar tumor untuk memberikan dosis radiasi langsung.
2. Peluru Radioaktif: Peluru kecil yang berisi bahan radioaktif ditempatkan di dekat atau di dalam tumor untuk memberikan radiasi.
3. Implan Radioaktif: Perangkat kecil yang berisi bahan radioaktif ditempatkan langsung di dalam tumor atau area yang membutuhkan perawatan.
4. Kateter Brakiterapi: Kateter yang dimasukkan ke dalam tubuh untuk memberikan sumber radiasi langsung ke area yang diobati.

Radioterapi internal digunakan untuk mengobati berbagai jenis kanker, termasuk kanker prostat, serviks, dan payudara. Keuntungan utama dari brakiterapi adalah kemampuannya memberikan dosis radiasi yang tinggi secara langsung ke target, sementara meredakan dampak pada jaringan sehat di sekitarnya. Pendekatan ini dapat menjadi pilihan yang efektif tergantung pada jenis kanker dan karakteristik pasien.

Sumber radiasi dapat berupa:

1. Bahan padat. Jenis radioterapi ini dikenal sebagai brakiterapi. Pada brakiterapi, pelet atau bibit radioaktif kecil ditanamkan di dekat tumor di tubuh Anda. Tindakan ini memungkinkan pemberian radiasi dengan dosis lebih tinggi ke area tubuh tertentu.
2. Cairan. Berbeda dengan radioterapi sinar eksternal dan brakiterapi yang dipusatkan untuk mengobati area tertentu, terapi ini bersifat sistemik yang memengaruhi seluruh tubuh Anda. Sumber cairan mengalir di aliran darah ke jaringan di seluruh tubuh Anda untuk mencari dan membunuh sel kanker. Sumber cairan mungkin harus

diberikan secara oral atau melalui slang infus atau suntikan. Pemilihan brakiterapi tergantung pada jenis kanker, lokasi tumor, dan kebutuhan khusus pasien. Keputusan ini diambil setelah evaluasi menyeluruh oleh tim multidisiplin yang terdiri dari ahli onkologi, ahli radioterapi, dan ahli bedah. Terapi Radiasi Internal, atau brakiterapi, memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya menjadi pilihan yang efektif dalam pengobatan kanker, terutama tergantung pada jenis kanker dan kondisi pasien. Beberapa keunggulan utama termasuk:

5. Presisi Tinggi: Terapi radiasi internal memungkinkan pemberian dosis radiasi yang sangat terarah langsung ke tumor atau area yang membutuhkan perawatan. Ini membantu mengurangi dampak pada jaringan sehat di sekitarnya.
6. Dosis Tinggi Lokal: Dalam brakiterapi, sumber radiasi ditempatkan langsung di dalam atau di dekat tumor, sehingga dosis radiasi yang diberikan ke area target dapat lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa metode radioterapi eksternal.
7. Reduksi Paparan Jaringan Sehat: Karena sumber radiasi ditempatkan secara internal, terapi ini dapat membantu mengurangi paparan radiasi pada jaringan sehat di luar area target, meminimalkan kerusakan pada organ dan struktur normal.
8. Penyembuhan Lebih Cepat: Beberapa jenis kanker merespons dengan baik terhadap dosis tinggi radiasi yang diberikan secara lokal. Brakiterapi dapat membantu mencapai tingkat penyembuhan yang lebih tinggi dalam beberapa kasus.
9. Pengurangan Durasi Perawatan: Terapi radiasi internal seringkali memerlukan waktu perawatan yang lebih singkat dibandingkan dengan radioterapi eksternal, yang dapat meningkatkan kenyamanan pasien.
10. Efektivitas pada Beberapa Jenis Kanker: Brakiterapi terbukti efektif untuk beberapa jenis kanker tertentu, seperti kanker prostat, serviks, dan payudara.

11. Minimal Gangguan Pada Kehidupan Sehari-hari: Pasien dapat menjalani aktivitas sehari-hari mereka selama periode perawatan, karena sumber radiasi berada di dalam tubuh dan tidak memerlukan perangkat eksternal yang terlihat.

Namun, perlu dicatat bahwa setiap metode pengobatan memiliki kelebihan dan kelemahan tertentu, dan keputusan terkait terapi radiasi harus dibuat berdasarkan karakteristik spesifik dari kanker dan kebutuhan individual pasien. Diskusikan opsi pengobatan dengan tim perawatan kesehatan untuk mendapatkan rekomendasi terbaik berdasarkan situasi klinis.

4.3 Prosedur Kerja Terapi Radiasi

Sebelum memulai radioterapi, sejumlah pemeriksaan akan dilakukan oleh dokter untuk memastikan keselamatan dan kecocokan prosedur ini sesuai dengan kondisi pasien. Setelah itu, dokter akan menetapkan dosis dan frekuensi terapi radiasi yang sesuai dengan jenis dan tingkat perkembangan kanker yang diderita pasien. Dokter juga akan melaksanakan simulasi radiasi yang melibatkan serangkaian tahap, sebagaimana dijelaskan di bawah ini:

1. Menginstruksikan kepada pasien untuk berbaring dan mencari posisi yang nyaman untuk memfasilitasi kelancaran prosedur radioterapi.
2. Pemberian bantal dan pengikatan tubuh pasien guna mencegah perubahan posisi selama pelaksanaan radioterapi.
3. Pelaksanaan pemindaian menggunakan CT scan untuk menentukan area tubuh yang akan menerima paparan radiasi.
4. Penetapan jenis radioterapi dan jumlah sesi yang diperlukan, disesuaikan dengan hasil pemeriksaan.
5. Penandaan area tubuh pasien yang akan menerima terapi dengan menggunakan tanda radiasi.
6. Melaksanakan prosedur radioterapi setelah menyelesaikan semua langkah di atas

Radioterapi dapat digabungkan dengan pembedahan, kemoterapi, atau imunoterapi. Sebagai contoh, sebelum menjalani operasi, radioterapi dapat diberikan untuk mengurangi ukuran tumor sehingga mempermudah proses pengangkatan. Selain itu, radioterapi dapat diterapkan selama operasi untuk mengurangi risiko kembalinya kanker; pendekatan ini umumnya dilakukan melalui terapi radiasi intraoperatif, di mana radiasi disalurkan langsung ke tumor atau area padatnya selama operasi, dengan tujuan menghindari jaringan normal di sekitarnya. Setelah operasi, radioterapi juga dapat diberikan sebagai radioterapi adjuvan pasca operasi untuk memberantas sel-sel kanker yang mungkin masih ada.

Radioterapi sering digabungkan dengan kemoterapi, di mana obat-obatan diberikan melalui vena atau mulut untuk memengaruhi sel-sel kanker. Pemberian obat ini dapat meningkatkan respons sel terhadap radiasi, dikenal sebagai kemoradioterapi bersama. Penggunaan obat tersebut berpotensi melemahkan daya tahan sel tumor terhadap radioterapi, sehingga memberikan hasil yang lebih efektif. Terapi ini terutama efektif pada tumor di kepala dan leher, kanker paru-paru, beberapa tumor otak, dan kanker ginekologi. Radioterapi juga dapat dikombinasikan dengan imunoterapi, pendekatan baru yang meningkatkan kemampuan sistem kekebalan tubuh untuk melawan kanker.

Proses pelaksanaan terapi radiasi umumnya melibatkan langkah-langkah berikut:

1. Konsultasi:

Seorang dokter spesialis onkologi radiasi akan memberikan rekomendasi dan berdiskusi tentang pilihan pengobatan, termasuk jenis terapi radiasi yang akan diterapkan, durasi pengobatan, dan kemungkinan efek samping. Setelah keputusan diambil, sebuah jadwal simulasi CT akan disiapkan.

2. Simulasi CT:

Simulasi Tomografi Komputerisasi (CT) dilakukan untuk merencanakan dengan presisi cara radiasi akan diberikan, dengan mempertimbangkan lokasi, bentuk, dan ukuran tumor. Pada tahap ini, penetapan posisi, teknik imobilisasi, dan

identifikasi daerah anatomi dilakukan agar perencanaan pengobatan radioterapi dapat dilakukan secara efektif.

3. Perencanaan Pengobatan:

Citra CT dari simulasi digunakan untuk memprediksi dengan akurat bagaimana dosis radiasi akan didistribusikan di dalam tubuh pasien. Mempertimbangkan efek radiasi terhadap organ – organ lainnya yang berada di dekat atau di antara tumor, dan pembatasan dosis yang diberikan dalam rencana pengobatan. Fisikawan Medis atau Petugas Dosimetri Kesehatan menyusun berbagai pendekatan pengobatan, dan setelah uji baku mutu, Dokter Ahli Onkologi Radiasi memilih rencana terbaik.

4. Pengobatan Harian:

Setelah memastikan kualitas dalam perencanaan pengobatan, selama pengobatan panduan citra, seperti CT-Scan atau pencitraan digital, diterapkan selama pengobatan untuk memastikan akurasi harian. Jika terjadi perubahan pada tumor, mungkin diperlukan simulasi CT tambahan dan perencanaan ulang untuk menjaga keamanan dan ketepatan radiasi.

5. Konsultasi Lanjutan:

Setelah selesainya pengobatan, dokter melakukan konsultasi lanjutan dengan pasien. Tindak lanjut melibatkan pemantauan perkembangan pengobatan, termasuk pencitraan dan pemeriksaan darah jika diperlukan, sebagai bagian dari upaya tim medis yang terlibat.

Terdapat beberapa langkah – langkah yang diperlukan jika menjalani terapi radiasi, diantaranya yaitu:

7. Melakukan istirahat yang cukup

Meskipun selama menjalani proses radiasi dapat melanjutkan aktivitas sehari-hari, pastikan untuk memantau kondisi tubuh dengan ketat. Beri tahu dokter jika Anda merasa sangat lelah atau tidak nyaman. Istirahat yang cukup sangat penting, karena hal ini akan meningkatkan efektivitas proses penyembuhan.

8. Mempertahankan sikap positif

Mendapatkan dukungan dari keluarga dan teman selama menjalani pengobatan. Jika Anda mengalami kesulitan emosional, kecemasan, atau depresi, disarankan untuk mencari bantuan dari profesional konseling.

9. Diet seimbang:
Menjaga pola makan yang seimbang akan membantu Anda menghadapi tantangan radioterapi.
10. Menjaga dehidrasi:
Pastikan untuk minum banyak cairan agar tubuh dapat pulih dengan efektif.
11. Perindungan kulit
Salah satu efek dari menjalankan radioterapi yaitu menyebabkan kulit menjadi kering. Gunakan pelembab tanpa pewangi dan paraben untuk mengurangi risiko iritasi. Selain itu, menjaga kebersihan diri untuk mencegah infeksi dan menjaga agar area yang menerima terapi tetap bersih.
Menangani dampak samping
Dampak samping yang umum terkait dengan radioterapi mencakup kehausan, mual, dan kelelahan. Jenis dampak samping yang lebih khusus bervariasi tergantung pada wilayah yang menjalani terapi. Meskipun dampak samping ini bisa terjadi, perkembangan teknologi radioterapi yang lebih canggih telah mengurangi secara signifikan tingkat dampak samping pada masa kini.
Dampak samping yang khusus untuk:
12. Radioterapi pada tengkorak: Gejala yang mungkin muncul melibatkan sakit kepala, mual, pusing, penglihatan ganda, serta manifestasi gangguan saraf lainnya, disertai dengan kerontokan rambut yang bersifat sementara.
13. Radioterapi pada kepala dan leher: Potensial efek samping termasuk mukositis dan kehilangan sensasi pada lidah, kekeringan mulut, produksi air liur yang berlendir, sakit tenggorokan, nyeri saat menelan, hilangnya suara, dan reaksi pada kulit.
14. Radioterapi pada dada: Beberapa gejala yang mungkin timbul melibatkan batuk, ketidaknyamanan saat menelan, dan suara parau.
15. Radioterapi pada perut dan panggul: Kemungkinan efek samping mencakup gastritis, kolik, gas di dalam usus, diare, sedikit nyeri, dan sering buang air kecil.

16. Radioterapi pada payudara: Dapat menyebabkan sedikit nyeri pada payudara dan reaksi kulit yang bersifat ringan. Dari beberapa dampak yang ditimbulkan, pasien disarankan untuk segera berkonsultasi dengan dokter jika setelah menjalani radioterapi muncul gejala atau tanda-tanda seperti:
17. Kenaikan suhu tubuh yang signifikan, mencapai 38^o C atau lebih.
18. Mengalami menggigil.
19. Merasakan sakit kepala yang parah dan kaku pada leher.
20. Menyadari nyeri di dada atau kesulitan bernapas.
21. Mengalami kebingungan atau perasaan linglung.
22. Mengalami kejadian kencing yang disertai darah.

4.4 Dampak Terapi Radiasi

Paparan radiasi pengion dapat menghasilkan efek kesehatan pada tubuh manusia, dimulai dari peristiwa pada tingkat molekuler yang kemudian dapat berkembang menjadi gejala klinis. Karakteristik, tingkat keparahan, dan waktu munculnya gejala ini sangat tergantung pada jumlah dosis radiasi yang diterima dan tingkat toleransinya. (Eri Hiswara, 2015).

Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) nomor 4 tahun 2020, proteksi radiasi dapat diartikan sebagai langkah-langkah yang diambil untuk mengurangi dampak radiasi yang merugikan akibat paparan radiasi. Menurut Peraturan tersebut, petugas proteksi radiasi sebagaimana dijelaskan dalam pasal 9 ayat 1 hingga 3, bertugas untuk mendukung pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi, memastikan kesadaran terkait proteksi radiasi, menilai kelayakan peralatan proteksi radiasi, melakukan pemantauan penggunaannya, dan menyusun laporan tertulis mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi. Arahmani (2021)

Terapi radiasi dapat menimbulkan sejumlah dampak yang bervariasi tergantung pada jenis kanker, lokasi pengobatan, dosis radiasi, dan faktor-faktor individu lainnya. Beberapa dampak umum dari terapi radiasi melibatkan:

1. Efek Lokal di Area yang Diradiasi:
Kulit: Radioterapi dapat menyebabkan kemerahan, iritasi, dan rasa panas pada kulit di sekitar area yang diradiasi.
Kelelahan: Pasien mungkin mengalami kelelahan yang lebih besar selama dan setelah terapi radiasi.
2. Masalah Pada Organ dan Jaringan Terdekat:
Gangguan Pencernaan: Terapi radiasi pada perut atau panggul dapat mempengaruhi saluran pencernaan, menyebabkan diare atau masalah pencernaan.
Kesulitan Bernapas: Radioterapi di area dada atau paru-paru dapat menyebabkan kesulitan bernapas atau batuk.
3. Perubahan Pada Sel Darah:
Penurunan Jumlah Sel Darah: Terapi radiasi dapat mempengaruhi sumsum tulang, menyebabkan penurunan jumlah sel darah, yang dapat meningkatkan risiko infeksi, mudah memar, dan kelelahan.
4. Kerusakan pada Organ Vital:
Kerusakan Jangka Panjang: Pada beberapa kasus, terapi radiasi dapat menyebabkan kerusakan jangka panjang pada organ atau jaringan yang diradiasi.
5. Efek Terhadap Fungsi Seksual dan Reproduksi:
Radioterapi di area panggul atau abdomen dapat memengaruhi organ reproduksi dan menyebabkan dampak terhadap kesuburan serta fungsi seksual.
6. Risiko Kanker Sekunder:
Walaupun sangat jarang, terapi radiasi memiliki potensi untuk meningkatkan risiko kanker sekunder di kemudian hari.
7. Psikologis dan Emosional:
Stres Emosional: Proses terapi dan dampak fisik dapat menyebabkan stres emosional, kecemasan, atau depresi.
8. Perubahan Pada Struktur dan Fungsi Tulang:
Terapi radiasi pada tulang dapat menyebabkan perubahan struktur dan fungsi tulang, terutama pada anak-anak.

Penting untuk dicatat bahwa dampak-dampak ini dapat bervariasi, dan dokter akan memberikan informasi rinci serta dukungan kepada pasien selama dan setelah terapi radiasi. Diskusi

terbuka dengan tim medis akan membantu memahami risiko dan manfaat serta mempersiapkan diri menghadapi dampak yang mungkin timbul.

Dari beberapa dampak negatif yang ditimbulkan dari terapi radiasi. Terapi radiasi, atau radioterapi, dapat memberikan sejumlah manfaat signifikan dalam pengobatan kanker. Berikut adalah beberapa manfaat utama dari terapi radiasi:

1. Mengurangi atau Menghilangkan Tumor:

Tujuan utama terapi radiasi adalah merusak atau menghancurkan sel-sel kanker yang tumbuh secara abnormal. Ini dapat membantu mengurangi ukuran tumor atau bahkan menghilangkannya sepenuhnya.

2. Pencegahan Penyebaran Kanker:

Radioterapi dapat membantu mencegah penyebaran sel kanker ke bagian tubuh yang lain. Ini terutama bermanfaat ketika sel kanker telah menyebar ke area sekitar tumor utama.

3. Mengurangi Gejala dan Menyembuhkan:

Terapi radiasi dapat digunakan untuk mengurangi gejala kanker, seperti nyeri, pembengkakan, atau tekanan pada organ vital. Pada beberapa kasus, terapi radiasi dapat menyembuhkan kanker secara keseluruhan.

4. Persiapan untuk Pembedahan :

Radioterapi dapat digunakan sebelum pembedahan untuk merampingkan atau mengecilkan tumor, membuatnya lebih mudah untuk diangkat dengan operasi.

5. Paska Pembedahan atau Kemoterapi:

Setelah pembedahan atau kemoterapi, terapi radiasi adjuvan dapat diberikan untuk membunuh sisa-sisa sel kanker yang mungkin masih ada dan mengurangi risiko kanker kembali.

6. Mengatasi Kanker pada Lokasi Tertentu:

Terapi radiasi dapat digunakan untuk menargetkan kanker pada lokasi tertentu dalam tubuh, meminimalkan dampak pada organ atau jaringan sehat di sekitarnya.

7. Kontrol Gejala pada Kanker Stadium Lanjut:

Pada beberapa kasus kanker stadium lanjut yang tidak dapat diobati secara menyeluruh, terapi radiasi dapat membantu mengendalikan gejala dan meningkatkan kualitas hidup.

8. Pemulihan Pasca Pembedahan:

Setelah operasi pengangkatan tumor atau organ yang terkena kanker, terapi radiasi dapat diberikan untuk memastikan tidak ada sel kanker yang tersisa di area tersebut.

9. Palliatif untuk Mengurangi Penderitaan:

Terapi radiasi dapat digunakan secara palliatif untuk mengurangi gejala kanker, seperti nyeri atau obstruksi, dan meningkatkan kenyamanan pasien.

Manfaat terapi radiasi dapat bervariasi tergantung pada jenis kanker, lokasi, dan karakteristik individu pasien. Keputusan untuk menjalani terapi radiasi akan dipertimbangkan dengan cermat oleh tim medis berdasarkan situasi klinis pasien.

DAFTAR PUSTAKA

- Arahmani Nur. 2021. *Pengaruh Standar Operasional Prosedur (Sop) Terhadap Tingkat Kepatuhan Radiografer Di Instalasi Radiologi Rsud Teluk Kuantu. Skripsi. Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Awal Bros Pekanbaru*
- Gleneagles Hospital. 2019. Radioterapi. Diambil dari situs [https://www.gleneagles.com.sg/id/tests treatments/radiotherapy](https://www.gleneagles.com.sg/id/tests/treatments/radiotherapy)
- Hiswara, Eri. 2015. *Buku Pintar Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Rumah Sakit. Jakarta Selatan: Batan Press.*
- Loong Edward Yang Tuck. 2019. PARKWAY CANCER CENTER. Diambil dari <https://www.parkwaycancercentre.com/id/idn/news-events/news-articles/news-articles-details/radioterapi>
- Nugraha Renasheva Alifia, 2019. Sosialisasi Manfaat Pemeriksaan Radiologi Sebagai Upaya Edukasi Dokter Kepada Pasien Penyakit Dalam. Skripsi. Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia
- Santoso, Wiranto Budi., et al, 2014, Desain Dasar Perangkat Radioterapi Eksternal Menggunakan Cobalt-60, *Jurnal Perangkat Nuklir*, Volume 06, Nomor 02
- Yunus, B., & Bandu, K. 2019. Efek radiasi sinar-x pada anak-anak: *Makassar Dental Journal*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.35856/mdj.v8i2.278>

BAB 5

FISIKA JARINGAN DAN RADIOBIOLOGI

Oleh Fetronela Rambu Bobu

5.1 Pendahuluan

Radiasi yang diterima baik dalam bentuk alami maupun buatan manusia, dalam dosis besar maupun kecil, akan tetap menimbulkan efek biologis. Radiobiologi merupakan ilmu yang berkaitan dengan efek radiasi pengion pada jaringan biologis. Radiobiologi terdiri dari gabungan dua bidang keilmuan yaitu fisika radiasi dan biologi (Gabriel,2005).

Setiap makhluk hidup memiliki protoplasma yang terdiri dari senyawa organik dan anorganik yang dapat larut dalam air. Unit terkecil dari protoplasma adalah sel. Gambaran umum terkait sel adalah sebagai berikut (Hall,2000):

1. Sel-sel mengandung senyawa organik (karbohidrat, protein, lipid dan asam nukleat) serta senyawa anorganik (air dan mineral).
2. Sel memiliki dua struktur utama yaitu sitoplasma dan inti sel. Sitoplasma berfungsi dalam metabolisme sel sedangkan inti sel mengandung informasi genetik (DNA).
3. Bentuk sel manusia dapat berupa sel germinal maupun sel somatik. Pada kondisi sel germinal, pembelahan sel yang terjadi disebut meiosis, sedangkan pembelahan sel somatik disebut mitosis. Ketika pembelahan sel somatik terjadi, dua sel yang terbentuk akan membawa kromosom – kromosom yang identik dengan sel asli. Selanjutnya sel – sel yang baru akan mengalami pembelahan lebih lanjut, dan proses ini akan terus berlanjut.
4. Sel somatik diklasifikasikan kedalam 3 bentuk yaitu sel punca, sel transit dan sel matang.

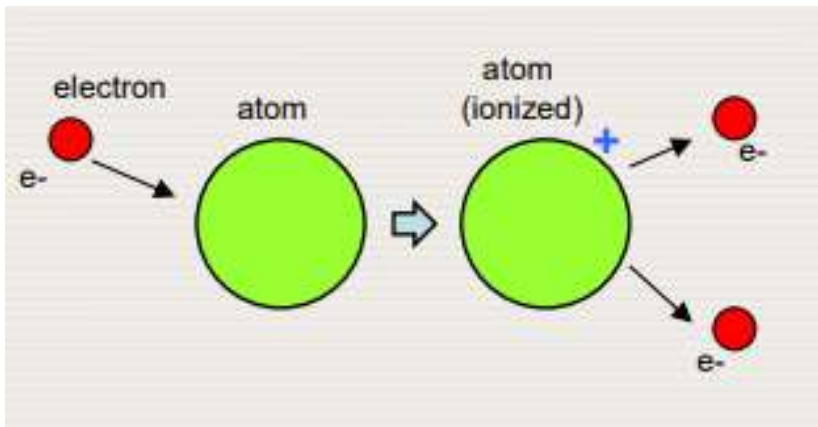
5. Kelompok sel yang melakukan suatu fungsi atau lebih secara bersama-sama disebut dengan jaringan. Sedangkan kelompok jaringan disebut organ dan sekelompok organ disebut organisme.

5.2 Klasifikasi Radiasi dalam Radiobiologi

Radiasi dalam radiobiologi terdiri atas 2 jenis. Yaitu radiasi ionisasi dan radiasi non-ionisasi.

5.2.1 Radiasi Ionisasi

Radiasi ionisasi merupakan jenis radiasi yang memiliki energi yang cukup tinggi untuk melepaskan elektron dari molekul atau atom. Elektron yang terlepas menghasilkan ion positif serta elektron bebas. Proses pembentukan ion dari atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron inilah yang disebut dengan ionisasi. Radiasi ionisasi dapat terbentuk secara alami maupun berasal dari buatan manusia yang berpotensi menyebabkan efek biologis pada jaringan hidup (Budanggawa,2009).



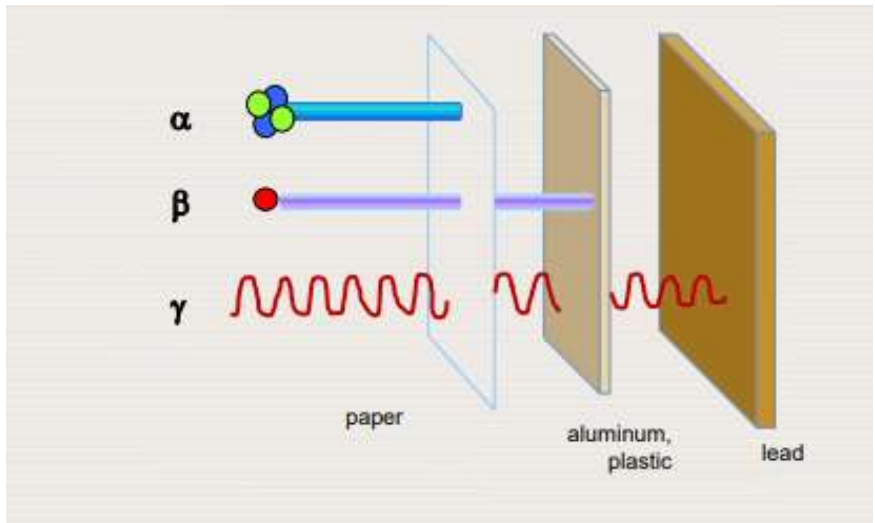
Gambar 5.1. Proses Ionisasi
(Sumber : Cremonesi,2015)

Radiasi ionisasi terdiri dari beberapa jenis meliputi (Amaral, 2002):

1. **Sinar Gamma (γ):** Radiasi yang berasal dari inti atom yang tidak stabil serta memiliki energi yang tinggi.

2. **Sinar X:** memiliki energi yang juga tinggi tetapi berasal dari perangkat buatan seperti mesin Sinar X.
3. **Partikel Alfa (α):** Merupakan partikel bermuatan positif yang memiliki dua neutron dan dua proton. Partikel ini berasal dari inti radioaktif yang melepaskan partikel.
4. **Partikel Beta (β):** merupakan partikel bermuatan negatif yang terdiri dari elektron dan positron. Partikel merupakan hasil dari peluruhan nuklir.
5. **Neutron (n):** merupakan partikel netral penyebab ionisasi ketika berinteraksi dengan materi. Sumber neutron diperoleh dari hasil reaksi nuklir.

Empat jenis radiasi pengion (γ , X, α , dan β), memiliki peran yang penting dalam kedokteran nuklir dalam efek tumor maupun jaringan normal. Peran keempat radiasi tersebut pada jaringan hidup dapat diamati pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Peran Radiasi Pengion
(Sumber : Cremonesi,2015)

5.2.2 Radiasi Non-Ionisasi

Radiasi non-ionisasi adalah bentuk radiasi yang tidak memiliki energi yang cukup untuk mengionisasi atom atau molekul, sehingga tidak menghasilkan pembentukan ion. Meskipun tidak memiliki potensi ionisasi yang signifikan, radiasi non-ionisasi masih dapat memiliki efek termal atau fotokimia tergantung pada sifatnya. Beberapa bentuk radiasi non-ionisasi melibatkan sinar inframerah yang sering dikaitkan dengan panas, gelombang mikro yang digunakan dalam teknologi microwave, radiasi cahaya tampak yang membentuk spektrum yang terlihat oleh mata manusia, dan gelombang radio dengan energi paling rendah yang digunakan dalam komunikasi nirkabel (Daenuri,2011).

Radiasi non-ionisasi umumnya dianggap lebih aman dibandingkan radiasi ionisasi, dan tingkat paparan yang umumnya ditemui dalam kehidupan sehari-hari dianggap tidak berbahaya. Meski begitu, ada beberapa situasi di mana paparan berulang atau dalam jumlah besar terhadap jenis radiasi non-ionisasi tertentu dapat memiliki dampak kesehatan, seperti risiko kerusakan kulit atau kanker kulit akibat paparan berulang terhadap sinar ultraviolet (UV) dari matahari. Oleh karena itu, tindakan perlindungan tetap diterapkan dalam penggunaan teknologi yang melibatkan radiasi non-ionisasi (Akhadi,2000).

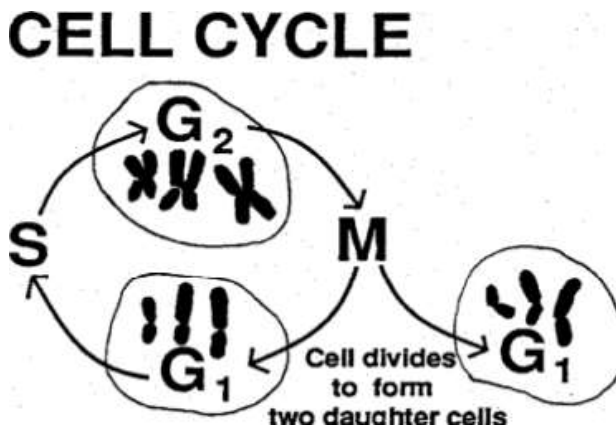
Dalam konteks radiobiologi dan proteksi radiasi, besaran fisik yang bermanfaat untuk menggambarkan karakteristik suatu balok radiasi ionisasi disebut transfer energi linear (LET). Berbeda dengan daya henti yang fokus pada hilangnya energi oleh partikel bermuatan yang bergerak melalui suatu medium, LET lebih menekankan pada laju linear penyerapan energi oleh medium penyerap ketika partikel bermuatan melintasi medium tersebut (Kari, 2010).

International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) mendefinisikan LET sebagai partikel bermuatan dalam suatu medium adalah hasil bagi dE/dl , dimana dE adalah energi rata-rata yang secara lokal diberikan kepada medium oleh partikel bermuatan dengan energi tertentu dalam melintasi suatu jarak dl . Berbeda dengan daya henti yang umumnya diukur dalam unit MeV/cm, satuan yang sering digunakan untuk

LET adalah $keV/\mu m$. Rata-rata energi diperoleh dengan membagi lintasan partikel menjadi increment energi yang seragam dan merata-rata panjang lintasan di atasnya dimana increment energi ini ditempatkan (Kari,2010).

5.3 Siklus Sel dan Kematian Sel

Siklus sel dapat dibagi menjadi dua periode waktu yang terdefinisi dengan baik yaitu mitosis (M), tempat terjadi pembelahan, dan periode sintesis DNA (S). Bagian S dan M dari siklus sel dipisahkan oleh dua periode (celah) G1 dan G2 ketika DNA belum disintesis, tetapi proses metabolisme lainnya tetap berlangsung. Interval waktu antara pembelahan berurutan (mitosis) disebut sebagai waktu siklus sel. Pada umumnya, sel-sel mamalia yang tumbuh dalam jaringan memiliki fase S yang biasanya berlangsung selama 6-8 jam, M kurang dari satu jam, G2 dalam kisaran 2-4 jam, dan G1 dari 1-8 jam, sehingga total waktu siklus sel sekitar 10-20 jam. Sebaliknya, siklus sel untuk sel punca dalam beberapa jaringan dapat mencapai sekitar 10 hari (Suntharalingam,2002).



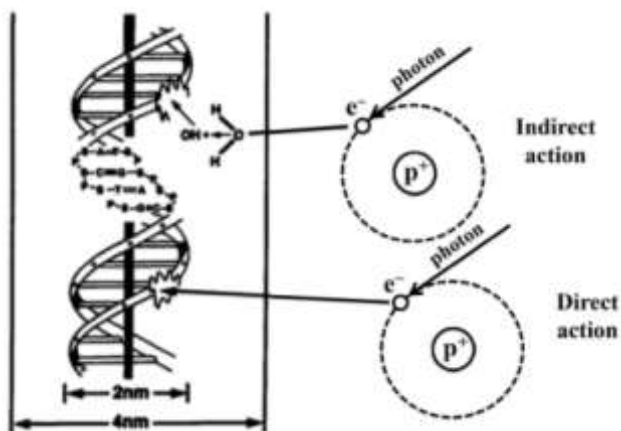
Gambar 5.3. Siklus Sel Pada Periode S dan M
(Sumber : Nuclear Regulatory Commission, 2010)

Pada umumnya, sel-sel paling sensitif terhadap radiasi ketika berada pada fase M dan G2, sementara paling tahan pada akhir fase

S. Waktu siklus sel pada sel-sel ganas lebih singkat dibandingkan dengan beberapa sel jaringan normal, namun sel-sel normal dapat berkembang biak lebih cepat selama regenerasi setelah cedera. Kematian sel pada sel-sel yang tidak berkembang (statis) didefinisikan sebagai kehilangan fungsi spesifik, sedangkan pada sel punca, kematian didefinisikan sebagai kehilangan integritas reproduksi (kematian reproduksi). Sel yang bertahan, mempertahankan integritas reproduksinya, dan dapat berkembang biak tanpa batas disebut sebagai klonogenik (Suntharalingam, 2002).

5.4 Paparan Radiasi Pada Sel

Saat sel-sel terpapar radiasi ionisasi, yang pertama terjadi adalah efek fisik antara radiasi dengan atom atau molekul. Sedangkan efek kerusakan fungsi sel biologis terjadi setelahnya. Efek biologis radiasi sebagian besar disebabkan oleh kerusakan pada DNA, yang merupakan target paling kritis dalam sel. Namun demikian, terdapat juga bagian lain dalam sel yang jika mengalami kerusakan dapat mengakibatkan kematian sel. Ketika radiasi ionisasi langsung diserap dalam materi biologis, kerusakan pada sel dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung (Nias,1998).



Gambar 5.4. Perbedaan Kerusakan Pada DNA Secara Langsung dan Tidak Langsung
(Sumber : Cremonesi,2015)

Radiasi yang berinteraksi secara langsung dengan target kritis dalam sel menyebabkan atom-atom dari target tersebut dapat mengalami ionisasi atau eksitasi melalui interaksi Coulomb. Hasil dari interaksi tersebut memicu serangkaian peristiwa fisik dan kimia yang pada akhirnya menyebabkan kerusakan biologis. Interaksi langsung Radiasi dan materi mendominasi proses interaksi antara partikel LET tinggi dengan materi biologis (Hall,2000).

Dalam interaksi tidak langsung, radiasi berinteraksi dengan molekul dan atom lain (terutama air, karena 80% dari sel terdiri dari air) dalam sel untuk menghasilkan radikal bebas. Radikal bebas ini berdifusi di dalam sel sehingga dapat merusak target kritis dalam sel. Saat radiasi berinteraksi dengan air, radikal bebas yang sangat reaktif namun bersifat sementara, seperti H_2O^+ (ion air) dan OH^* (radikal hidroksil) akan terbentuk. Radikal bebas tersebut kemudian dapat menyebabkan kerusakan pada target dalam sel. Pada tingkat radiasi rendah Linear Energy Transfer (LET), seperti sinar-X atau elektron, sebagian besar kerusakan biologis disebabkan oleh tindakan tidak langsung (Steel,2002).

Langkah-langkah interaksi tidak langsung radiasi dengan sel dapat diuraikan sebagai berikut (Hall,2000):

1. **Langkah Pertama (Interaksi Foton Utama):** Interaksi foton utama, seperti efek fotoelektrik, efek Compton, atau produksi pasangan, menghasilkan elektron berenergi tinggi.
2. **Langkah Kedua (Interaksi Elektron Berenergi Tinggi):** Elektron berenergi tinggi ini, ketika bergerak melalui jaringan sel, menghasilkan radikal bebas dalam molekul air.
3. **Langkah Ketiga (Produksi Radikal Bebas):** Radikal bebas yang dihasilkan, seperti ion air (H_2O^+) dan radikal hidroksil (OH^*), dapat menyebabkan perubahan pada DNA melalui pemutusan ikatan kimia.
4. **Langkah Keempat (Efek Biologis):** Perubahan pada ikatan kimia akibat radikal bebas ini dapat menyebabkan efek biologis atau kerusakan pada sel.

Interaksi tidak langsung radiasi dengan sel melibatkan serangkaian langkah yang mencakup aspek fisika (langkah

pertama), kimia (langkah kedua dan ketiga), dan radiobiologi (langkah keempat). Pembentukan radikal bebas dalam proses ini dapat berkontribusi pada kerusakan biologis pada tingkat molekuler dan seluler dalam jaringan hidup.

5.5 Jenis – Jenis Kerusakan Sel

Kerusakan pada sel dapat terjadi dalam berbagai bentuk, tergantung pada berbagai faktor seperti berdasarkan rentang waktu atau lamanya waktu paparan radiasi. Rentang waktu yang terlibat antara pemutusan ikatan kimia dan efek biologis dapat berkisar dari beberapa jam hingga bertahun-tahun, tergantung pada jenis kerusakan yang terjadi. Jika hasilnya adalah kematian sel, itu dapat terjadi dalam rentang waktu beberapa jam hingga beberapa hari ketika sel yang rusak mencoba untuk melakukan pembelahan (efek awal dari radiasi). Jika kerusakan bersifat onkogenik (induksi kanker), maka ini menunjukkan kemungkinan tertunda selama bertahun-tahun (efek radiasi yang terlambat). Sedangkan jika kerusakan sel dalam bentuk mutasi pada sel germinal, efeknya mungkin tidak terungkap selama beberapa periode. Selain karsinogenesis (induksi kanker), efek terlambat dari radiasi melibatkan: penyusutan masa hidup, kerusakan genetik, dan efek terhadap janin. Radiasi ionisasi terbukti dapat menyebabkan leukemia dan telah terlibat dalam perkembangan banyak jenis kanker lainnya di jaringan seperti tulang, paru-paru, kulit, tiroid, dan payudara (Suntharalingam,2002).

Kerusakan yang disebabkan oleh radiasi pada sel-sel mamalia dapat dikategorikan menjadi tiga bagian yaitu : **Kerusakan fatal** bersifat tak dapat dibalikkan, tidak dapat diperbaiki, dan menyebabkan kematian sel; **Kerusakan subfatal** dapat diperbaiki dalam beberapa jam kecuali jika terdapat kerusakan subfatal tambahan yang kemudian mengakibatkan kerusakan fatal; dan **Kerusakan potensial** yang bersifat fatal dapat diatasi melalui proses perbaikan saat sel diizinkan untuk tetap dalam kondisi tidak melakukan pembelahan (Steel,2002).

5.5.1 Efek Somatik dan Genetik

Dampak radiasi pada populasi manusia dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu efek somatik dan efek genetik. Efek somatik merujuk pada kerusakan yang dialami individu yang terpapar selama hidup mereka, termasuk kanker yang disebabkan radiasi (karsinogenesis), infertilitas, kekeruhan lensa mata, dan penyusutan masa hidup. Sedangkan Efek genetik atau hereditier melibatkan mutasi yang diinduksi radiasi pada gen dan DNA individu, yang dapat berkontribusi pada kelahiran keturunan yang mengalami cacat (Hall,2000).

Karsinogenesis yang terjadi merupakan efek somatik karena terjadi secara lambat dalam bentuk leukemia kronis atau beberapa jenis tumor padat, seperti yang dapat terjadi pada kulit, tulang, paru-paru, tiroid, atau payudara (Steel,2002).

5.5.2 Efek Stokastik dan Deterministik

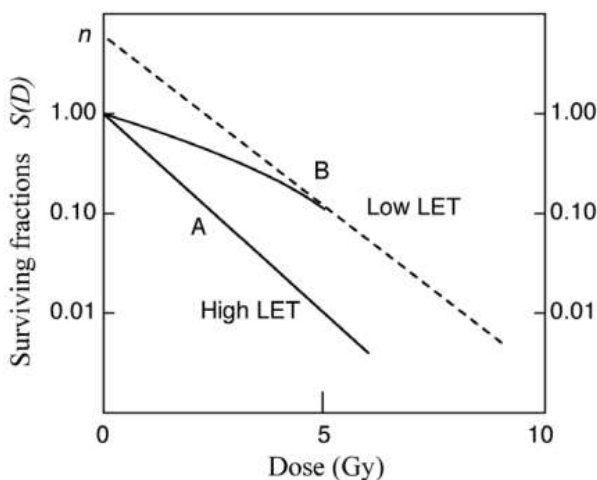
Efek merugikan dari radiasi dapat dikelompokkan secara umum menjadi dua jenis: stokastik dan deterministik (non-stokastik). Menurut NCRP, Efek stokastik adalah efek di mana probabilitas kejadiannya meningkat seiring dengan peningkatan dosis, tetapi tingkat keparahan efek pada individu yang terkena tidak tergantung pada dosis (seperti induksi kanker, khususnya karsinogenesis radiasi, dan efek genetik). Tidak ada dosis ambang untuk efek yang benar-benar stokastik. Sedangkan efek deterministik (non-stokastik) adalah efek yang meningkat dalam tingkat keparahan dengan peningkatan dosis. Efek ini timbul biasanya di atas dosis ambang bagi individu yang terkena (seperti atrofi organ, fibrosis, kekeruhan lensa, perubahan darah, penurunan jumlah sperma) (Suntharalingam,2002).

Respon suatu organ atau jaringan terhadap kerusakan akibat radiasi dapat termanifestasi sebagai efek akut atau efek kronis (tertunda). Efek akut muncul segera setelah paparan radiasi dan dicirikan oleh peradangan, edema, denudasi epitel, dan pendarahan. Adapun efek kronis bersifat tertunda dan ditandai oleh fibrosis, atrofi, ulserasi, stenosis, atau obstruksi pada usus (Suntharalingam,2002)..

5.6 Kurva Kelangsungan Hidup Sel

Kurva kelangsungan hidup sel digunakan untuk menggambarkan hubungan antara fraksi sel yang tetap hidup (yakni, fraksi sel yang dapat mempertahankan integritas reproduksinya atau sel klonogenik) dan dosis radiasi yang diserap. Representasi grafik kelangsungan hidup sel terhadap dosis radiasi dilakukan dengan memplot fraksi sel yang bertahan pada skala logaritmik pada sumbu ordinat terhadap dosis pada skala linear pada sumbu absis (Suntharalingam,2002)..

Penentuan fraksi kelangsungan hidup sel dapat dilakukan dengan teknik in-vitro atau in-vivo. Contoh kurva kelangsungan hidup untuk radiasi sel oleh sinar radiasi yang padat (A) dan yang jarang (B) dijelaskan dalam Gambar 5.6.



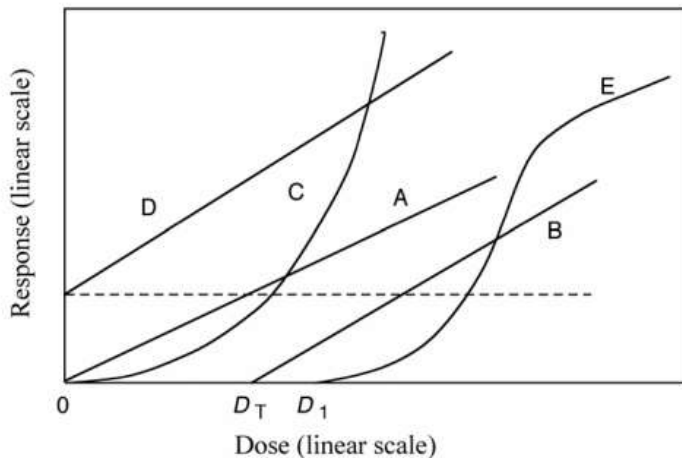
Gambar 5.6. Grafik Hubungan Fraksi Sel Yang Bertahan Hidup dengan Dosis pada *Low LET* dan *High LET*
(Sumber : Suntharalingam,2002)

Jenis radiasi mempengaruhi bentuk kurva kelangsungan hidup sel. Radiasi yang padat ionisasi menunjukkan kurva kelangsungan hidup sel yang hampir bersifat eksponensial terhadap dosis, terlihat sebagai garis lurus pada plot log-linear. Sebaliknya, untuk radiasi yang jarang ionisasi, kurva menunjukkan kemiringan awal diikuti oleh daerah bahu dan kemudian hampir lurus pada

dosir yang lebih tinggi. Faktor-faktor yang membuat sel kurang sensitif terhadap radiasi melibatkan penghilangan oksigen untuk mencapai keadaan hipoksia, penambahan agen pembersih radikal kimia, penggunaan dosir rendah atau iradiasi multifraksionasi, dan sel yang disinkronkan pada fase-S akhir dari siklus sel (Hall,2000).

5.7 Kurva Dosir - Respon

Diagram yang menggambarkan efek biologis yang diamati, seperti induksi tumor atau respon jaringan terhadap dosir yang diberikan disebut kurva dosir - respon. Secara umum, efek biologis cenderung meningkat seiring dengan peningkatan dosir. Terdapat tiga jenis hubungan dosir-respon yang dikenal yaitu linier, linier-kuadrat dan sigmoid. Kurva dosir-respon mungkin memiliki atau tidak memiliki ambang batas. Ambang dosir merujuk pada dosir terbesar untuk suatu efek tertentu yang diteliti, di bawah dosir tersebut tidak akan teramati efek apapun (Steel,2002).

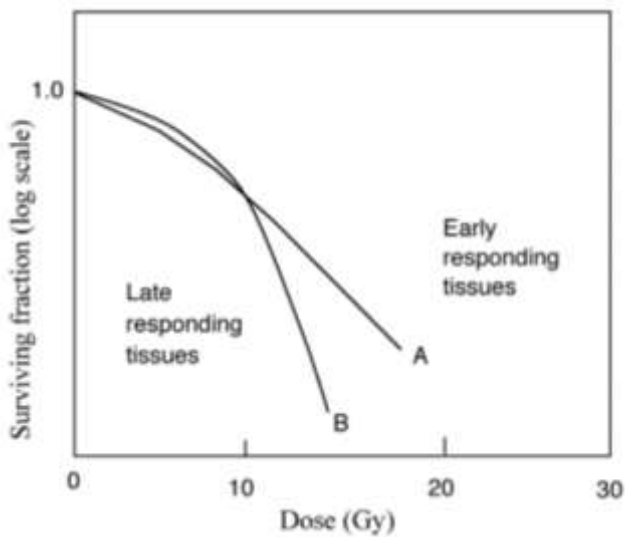


Gambar 5.7. Sketsa kurva respon dosir untuk induksi kanker (kurva A, B, C, D) dan respons jaringan (kurva E)
(Sumber : (Sumber : Suntharalingam,2002)

Berdasarkan Gambar 5.7, kurva (A) merupakan hubungan linier – tanpa ambang batas, kurva (B) menunjukkan hubungan linier dengan ambang batas D_T , kurva (C) merupakan

hubungan linier kuadrat – tanpa ambang batas (diasumsikan untuk efek stokastik, seperti karsinogenesis). Kurva (D) adalah hubungan linier tanpa ambang batas (area yang berada di bawah garis putus – putus merepresentasikan kejadian alami dari efek yang terjadi misalnya karsinogenesis), sedangkan kurva(E) menunjukkan hubungan sigmoid dengan ambang batas D1, seperti pada proses terjadinya efek deterministik pada umumnya misalnya kontrol tumor, morbiditas atau pengobatan (Steel,2002).

Respon jaringan atau organ terhadap radiasi berbeda – beda karena bergantung dua faktor utama yaitu sensitivitas alamiah dari sel-sel individu dan kinetika populasi sel. Ada perbedaan yang jelas dalam respon terhadap radiasi antara jaringan yang merespon awal (seperti kulit, mukosa, dan epitel usus) dan jaringan yang merespons akhir (seperti sumsum tulang belakang), seperti yang ditunjukkan secara skematis dalam Gambar 5.8.



Gambar 5.8. Sketsa kurva Kelangsungan Hidup Sel yang Merespon awal (A) dan akhir (B)
(Sumber : Suntharalingam,2002)

Untuk fraksi sel yang bertahan terhadap dosis (Suntharalingam,2002).

1. Kurva kelangsungan hidup sel untuk jaringan yang merespons akhir memiliki bentuk yang lebih melengkung dibandingkan dengan kurva untuk jaringan yang merespons awal.
2. Pada efek awal, rasio α/β bernilai besar dan α mendominasi pada dosis rendah.
3. Pada efek akhir, α/β bernilai kecil dan β memiliki pengaruh bahkan pada dosis rendah.
4. Dua komponen untuk pembunuhan sel mamalia menjadi sebanding masing – masing sekitar 10 Gy dan 2 Gy untuk efek awal dan akhir,.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, M. 2000. Dasar-Dasar Proteksi Radiasi. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Amaral,A. 2002. *Trends In Biological Dosimetry: An Overview*. BrazArch Bioi Techno.
- Badunggawa,dkk. 2009. *Bahaya Radiasi dan Cara Proteksinya*. Jurnal Medicina : Universitas Udayana.
- Cremonesi,M. 2015. *Basic Radiobiology*. Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students.
- Daenuri, A. 2011. *Sistem Proteksi Radiasi : Analisis Terhadap Bidang Radiologi Rumah Sakit*. Jurnal Phenomenon, Volume 1 Nomor 1. Juli 2011.
- Gabriel JF. 2005. *Fisika Kedokteran*. Jakarta: EGC, Penerbit Buku Kedokteran.
- Hall, E. J. 2000. *Radiobiology for the radiologist*. Lippincott, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A.
- Kari and Saunamaki. 2010. *Radiation Protection in the Catheterization Laboratory*. Interventional Journal 2 (5):667-672
- Nias, A.W. 1998. *An introduction to radiobiology*. New York, U.S.A : Wiley, New York.
- Nuclear Regulatory Commission, 2010. Effects of Radiation at the Cellular Level.
- Steel, GG. 2002. *Basic clinical radiobiology*. United Kingdom : Arnold, London.
- Suntharalingam, at all. 2002. *Basic Radiobiology. Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*.

BAB 6

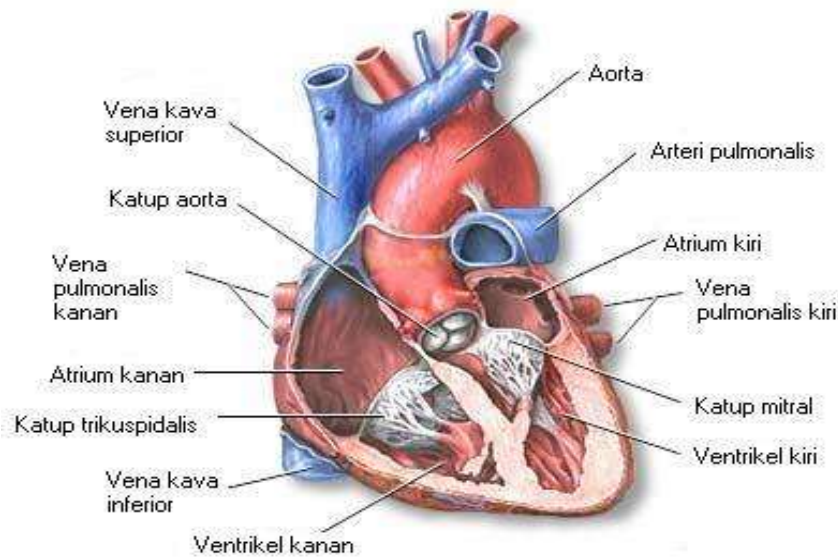
ELEKTROKARDIOGRAFI (EKG) DAN ELEKTROMIOGRAFI (EMG)

Oleh Nurul Fuadi

6.1 Jantung

Jantung adalah organ otot yang berfungsi sebagai pompa utama dalam sistem peredaran darah manusia. Fungsi utama jantung adalah mengedarkan darah ke seluruh tubuh untuk menyuplai oksigen dan nutrisi yang diperlukan oleh sel-sel tubuh serta mengangkut produk limbah metabolisme untuk dikeluarkan dari tubuh. Jantung manusia terletak di dalam rongga dada, di antara paru-paru, dan berada tepat di atas diafragma. Struktur jantung terdiri dari empat ruang utama:

1. Atrium kanan: Atrium kanan adalah ruang atas jantung yang menerima darah yang mengandung sedikit oksigen dari tubuh dan memompanya ke ventrikel kanan.
2. Ventrikel kanan: Ventrikel kanan adalah ruang bawah jantung yang menerima darah dari atrium kanan dan memompanya ke paru-paru untuk mengambil oksigen.
3. Atrium kiri: Atrium kiri adalah ruang atas jantung yang menerima darah yang kaya oksigen dari paru-paru dan memompanya ke ventrikel kiri.
4. Ventrikel kiri: Ventrikel kiri adalah ruang bawah jantung yang menerima darah dari atrium kiri dan memompanya ke seluruh tubuh untuk mensuplai oksigen dan nutrisi.



Gambar 6.1. Bagian-bagian Jantung

Jantung memiliki katup-katup yang berfungsi untuk mengatur aliran darah dalam satu arah. Katup atrioventrikular (AV) dan katup semilunar mengatur aliran darah antara atrium dan ventrikel, serta antara ventrikel dan arteri utama (aorta dan arteri pulmonalis).

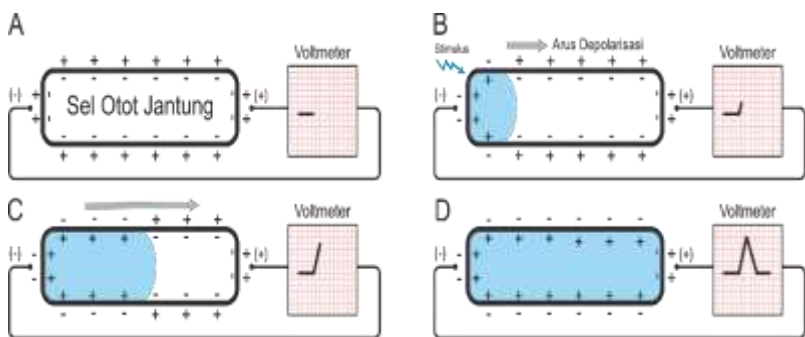
6.2 Kelistrikan pada Sel Jantung

6.2.1 Konduksi pada Sel Otot Jantung

Kontraksi sel otot jantung terjadi oleh adanya potensial aksi yang dihantarkan sepanjang membran sel otot jantung. Jantung akan berkontraksi secara ritmik, akibat adanya impuls listrik yang dibangkitkan oleh jantung sendiri yang disebut autorhythmicity. Jantung mempunyai dua macam sel yaitu, sel pacu jantung (pacemaker) dan sel otot jantung (miokard). Sel-sel jantung mempunyai susunan ion yang berbeda antara ruang dalam sel (intraseluler) dan ruangan luar sel (ekstraseluler). Ion-ion yang terpenting ialah ion Na^+ dan ion K^+ . Sel-sel dalam sistem kelistrikan jantung dapat menghasilkan impuls listrik dan kemudian mendistribusikannya ke seluruh jantung. Sementara semua sel di

jantung dapat menghantarkan listrik. Dalam sistem ini, sel-sel akan menghantarkan listrik dengan kecepatan yang sangat spesifik hingga membuat berbagai bagian jantung berdetak pada waktu yang tepat.

Sel otot jantung mempunyai kadar K^+ intraseluler lebih tinggi daripada ruang ekstraseluler, sedangkan membran sel otot jantung mempunyai sifat lebih permeabel untuk ion K^+ daripada untuk ion Na^+ . Dalam keadaan istirahat, terdapat perbedaan kadar ion-ion, sehingga potensial Listrik membran sel bagian dalam dan bagian luar tidak sama. Hal ini disebut dengan fase polarisasi. Dalam keadaan polarisasi, bagian luarsel otot jantung berpotensi listrik positif dibandingkan bagian dalam. Selisih potensial listrik ini disebut potensial membran, yang dalam keadaan istirahat berkisar -90 mV. Selanjutnya saat membran dirangsang dan ion natrium (Na^+) mengalir ke dalam sel. Jika intensitas rangsangannya melebihi ambang eksitasi dari neuron, potensial aksi dibuat dan impuls saraf diperbanyak. Hal ini menyebabkan ion-ion positif dari luar sel akan masuk menggantikan ion-ion negatif dalam sel, fase ini disebut fase depolarisasi. Apabila membran otot jantung dirangsang, maka sifat permeabel membran berubah, sehingga ion Na^+ masuk ke dalam sel, yang menyebabkan potensial aksi yaitu potensial membran berubah dari -90 mV menjadi +20 mV (potensial membran di dalam sel jantung lebih positif dibandingkan dengan potensial listrik di luar sel). Setelah fase depolarisasi selesai, potensial aksi membran kembali ke keadaan semula dalam proses yang disebut repolarisasi.



Gambar 6.2. Konduksi jantung (proses depolarisasi jantung)
(Susi H, dkk. 2021)

Konduksi jantung pada sel otot jantung melibatkan serangkaian peristiwa listrik yang mengarah pada kontraksi dan relaksasi jantung. Berikut adalah tahapan konduksi jantung pada sel otot jantung:

1. Potensial Istirahat: Sel otot jantung berada dalam keadaan istirahat dengan potensial membran sekitar -90 mV pada fase 4. Pada fase ini, ion kalium (K^+) keluar dari sel secara konstan, menjaga potensial istirahat.
2. Fase 0 - Depolarisasi: Depolarisasi dimulai dengan masuknya ion natrium (Na^+) melalui kanal Na^+ tipe fast saat sel menerima stimulus. Ini menciptakan lonjakan potensial aksi yang membuat potensial membran naik dari -90 mV menjadi +20 mV.
3. Fase 1 - Repolarisasi Awal: Setelah mencapai puncak depolarisasi, terjadi repolarisasi awal. Selama fase ini, terjadi penurunan potensial dari +20 mV mendekati 0 mV. Ada pengembalian sebagian kecil dari ion kalium (K^+).
4. Fase 2 - Plateau: Plateau adalah fase datar di mana potensial membran berkisar pada 0 mV. Ini disebabkan oleh keseimbangan antara masuknya ion kalsium (Ca^{2+}) dan keluarnya ion kalium (K^+). Plateau ini memperpanjang durasi kontraksi dan mencegah stimulasi berulang terlalu cepat.
5. Fase 3 - Repolarisasi Cepat: Repolarisasi cepat dimulai dengan keluarnya lebih banyak ion kalium (K^+), sehingga potensial membran kembali ke tingkat istirahat. Ini menyebabkan relaksasi otot.
6. Fase 4 - Kembali ke Potensial Istirahat: Fase 4 menandakan kembalinya sel ke potensial istirahat awalnya, di mana ion kalium (K^+) keluar dari sel secara konstan. Sel siap menerima stimulus berikutnya.

Proses ini terjadi pada setiap sel otot jantung secara berurutan dan terkoordinasi, menciptakan gelombang depolarisasi yang merambat melalui jantung. Proses konduksi ini menghasilkan denyut jantung dan mengkoordinasikan kontraksi atrium dan ventrikel, yang esensial untuk fungsi pompa jantung. Pusat

pengendali utama dari konduksi ini adalah nodus sinoatrial (SA) yang berperan sebagai pemimpin dalam menentukan kecepatan denyut jantung.

Secara umum, sel otot jantung yang menerima stimulus dari luar akan merespons dengan timbulnya potensial aksi, diikuti oleh kontraksi, dan kemudian repolarisasi yang diiringi dengan relaksasi. Potensial aksi dari satu sel otot jantung akan diteruskan ke sel-sel otot di sekitarnya, memicu proses eksitasi, kontraksi, dan relaksasi. Proses penghantaran listrik ini disebut konduksi.

6.2.2 Konduksi pada Sel Pacemaker

Konduksi jantung pada sel pacemaker, yang juga dikenal sebagai nodus sinoatrial (SA), melibatkan serangkaian peristiwa listrik yang mengatur denyut jantung. Berikut adalah rangkaian peristiwa konduksi jantung pada sel pacemaker:

1. Potensial Membaca Nodus Sinoatrial (SA): Potensial istirahat sel pacemaker berada pada tingkat yang lebih tinggi daripada potensial istirahat sel otot jantung biasa. Ini disebut potensial membran berirama dan berkisar antara -60 mV hingga -70 mV.
2. Fase Depolarisasi Spontan: Sel pacemaker memiliki kemampuan unik untuk mengalami depolarisasi spontan. Ini terjadi karena adanya arus ion spesifik, terutama arus Na^+ dan Ca^{2+} , yang masuk ke dalam sel secara spontan. Hal ini mengakibatkan peningkatan potensial membran, mencapai ambang aksi dan memicu depolarisasi.
3. Potensial Aksi dan Konduksi: Setelah mencapai ambang aksi, sel pacemaker menghasilkan potensial aksi. Potensial aksi ini menjalar melalui sel pacemaker dan menyebar ke sel-sel otot atrium. Proses ini menciptakan sinyal listrik yang menyebabkan kontraksi atrium.
4. Konduksi ke Nodus Atrioventrikular (AV): Sinyal listrik dari nodus sinoatrial (SA) kemudian mencapai nodus atrioventrikular (AV). Nodus AV memproses sinyal ini dan menyampaikannya ke bundel His dan serat Purkinje, mengarahkannya ke sel otot ventrikel.

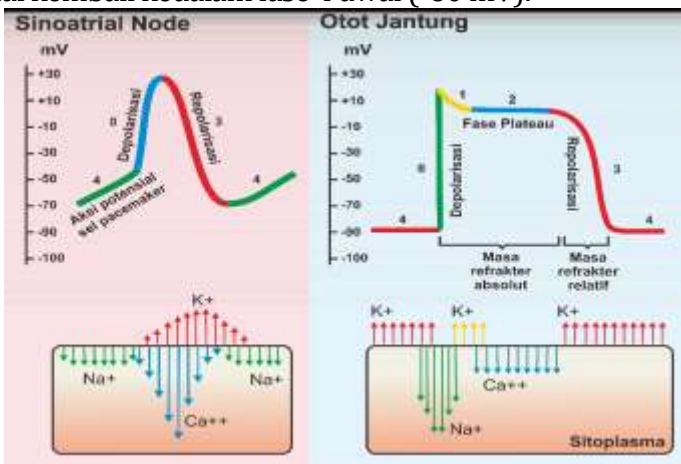
5. Konduksi ke Sel Otot Ventrikel: Sinyal listrik merambat melalui bundel His dan serat Purkinje untuk mencapai sel-sel otot ventrikel. Ini menyebabkan depolarisasi dan kontraksi ventrikel, yang merupakan fase akhir dari siklus denyut jantung.
6. Repolarisasi dan Persiapan untuk Siklus Berikutnya: Setelah kontraksi, sel-sel otot jantung mengalami repolarisasi, kembali ke potensial istirahat. Sel pacemaker, seperti nodus sinoatrial, mulai lagi dengan depolarisasi spontan untuk memulai siklus berikutnya.

Kurva potensial aksi sel pacemaker jantung menunjukkan karakteristik yang khas, yang dibagi menjadi 3 fase :

Fase 4 : Berbeda dengan sel otot jantung lainnya, pada fase 4 terdapat depolarisasi spontan (potensial pacemaker) yang akan memacu terjadinya aksi potensial saat membran potensial meningkat hingga mencapai ambang diantara -40 sampai dengan -30 mV. Hal ini disebabkan masuknya ion Na^+ channel kedalam sel pacemaker melalui *funny current channel* (I_f channel).

Fase 0 : Masa depolarisasi dari potensial

Fase 3 : Masa repolarisasi pada sel pacemaker hingga membran potensial kembali kedalam fase 4 awal (-60 mV).



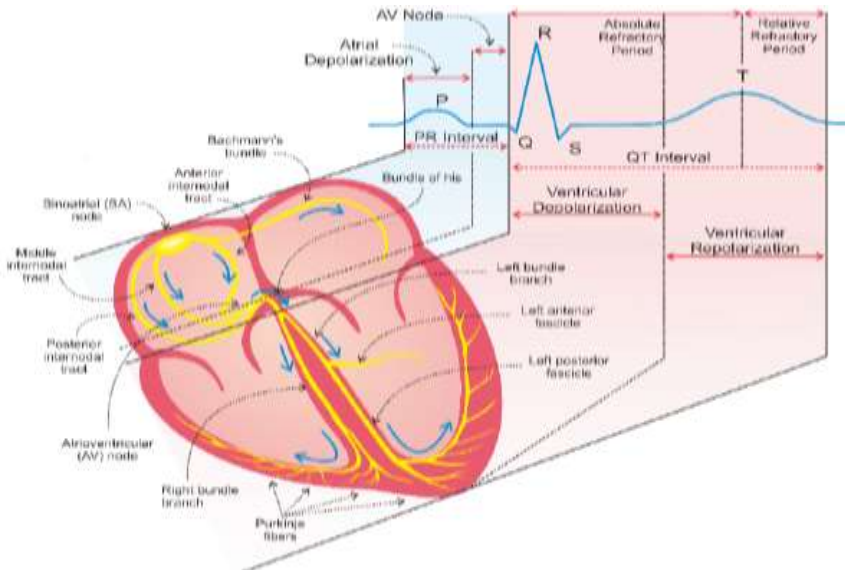
Gambar 6.3. Gambaran Potensial Aksi Sel Pacemaker dan Sel Otot jantung. (Susi H, dkk. 2021)

6.2.3 Siklus Jantung

Jantung beroperasi secara teratur dengan kontraksi bersamaan dari atrium kanan dan kiri, yang dikenal sebagai sistole atrial, bersamaan dengan relaksasi ventrikel kanan dan kiri yang disebut diastole ventrikuler. Tahap berikutnya melibatkan kontraksi ventrikel kiri dan kanan, yang disebut sistole ventrikuler, yang terjadi bersamaan dengan relaksasi atrium kanan dan kiri, dikenal sebagai diastole atrial. Aktivitas mekanik jantung ini dimungkinkan oleh kontrol sistem konduksi jantung yang memberikan stimulus listrik secara teratur. Nodus sinoatrial (SA), sebagai pengendali utama siklus jantung, memulai potensial aksi yang disampaikan melalui atrium kanan dan kiri menuju nodus atrioventrikular, kemudian ke bundel His, bercabang ke kanan dan kiri, dan akhirnya mencapai serabut-serabut Purkinje.

6.3 Elektrokardiografi (EKG)

Elektrokardiografi (EKG atau ECG) adalah alat dan prosedur medis yang digunakan untuk merekam aktivitas listrik jantung. Tes ini sangat penting dalam diagnosis gangguan jantung. Elektrokardiografi membantu dokter dalam mengidentifikasi gangguan irama jantung, deteksi masalah pada otot jantung, evaluasi aliran darah ke jantung, alat diagnosis, pemantauan, dan penelitian terkait dengan penyakit jantung dan kondisi kardiovaskular. Hasil EKG memberikan informasi berharga yang membantu dokter dalam membuat diagnosis yang akurat dan menentukan rencana pengobatan yang tepat.



Gambar 6.4. Kaitan antara Sistem Konduksi Jantung dengan Gambaran EKG
(Susi H, dkk. 2021)

Beberapa fungsi Elektrokardiografi (EKG) adalah

1. Mendeteksi Gangguan Jantung:

EKG digunakan untuk mendeteksi berbagai gangguan jantung, termasuk gangguan irama jantung seperti aritmia, yang melibatkan perubahan dalam ritme normal jantung. Ini juga dapat membantu dalam mendeteksi masalah konduksi listrik dalam jantung.

2. Mendiagnosis Serangan Jantung

EKG adalah alat penting dalam mendiagnosis serangan jantung (infark miokard). Perubahan karakteristik dalam gelombang EKG dapat mengindikasikan kerusakan otot jantung akibat kurangnya aliran darah.

3. Evaluasi Fungsi Jantung

EKG memberikan informasi tentang irama jantung, kecepatan kontraksi (denyut jantung), dan interval antara berbagai fase siklus jantung seperti interval PR, QRS, dan QT. Informasi ini membantu dalam mengevaluasi fungsi jantung secara keseluruhan.

4. Memantau Efek Obat

EKG dapat digunakan untuk memantau efek obat-obatan tertentu, terutama obat-obatan yang memengaruhi irama jantung. Ini digunakan dalam pengaturan klinis untuk memastikan bahwa obat-obatan tidak menyebabkan efek samping yang merugikan pada jantung.

5. Pemeriksaan Rutin dan Pencegahan

EKG juga digunakan dalam pemeriksaan rutin untuk memeriksa kesehatan jantung pasien yang mungkin memiliki risiko penyakit jantung. Ini membantu dalam mendeteksi masalah jantung pada tahap awal sebelum gejala muncul.

6. Menilai Kondisi Jantung Terkendali

Pasien dengan kondisi jantung yang sudah dikenal atau menjalani perawatan dapat dipantau secara teratur dengan EKG untuk memeriksa kemajuan penyakit atau respon terhadap perawatan.

7. Persiapan untuk Operasi

Sebelum operasi, EKG dapat dilakukan untuk menilai kesehatan jantung dan memastikan bahwa pasien dalam kondisi yang cukup baik untuk prosedur bedah.

8. Penelitian Ilmiah

EKG juga digunakan dalam penelitian ilmiah untuk memahami lebih dalam tentang fungsi jantung dan mempelajari berbagai aspek penyakit jantung.

6.3.1 Cara kerja Elektrokardiografi (EKG)

Selama prosedur EKG, elektroda-elektroda kecil ditempatkan pada kulit pasien di beberapa titik strategis di sekitar dada, lengan, dan kaki. Elektroda ini mengukur perubahan kecil dalam aktivitas listrik jantung saat jantung berkontraksi dan beristirahat. Sinyal-sinyal ini kemudian direkam dan direpresentasikan dalam bentuk grafik atau gelombang, yang disebut elektrokardiogram. Tes EKG memberikan gambaran tentang bagaimana jantung berkontraksi dan berpompa darah. Berikut adalah cara kerja EKG:

1. Pemilihan Elektroda

Pada awalnya, sejumlah elektroda ditempatkan pada kulit pasien di berbagai lokasi tubuh. Biasanya, terdapat 10 elektroda yang digunakan untuk pemeriksaan EKG. Elektroda ini ditempatkan pada dada, lengan, dan kaki pasien. yaitu 4 buah elektroda ekstremitas dan 6 buah elektroda prekordial.

Sadapan Standar Ekstremitas

Elektroda-elektroda ekstremitas masing-masing dilekatkan pada : Lengan Kanan (*Right Arm/RA*), Lengan Kiri (*Left Arm/LA*), Tungkai Kanan (*Right Leg/RL*), Tungkai Kiri (*Left Leg/LL*). Elektroda RL selalu dihubungkan dengan bumi untuk menjamin potensial nol yang stabil. Dari keempat elektroda tersebut didapatkan 2 jenis sadapan yaitu 3 sadapan bipolar dan 3 sadapan unipolar. Sadapan dengan rekaman potensial bipolar yaitu :

I = Potensial LA - Potensial LR

II = Potensial RA - Potensial LL

III = Potensial LL - Potensial LA

Untuk mendapatkan sadapan unipolar, maka gabungan dari sadapan I, II, dan III disebut Terminal Sentral dan dianggap berpotensi nol. Bila potensial dari suatu elektroda dibandingkan dengan terminal sentral, maka didapatkan potensial mutlak dari elektroda tersebut, dan sadapan yang diperoleh disebut sadapan unipolar, yaitu :

aVR = Potensial RA

aVL = Potensial LA

aVF = Potensial Tungkai

Sadapan Prekordial

Elektroda-elektroda prekordial terdiri dari 6 sadapan unipolar yang diberi nama-nama V1 sampai V6, dengan penempatan sebagai berikut :

V1: garis parasternal kanan, pada interkostal IV,

V2: garis parasternal kiri, pada interkostal IV,

V3: titik tengah antara V2 dan V4

V4: garis klavikula-tengah, pada interkostal V,
V5: garis aksila depan, sejajar dengan V4,
V6: garis aksila tengah, sejajar dengan V4 dan V5,

Pada keadaan infark miokard inferior, diperlukan elektroda-elektroda prekordial sebelah kanan, yang disebut V3R, V4R, V5R, dan V6R yang letaknya berseberangan (gambaran cermin) dengan V3, V4, V5 dan V6. Pada keadaan tertentu seperti didapatkan kecurigaan infark miokard posterior dapat dilakukan pengambilan sadapan posterior yang disebut V7, V8 dan V9 dengan posisi sebagai berikut:

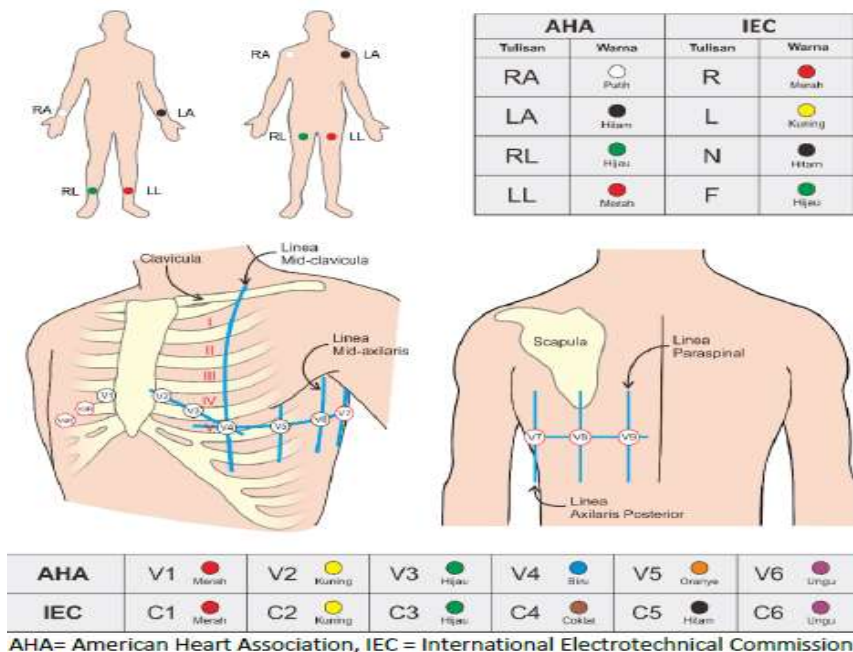
V7: garis axilaris posterior kiri, sejajar dengan V6.

V8: pada ujung scapula kiri (midcapularis sinistra) , sejajar dengan V6.

V9: garis paraspinal kiri, sejajar dengan V6.

2. Perekaman Sinyal

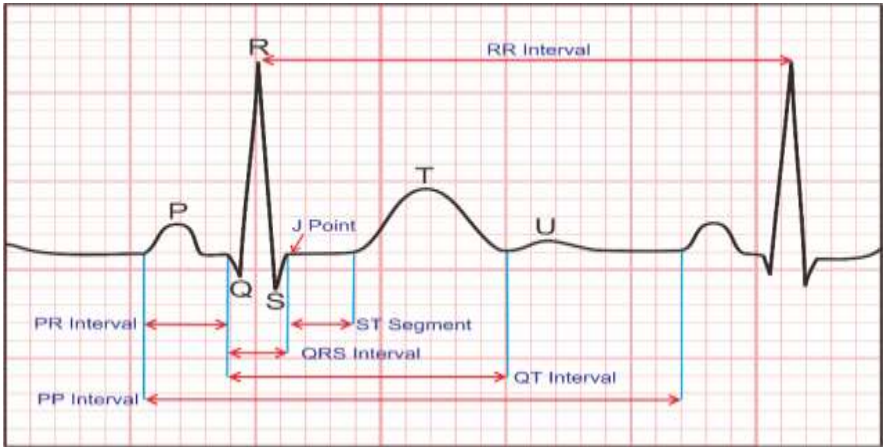
Elektroda menangkap sinyal listrik yang dihasilkan oleh jantung saat berkontraksi. Sinyal ini mencerminkan aktivitas listrik yang melewati jantung dan merambat ke seluruh tubuh. Selama prosedur, elektroda mengukur perubahan tegangan listrik yang dihasilkan oleh jantung.



Gambar 6.4. Lokasi Pemasangan Elektroda-Elektroda Ekstremitas dan Prekordial. (Susi H, dkk. 2021)

3. Pencatatan Hasil EKG (Elektrokardiogram)

Sinyal listrik yang diterima oleh elektroda direkam oleh mesin EKG dan direpresentasikan dalam bentuk grafik atau gelombang. Gelombang EKG yang paling dikenal adalah gelombang P, Q, R, S, dan T, yang menggambarkan siklus jantung dari awal kontraksi atrium hingga akhir kontraksi ventrikel. Gelombang P mewakili depolarisasi atrium, kompleks QRS mewakili depolarisasi ventrikel, gelombang T mewakili repolarisasi ventrikel, sedangkan repolarisasi atrium ditutupi oleh depolarisasi ventrikel. Rekaman EKG biasanya dibuat pada kertas yang berjalan dengan kecepatan standar 25 mm/detik dan defleksi 10 mm sesuai dengan potensial 1 mV. Gambaran EKG yang normal menunjukkan bentuk dasar sebagai berikut :



Gambar 6.5. Bentuk Dasar EKG Normal dan Nama-Nama Interval
(Susi H, dkk. 2021)

4. Interpretasi

Selanjutnya hasil EKG diinterpretasikan oleh dokter atau tenaga medis yang terlatih dalam membaca elektrokardiogram. Mereka akan melihat pola gelombang EKG untuk menilai irama jantung, kecepatan denyut jantung, kehadiran gangguan irama seperti aritmia, tanda-tanda gangguan aliran darah seperti infark miokard (serangan jantung), dan kondisi jantung lainnya. Untuk mencegah kesalahan dan pembacaan yang terlewat, interpretasi pembacaan EKG diharapkan dilakukan secara sistematis. Ada beberapa cara atau urutan pembacaan EKG yang dapat dilakukan, urutan pembacaan yang sering dilakukan diantaranya:

- a. Irama
- b. Frekuensi
- c. Deviasi axis
- d. Gelombang P
- e. PR interval
- f. QRS komplek
- g. Segmen ST
- h. Gelombang T, U
- i. QTc interval
- j. Kesimpulan EKG

5. Kesimpulan dan Diagnosis

Berdasarkan interpretasi EKG, maka dokter akan membuat kesimpulan dan diagnosis. EKG adalah tes yang relatif cepat dan non-invasif yang memberikan informasi penting tentang kesehatan jantung seseorang. Ini digunakan dalam berbagai situasi, termasuk pemeriksaan rutin, evaluasi gejala jantung seperti nyeri dada atau sesak napas, dan pemantauan pasien dengan kondisi jantung yang sudah diketahui.

6.3.2 Jenis-jenis Elektrokardiografi (EKG)

EKG menghasilkan grafik yang disebut elektrokardiogram, yang memberikan informasi tentang ritme, irama, dan kondisi jantung. Berikut adalah beberapa jenis-jenis EKG yang umum:

1. EKG Istirahat (Resting EKG)

EKG ini adalah jenis EKG standar yang diambil saat pasien dalam keadaan istirahat. Merekam aktivitas listrik jantung pada keadaan diam, memberikan informasi tentang ritme dan kondisi jantung pada waktu tertentu.

2. EKG Jalan (Ambulatory EKG atau Holter Monitoring)

Pada EKG ambulatori, pasien mengenakan pemantau EKG selama periode waktu tertentu (biasanya 24 jam). Ini membantu dalam mendeteksi aritmia atau gangguan jantung yang mungkin tidak terjadi selama perekaman EKG istirahat biasa.

3. EKG Stres (Stress EKG atau Exercise EKG)

EKG ini diambil saat pasien melakukan aktivitas fisik atau stres, seperti berjalan di treadmill atau menggunakan sepeda ergometer. Ini membantu dalam menilai respons jantung terhadap beban kerja fisik.

4. EKG Fase Dinamis (*Ambulatory Telemetry Monitoring*)

Pemantauan EKG dinamis berlangsung selama beberapa hari atau bahkan minggu, memungkinkan pemantauan jangka panjang untuk mendeteksi dan merekam aktivitas listrik jantung yang tidak teratur.

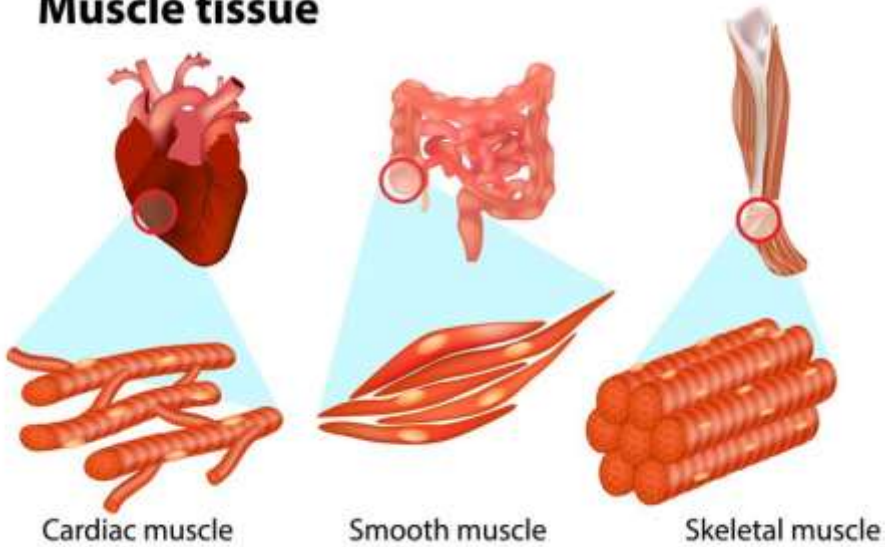
5. EKG 12-Lead atau EKG Standar
EKG ini paling umum yang merekam aktivitas listrik jantung dari 12 sudut yang berbeda. Memberikan informasi rinci tentang kondisi dan struktur jantung.
6. EKG Rujukan (Reference EKG)
EKG jenis ini untuk mengidentifikasi perubahan atau anomali yang mungkin muncul pada EKG pasien.
7. EKG Masa-Masa Kritis
EKG dapat diambil selama periode waktu tertentu untuk memantau aktivitas listrik jantung selama kondisi kritis, seperti selama operasi atau di unit perawatan intensif.
8. EKG Pediatrik
EKG pada anak-anak sering memerlukan peralatan dan interpretasi khusus karena perbedaan normal pada aktivitas listrik jantung anak-anak.
9. EKG dengan Perekaman Elektroda Tambahan
Beberapa EKG melibatkan perekaman dengan elektroda tambahan untuk mendapatkan informasi lebih lanjut tentang struktur atau fungsi jantung.

6.4 Otot

Otot adalah jaringan tubuh yang memiliki kemampuan untuk mengalami kontraksi dan relaksasi. Ini memungkinkan otot untuk menghasilkan gerakan dan mempertahankan postur tubuh. Otot berfungsi menghasilkan gerakan tubuh dan memungkinkan mobilitas. membantu menjaga postur tubuh, Otot juga terlibat dalam menjaga suhu tubuh melalui proses metabolisme

Terdapat tiga jenis otot yaitu otot rangka (*Skeletal Muscle*) yang melekat pada tulang dan memungkinkan Gerakan yaitu tubuh seperti berjalan, berlari, dan mengangkat benda. Otot polos (*Smooth Muscle*) terdapat pada dinding organ dalam seperti lambung, usus, dan pembuluh darah otot ini mengatur fungsi organ-organ tersebut. otot Jantung (*Cardiac Muscle*) ditemukan di dinding jantung dan memastikan kontraksi yang terkoordinasi untuk memompa darah.

Muscle tissue



Gambar 6.7. Jenis-jenis otot

(<https://www.kompas.com/skola/image/2020/03/02/120000169/tiga-jenis-otot-pada-manusia?page=1>)

Cara otot berkontraksi otot yaitu melibatkan perubahan panjang serat otot. Kontraksi terjadi ketika filamen otot aktin dan miosin saling berinteraksi. Selanjutnya pesan saraf dari sistem saraf menginisiasi kontraksi otot. Latihan dan pembentukan otot dilakukan dengan cara latihan fisik, terutama latihan resistensi seperti angkat beban, dapat memperkuat dan memperbesar otot. Nutrisi dan istirahat yang tepat juga berperan penting dalam pembentukan otot.

Otot sangat diperlukan bagi tubuh dan bermanfaat bagi kesehatan yaitu otot yang kuat akan mendukung kesehatan tulang, mengurangi risiko cedera, dan meningkatkan kualitas hidup. Otot juga dapat berperan dalam mengontrol kadar gula darah dan metabolisme. Otot dapat mengalami cedera seperti regangan otot atau ketegangan otot, terutama jika terjadi peregangan berlebihan atau gerakan yang tiba-tiba.

6.5 Elektromiografi (EMG)

Elektromiografi (EMG) adalah sebuah tes diagnostik yang digunakan untuk memeriksa aktivitas listrik dalam otot-otot manusia. Tes ini membantu dokter dalam mendiagnosis berbagai gangguan neuromuskular dan memahami bagaimana saraf dan otot berkomunikasi. EMG digunakan untuk mengevaluasi fungsi otot dan saraf. Ini dapat membantu dalam mendiagnosis berbagai masalah kesehatan, termasuk neuropati (kerusakan saraf perifer), gangguan otot, cedera saraf, dan gangguan neuromuskular seperti miastenia gravis atau ALS (*Amyotrophic Lateral Sclerosis*). EMG ini mampu mendeteksi sinyal-sinyal yang dihasilkan oleh otot tubuh manusia menjadi sinyal listrik. Aktivasi otot dipicu oleh sinyal bioelektrik dengan amplitudo sangat rendah yang dikirim dari neuron kontrol motor di otak kita ke serat otot. Namun, hasilnya tergantung pada kemampuan dan pengalaman ahli yang melakukan tes. EMG juga memiliki batasan dalam mendeteksi beberapa gangguan saraf, terutama jika masalahnya berada dalam saraf yang lebih dalam.



Gambar 6.7. Pemeriksaan saraf pasien menggunakan Elektromiografi
(<https://depositphotos.com/id/photos/emg.html>)

EMG merupakan alat medis untuk membantu dalam mendiagnosis dan mengelola berbagai gangguan neuromuskular. Pasien yang memerlukan EMG biasanya dirujuk oleh dokter mereka untuk pemeriksaan lebih lanjut. Elektromiografi dapat membantu dalam mendiagnosis gangguan neuromuskular atau penyakit otot.

Berikut adalah beberapa konsep dasar elektromiografi (EMG):

1. Prinsip Elektromiografi

Elektromiografi bekerja dengan merekam sinyal listrik yang dihasilkan oleh aktivitas kontraksi otot. Elektroda ditempatkan pada kulit di atas otot yang akan diperiksa untuk merekam sinyal-sinyal ini.

2. Elektroda EMG

Elektroda adalah sensor kecil yang menangkap sinyal listrik dari otot. Elektroda ini ditempatkan pada permukaan kulit di atas otot yang sedang diperiksa.

3. Proses Perekaman

Pada saat otot berkontraksi, sel-sel otot menghasilkan potensial aksi yang menciptakan sinyal listrik. Elektromiografi merekam sinyal ini untuk mengevaluasi aktivitas otot.

4. Analisis Pola Gelombang

Sinyal listrik yang direkam kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi pola gelombang, frekuensi, dan amplitudo. Analisis ini membantu dalam menentukan kesehatan otot dan sistem saraf.

5. Aplikasi Klinis

Elektromiografi digunakan dalam berbagai aplikasi klinis, termasuk diagnosis gangguan neuromuskular seperti neuropati, miopati, atau cedera saraf.

6. Tes NCV (*Nerve Conduction Velocity*)

EMG sering kali digunakan bersama dengan tes NCV untuk mengevaluasi kecepatan konduksi saraf dan mengidentifikasi kerusakan saraf.

7. Prosedur Elektromiografi

Pasien diminta untuk melakukan gerakan tertentu atau mengontraksikan otot saat elektromiografi dilakukan.

Proses ini membantu dalam mengevaluasi respons otot terhadap stimulasi.

8. Manfaat dan Limitasi:

Elektromiografi memberikan informasi penting kepada dokter untuk membuat diagnosis dan merencanakan pengobatan. Namun, perlu diingat bahwa hasilnya dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal seperti aktivitas fisik dan obat-obatan.

9. Pentingnya Konsultasi Medis:

Hasil elektromiografi harus diinterpretasikan oleh dokter yang berpengalaman dalam neurologi atau fisik. Konsultasi medis diperlukan untuk merinci hasil dan membuat rencana pengobatan yang sesuai.

6.5.1 Fungsi Elektromiografi (EMG)

Pemeriksaan elektromiografi bertujuan untuk menilai seberapa baiknya otot bekerja dalam memberikan respon berupa sinyal dari saraf. normalnya, otot akan spontan bergerak apabila menerima sinyal listrik dari saraf yang memberikan perintah untuk bekerja. Elektromiografi (EMG) memiliki beberapa fungsi penting dalam bidang medis dan klinis. Berikut adalah beberapa fungsi utama dari tes EMG:

1. Diagnosa Gangguan Neuromuskular

EMG digunakan untuk mendiagnosis berbagai gangguan neuromuskular, termasuk neuropati (kerusakan saraf perifer), miopati (gangguan otot), gangguan persarafan otot, dan gangguan neuromuskular lainnya. Dengan mengukur aktivitas listrik dalam otot, EMG dapat membantu dokter mengidentifikasi masalah yang mungkin terjadi pada saraf atau otot, seperti lesi saraf, kelemahan otot, atau kelainan konduksi saraf.

2. Evaluasi Kelemahan Otot

EMG dapat membantu menentukan penyebab kelemahan otot, apakah itu disebabkan oleh kerusakan saraf, masalah otot itu sendiri, atau gangguan lainnya. Ini sangat penting dalam menentukan diagnosis yang akurat dan pengelolaan yang tepat bagi pasien.

3. Monitoring Progresi Penyakit

EMG juga digunakan untuk memantau perkembangan penyakit neuromuskular pada pasien. Ini dapat membantu dokter menilai efektivitas pengobatan dan mengukur kemajuan atau kemunduran penyakit seiring waktu.

4. Pemilihan Lokasi Biopsi Otot

Dalam beberapa kasus, EMG dapat digunakan untuk membantu dokter memilih lokasi yang tepat untuk melakukan biopsi otot. Ini berguna dalam mendapatkan sampel otot yang mungkin mengandung informasi diagnostik yang diperlukan.

5. Penyelidikan Keluhan Pasien

EMG digunakan untuk menyelidiki keluhan pasien yang berhubungan dengan gejala neuromuskular seperti kram otot, kelemahan, kebasan, nyeri, atau gangguan gerakan.

6. Pemantauan Prosedur Bedah

Selama operasi saraf atau otot, EMG dapat digunakan untuk memantau aktivitas listrik di dalam otot dan saraf. Ini membantu dokter memastikan integritas saraf dan otot selama prosedur bedah.

7. Evaluasi Terapi Rehabilitasi

EMG dapat digunakan dalam pengembangan program rehabilitasi untuk pasien yang mengalami kelemahan otot atau cedera saraf. Ini membantu dalam mengukur kemajuan pasien selama terapi rehabilitasi.

6.5.2 Jenis-Jenis Elektromiografi (EMG)

Elektromiografi (EMG) dapat dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan tujuan penggunaannya dan area yang diperiksa. Berikut adalah beberapa jenis elektromiografi yang umum:

1. Elektromiografi Konsentrik (*Surface EMG*)

Jenis elektromiografi ini menggunakan elektroda yang ditempatkan di permukaan kulit untuk merekam aktivitas listrik dari otot yang berada di bawahnya. Ini adalah metode non-invasif dan umumnya digunakan untuk mengevaluasi otot-otot permukaan.

2. Elektromiografi Jarum (*Needle EMG*)
Elektromiografi jarum melibatkan penggunaan jarum yang dimasukkan ke dalam otot untuk merekam sinyal listrik secara langsung dari serat otot. Metode ini memberikan informasi yang lebih spesifik tentang aktivitas otot dan dapat digunakan untuk mendiagnosis penyakit otot atau gangguan neuromuskular.
3. Elektromiografi diagnostic
Jenis ini mencakup perekaman aktivitas listrik otot selama istirahat dan kontraksi. Ini membantu dalam mengevaluasi apakah ada tanda-tanda gangguan neuromuskular atau cedera saraf.
4. Elektromiografi Repetitif (*Repetitive Nerve Stimulation - RNS*)
RNS digunakan untuk mengevaluasi kelemahan otot dan mengidentifikasi gangguan neuromuskular tertentu dengan memberikan rangsangan berulang ke saraf yang mengendalikan otot.
5. Elektromiografi Satu Serat (*Single Fiber EMG*)
Metode ini digunakan untuk memeriksa kinerja satu serat otot secara individu. Hal ini membantu dalam mengevaluasi keadaan neuromuskular yang lebih spesifik.
6. Elektromiografi Kuantitatif (*Quantitative EMG*)
Teknik ini melibatkan analisis kuantitatif sinyal listrik untuk mengukur parameter seperti amplitudo dan durasi. Hal ini dapat memberikan informasi lebih lanjut tentang keadaan otot dan saraf.
7. Elektromiografi Selama Tes NCV (*EMG-NCV Combined Studies*)
Kadang-kadang, elektromiografi dilakukan bersama dengan tes kecepatan konduksi saraf (NCV) untuk memberikan gambaran komprehensif tentang fungsi neuromuskular.

6.5.3 Cara Kerja Elektromiografi (EMG)

Cara kerja Elektromiografi (EMG) melibatkan pengukuran aktivitas listrik dalam otot untuk mengevaluasi fungsi neuromuskular. Berikut cara kerja EMG secara umum :

1. Pemilihan Otot:

Langkah pertama dokter atau ahli EMG akan menentukan otot mana yang akan diperiksa. Pemilihan otot ini bergantung pada keluhan pasien dan gejala yang dialami.

2. Pemilihan Elektroda

Ada dua jenis elektroda yang dapat digunakan dalam EMG: elektroda jarum dan elektroda permukaan. Pemilihan jenis elektroda tergantung pada jenis pemeriksaan yang diperlukan dan preferensi dokter.

a. Elektroda Jarum: Elektroda ini berbentuk jarum yang sangat tipis dan tajam. Elektroda jarum ditempatkan langsung di dalam otot yang akan diperiksa. Ini memungkinkan untuk mendapatkan sinyal yang sangat detail dari dalam otot.

b. Elektroda Permukaan: Elektroda permukaan ditempatkan pada kulit di atas otot yang akan diperiksa. Ini digunakan dalam pemeriksaan yang tidak memerlukan detail tinggi dan lebih nyaman bagi pasien.

3. Persiapan Pasien

Pasien biasanya diminta untuk berbaring atau duduk dengan otot yang akan diperiksa dalam keadaan rileks. Kulit area yang akan diperiksa dibersihkan untuk memastikan kontak yang baik dengan elektroda.

4. Perekaman Sinyal

Elektroda-elektroda yang telah dipilih akan terhubung ke perangkat perekam. Selama pemeriksaan, dokter akan memeriksa aktivitas listrik otot baik saat otot dalam keadaan istirahat maupun saat otot berkontraksi.

a. Saat Otot Istirahat

Dokter akan memeriksa aktivitas listrik otot dalam keadaan istirahat untuk mencari tanda-tanda aktivitas listrik abnormal yang mungkin terjadi saat otot seharusnya tidak aktif.

b. Saat Otot Berkontraksi

Selanjutnya, dokter akan meminta pasien untuk melakukan gerakan tertentu atau mengencangkan otot yang sedang diperiksa. Ini akan memungkinkan dokter

untuk memeriksa aktivitas listrik otot saat berkontraksi.

5. Rekaman dan Analisis

Selama pengujian, aktivitas listrik dalam otot akan direkam dalam bentuk grafik atau tampilan visual dan audio. Ahli EMG akan menganalisis hasil ini untuk mengidentifikasi tanda-tanda gangguan neuromuskular, seperti kelemahan otot, kejang, atau perubahan pola aktivitas listrik.

6. Kesimpulan dan Diagnosis

Berdasarkan hasil EMG, dokter akan membuat kesimpulan dan memberikan diagnosis yang sesuai. Hasil EMG sering digunakan bersama dengan tes lain seperti tes kecepatan konduksi saraf (NCV) untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang masalah neuromuskular.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad,H. 2017. Sistem Konduksi Jantung. *Buletin Farmatera Vol. 2 (3)*, hal. 116-123.
- David C.P. & Barbara E. S. 2013. *Electromyography and Neuromuscular Disorder. Third edition*. Elsevier Inc.
- Enderle, J. D. and Bronzino J. D. 2012. *Introduction to Biomedical Engineering Third Edition*. Oxford: Academic Press Elsevier Inc.
- Merletti, R., & Parker, P. A. 2004. *Electromyography: Physiology, Engineering, and Non-Invasive Applications*. Wiley-IEEE Press.
- Susi H, dkk. 2021. *Elektrokardiografi, Metode Pembelajaran Praktis*. Semarang: Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro
- Wagner, N. B., & Salisbury, P. F. 2009. *Basic Electrocardiography: Normal and Abnormal ECG Patterns*. John Wiley & Sons.
- <https://depositphotos.com/id/photos/emg.html>
- <https://www.kompas.com/skola/image/2020/03/02/120000169/tiga-jenis-otot-pada-manusia?page=1>

BAB 7

PRINSIP GERAK TUBUH DAN BIOMEKANIKA

Oleh Sri Zelviani

7.1 Pendahuluan

Manusia memiliki kemampuan untuk bergerak dan berpindah tempat. Gerakan terjadi melalui kerjasama antara rangka dan otot. Rangka manusia terdiri atas tulang yang beberapa bersatu, sementara yang lain terhubung melalui sendi dengan bantuan ligamen untuk memungkinkan pergerakan. Otot melekat pada tulang dan menghubungkan satu tulang dengan tulang lainnya. Otot dapat berkontraksi, memungkinkan pergerakan tulang dengan mekanisme tertentu. Sistem kerja otot yang demikian disebut dengan sistem gerak aktif. Hal sebaliknya, tulang tidak dapat melakukan kontraksi sehingga dianggap pergerakan yang ditimbulkan oleh tulang dikatakan sebagai gerak pasif/ alat gerak pasif.

Ilmu mengenai aspek-aspek dari gerakan tubuh manusia merupakan fokus utama dalam bidang biomekanika. Bidang ini merupakan gabungan dari pengetahuan dalam antropometri, mekanika, dan dasar-dasar kedokteran seperti biologi, anatomi dan fisiologi. Berdasarkan pendapat dari Frankel dan Nordin, biomekanika memanfaatkan konsep fisika dan Teknik untuk menguraikan pergerakan pada berbagai bagian tubuh dan gaya-gaya yang mempengaruhi tubuh selama melakukan kegiatan sehari-hari.

Biomekanika mengkaji kemampuan manusia seperti kekuatan, daya tahan, kecepatan, dan ketelitian. Bidang ini terbagi menjadi dua perspektif, salah satunya adalah:

1. Ilmu Kinetika, yang mendalami faktor-faktor gaya yang menyebabkan suatu benda bergerak atau tetap dalam keadaan diam.

2. Kinematika adalah cabang ilmu yang meneliti karakteristik pergerakan tanpa memperhatikan bidang atau sudut gerakan, baik itu penuh atau tidak.

7.2 Hukum-Hukum Newton

Hukum gerak Newton menjelaskan penyebab suatu objek dapat berubah posisi atau bergerak. Parameter fisika yang menyebabkan perubahan posisi dikenal dengan istilah gaya. Gaya dapat diartikan sebagai perubahan momentum terhadap waktu atau perubahan energi mekanik atau potensial. Adanya perubahan energi ini mengakibatkan perubahan posisi atau bentuk objek tersebut. Gaya merupakan parameter fisika yang memiliki arah, dikenal sebagai besaran vektor yang memiliki nilai dan orientasi. Sebagai contoh, gaya untuk menggeser posisi meja memiliki arah mendatar, sedangkan gaya berat suatu objek memiliki arah ke bawah. Untuk melakukan penjumlahan dan pengurangan gaya, diterapkan aturan perhitungan vektor.

7.2.1 Hukum Pertama Newton

Hukum I Newton, yang menyatakan bahwa: *“Sebuah benda dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan, akan tetap diam atau akan terus bergerak dengan kecepatan konstan, kecuali ada gaya-gaya eksternal yang bekerja pada benda itu”*. Definisi hukum Newton ini memberikan gambaran bahwa suatu objek akan terus bergerak dengan kecepatan sama selama tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada objek tersebut, kecenderungan ini digambarkan dengan mengatakan bahwa benda mempunyai sifat yang disebut inersia atau kelembaman. Oleh sebab itu, hukum I Newton biasanya dinyatakan sebagai hukum kelembaman. Hukum ini dapat dituliskan dalam bentuk matematis:

$$\sum F = 0 \quad (7.1)$$

Persamaan 7.1 memberikan gambaran bahwa untuk objek yang awalnya tidak bergerak, akan tetap berada dalam keadaan diam selamanya, sementara objek yang sudah bergerak akan terus berlanjut dalam gerakannya kecuali ada gaya eksternal yang membuat objek tersebut berhenti (diam). Sebagai contoh, saat berada di atas kendaraan yang bergerak dan kemudian mendadak direm, posisi orang yang berada di atas kendaraan akan terdorong

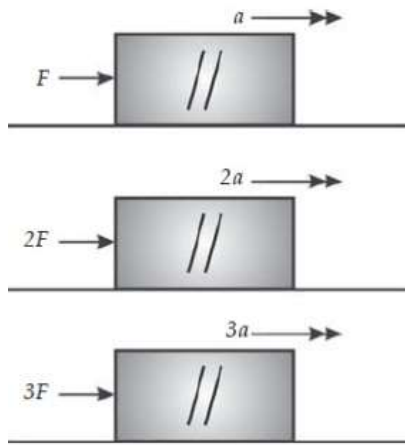
ke depan. Kejadian ini mengindikasikan bahwa penumpang yang bergerak bersama kendaraan cenderung untuk tetap bergerak. Ilustrasi pada gambar di bawah ini memperlihatkan konsep benda yang memiliki sifat kelembaman atau inersia;



Gambar 7.1. Kelembaman bekerja pada mobil yang direm
(Sumber: mobilmo.com; diakses Januari 2024)

7.2.2 Hukum Kedua Newton

Sifat inersia/kelembaman suatu benda akan hilang jika gaya eksternal yang berkerja pada benda tersebut. Dengan demikian bahwa gaya tersebut akan membuat benda tersebut mempunyai percepatan. Apabila gaya bekerja searah dengan kecepatan benda, seperti pada Gambar 7.2 berikut, maka kecepatan benda akan meningkat, yang disebut sebagai percepatan. Sebaliknya, jika gaya bekerja berlawanan dengan kecepatan benda, kecepatan benda akan berkurang, disebut sebagai perlambatan atau percepatan ke arah negatif.



Gambar 7.2. Benda dipengaruhi gaya (F) ; timbul percepatan (a)
(Sumber: fisikazone.com; diakses 2018)

Pada percobaan mengenai gerak lurus, dapat ditarik kesimpulan bahwa percepatan suatu objek atau benda sebanding dengan resultan gaya yang dikenakan padanya dan berbanding terbalik dengan massa benda tersebut, serta arah percepatannya akan sama dengan arah resultan gayanya. Kesimpulan ini merupakan bunyi dari Hukum II Newton, yang menyatakan bahwa: *"percepatan sebuah benda berbanding lurus dengan gaya yang bekerja padanya, dan berbanding terbalik dengan massanya. Arah percepatan sama dengan arah gaya total yang bekerja padanya"*.

$$"a = \sum \frac{F}{m} \text{ atau } \sum F = m a "$$
 (7.2)

dimana;

" F = gaya (N)"

" m = massa benda (kg)"

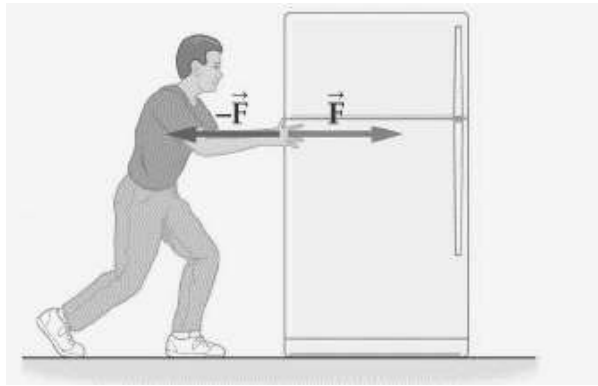
" a = percepatan (m/s^2)"

7.2.3 Hukum Ketiga Newton

Seorang pelajar mendorong suatu meja sampai meja/objek tersebut mengalami perubahan posisi. Ilustrasi tersebut memberikan gambaran bahwa ketika suatu objek atau benda memberikan gaya ke benda lainnya, maka benda kedua tersebut

akan selalu memberikan respons yang sama. Dengan demikian dapat dinyatakan besar kedua gaya yang dihasilkan mempunyai nilai atau besar yang sama akan tetapi arah gaya yang berbeda.

Gaya dengan arah positif disebut dengan gaya aksi yang artinya melakukan gaya pada objek. Sebaliknya gaya dengan arah negatif dinyatakan sebagai gaya aksi atau dengan kata lain disebut gaya aksi. Tanda $-$ hanya menyatakan arah gaya. Gambar 7.3 merupakan ilustrasi dari gaya aksi dan gaya reaksi.



Gambar 7.3. Gaya aksi dan gaya reaksi
(Sumber: fisikanewton.com; diakses Januari 2024)

Newton pertama kali menyatakan sifat ini dalam formulasi hukum gerak ketiganya, yang diuraikan sebagai berikut: *“Untuk setiap aksi selalu terdapat reaksi yang sama besar dan berlawanan arah, atau reaksi timbal balik satu terhadap yang lain antara dua benda selalu sama besar, dan berarah ke bagian yang berlawanan”*. Gaya aksi dan reaksi terletak pada suatu garis lurus yang menghubungkan kedua objek atau benda. Keduanya selalu timbul sebagai pasangan dan bekerja pada objek atau benda yang berbeda. Secara matematis, hukum Newton ketiga dapat dituliskan sebagai:

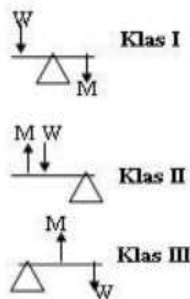
$$F_{aksi} = -F_{reaksi} \quad (7.3)$$

7.3 Analisis Gaya dan Kegunaan Klinik

Dalam konteks fisika, gaya dapat diartikan sebagai tarikan atau dorongan pada suatu objek, yang menyebabkan perubahan posisi atau bentuk objek tersebut. Sama halnya pada tubuh manusia, setiap gerakan tubuh melibatkan gaya. Ada gaya yang bekerja pada permukaan tubuh, dan ada pula gaya yang aktif di dalam tubuh. Gaya yang bekerja pada tubuh dapat terdeteksi saat kita berinteraksi dengan objek di sekitar kita. Namun, gaya yang terjadi di dalam tubuh seringkali tidak kita sadari, seperti gaya yang dihasilkan oleh otot jantung dalam memompa darah atau gaya yang dihasilkan oleh otot paru-paru saat melakukan proses inspirasi dan ekspirasi.

Sistem otot dan tulang pada manusia berfungsi sebagai sistem pengumpul. Ada tiga macam sistem pengumpul yang bekerja pada tubuh manusia, yaitu:

1. Klas pertama
Titik tumpuan berada di antara gaya berat dan otot, seperti yang terjadi pada kepala dan leher.
2. Klas kedua
Gaya berat berada di antara titik tumpu dan gaya otot, seperti yang terjadi pada tumit saat melakukan menjinjit
3. Klas ketiga
Gaya otot terletak di antara titik tumpuan dan gaya berat, contohnya adalah otot lengan



Gambar 7.4. Tiga klas sistem pengumpul

(Sumber: Gabriel.1996)

Keterangan Δ = titik tumpuan; M = gaya otot; W = gaya berat

Gaya yang sering digunakan untuk menjaga stabilitas pada bagian tubuh yang mengalami cedera di leher, punggung, atau daerah panggul adalah traksi. Traksi terapeutik diterapkan dengan memberikan tarikan pada kepala, tubuh, atau anggota tubuh dalam setidaknya dua arah, seperti tarikan traksi dan tarikan traksi yang berlawanan. Gaya traksi atau tarikan yang berlawanan ini biasanya berasal dari berat tubuh pasien ketika istrberada dalam posisi bertumpu atau berat tambahan lainnya.

Traksi adalah metode yang melibatkan penggunaan tahanan berat atau alat lain untuk mengatasi kerusakan atau gangguan pada tulang dan otot. Tujuan utama dari penerapan traksi adalah untuk merawat fraktur, dislokasi, atau spasme otot dengan upaya memperbaiki deformitas dan mempercepat proses penyembuhan. Terdapat dua tipe utama traksi, yakni traksi skeletal dan traksi kulit, masing-masing melibatkan berbagai pendekatan dalam penanganannya..

Prinsip dasar traksi menggunakan penerapan tarikan pada bagian tubuh, ekstremitas, panggul, atau tulang belakang, dengan mengeksekusi tahanan yang berlawanan yang dikenal sebagai *countertraksi*. Proses traksi dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti traksi manual yang dilakukan melalui tangan, dengan penggunaan talim splint, dan pemanfaatan berat seperti pada traksi kulit. Selain itu, traksi dapat juga dilakukan dengan menggunakan pin, kawat, dan tongs yang dimasukkan secara kedalam tulang, dikenal sebagai traksi skeletal.

Penggunaan traksi dapat dilakukan melalui kulit atau tulang. Kulit memiliki kapasitas menanggung beban traksi sekitar 5 kg pada orang dewasa. Apabila dibutuhkan beban lebih besar, maka traksi melalui tulang menjadi alternatif yang diperlukan. Akan tetapi, perlu dihindari penggunaan traksi tulang pada anak-anak karena *growth plate* mudah mengalami kerusakan akibat penggunaan pin tulang.

Penggunaan traksi kulit dapat dipertimbangkan dalam beberapa situasi, termasuk pada anak-anak yang memerlukan reduksi tertutup, sebagai persiapan sementara sebelum operasi, atau saat traksi dengan beban sekitar 5 kg diperlukan. Namun, risiko akibat traksi kulit yang melebihi batas beban tersebut melibatkan potensi dampak negatif seperti nekrosis kulit, obstruksi vaskular,

pembengkakan (oedem) di daerah yang lebih jauh, dan terjadinya peroneal nerve palsy pada traksi di tungkai.

Traksi pada tulang dilakukan pada orang dewasa yang membutuhkan beban lebih dari 5 kg; mengalami kerusakan pada kulit, atau untuk penggunaan dalam jangka waktu yang lama. Kontratraksi, yang merupakan tindakan untuk melawan gaya tarikan, dapat diperlukan sebagai contohnya dengan menaikkan posisi tungkai lebih tinggi pada traksi yang dilakukan pada tungkai. Penggunaan traksi ini dapat dilakukan, apabila;

1. Untuk memosisikan tulang fraktur kembali ke posisi awal
2. Untuk mempertahankan keadaan diam atau tidak bergerak sampai terjadi penyatuan
3. Untuk melakukan keduanya, yang satu diikuti oleh yang lain

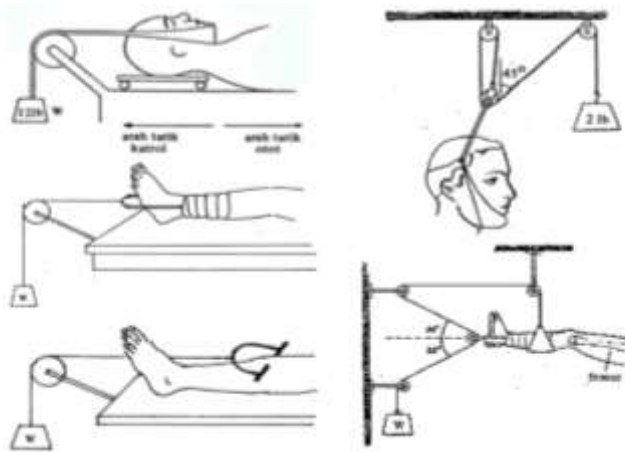
Untuk penerapan traksi secara optimal, perlu ditemukan metode yang dapat dengan aman menahan tulang pasien yang mengalami fraktur selama beberapa minggu, jika diperlukan. Terdapat dua pendekatan untuk melaksanakan hal ini:

1. Melakukan pemasangan pengikat pada kulit (traksi kulit)
2. Memanfaatkan Steinmann pin, Denham pin, atau Kirschner wire melalui tulang (traksi tulang).

Setelah itu, tali digunakan untuk mengikat pengikat, pin, atau kawat yang telah ditempatkan melalui katrol, dan dihubungkan dengan beban. Beban tersebut dapat mendorong pasien keluar dari tempat tidurnya, sehingga biasanya diperlukan traksi yang berlawanan dengan menaikkan kaki dari tempat tidur. Salah satu tujuan utama dari traksi adalah memberikan kesempatan kepada pasien untuk melatih otot dan melakukan gerakan sendiri, oleh karena itu, pastikan bahwa pasien aktif dalam hal ini. Meskipun proses penerapan dan penyesuaian traksi memerlukan waktu, namun hal ini dapat dengan mudah diatur dengan bantuan asisten.

Pada gambar 7.5 berikut ini diperlihatkan beberapa aplikasi dari hukum-hukum Newton dalam praktik klinik, di antaranya

adalah: traksi leher, traksi tulang, traksi otot, traksi kulit, traksi kaki, dan traksi kepala.



Gambar 7.5. Traksi leher, traksi otot, traksi kulit, traksi kepala dan traksi kaki
(Sumber: Gabriel.1996)

7.4 Prinsip dalam Mekanika Tubuh

Mekanika tubuh memiliki peranan signifikan dalam kehidupan sehari-hari dan kesehatan. Hal ini mempengaruhi tingkat kesejahteraan dan dapat membantu dalam mencegah cedera. Penerapan mekanika tubuh yang benar diperlukan untuk mendukung kesehatan dan mencegah potensi risiko.

Prinsip-prinsip dasar dalam biomekanika melibatkan pertimbangan gravitasi sebagai pertimbangan pertama dan menjadi hal utama yang mempengaruhi gerakan tubuh, di antaranya adalah pusat gravitasi yang merupakan titik tengah tubuh, garis gravitasi yang merupakan garis imajiner ventrikel yang melalui pusat gravitasi, serta dasar tumpuan yang merupakan tempat titik kontak tubuh dengan permukaan.

Pertimbangan kedua dalam mekanika tubuh adalah kestabilan. Kestabilan akan mencapai keseimbangan dengan mempertahankan posisi garis gravitasi di antara pusat gravitasi dan titik kontak dengan permukaan. Kestabilan tercapai dengan

menjaga posisi garis pusat gravitasi antara pusat gravitasi dan titik kontak dengan permukaan.

Selain itu, pertimbangan ketiga adalah berat atau beban dari objek atau benda yang diangkat. Penerapan mekanika tubuh yang baik mencakup pengelolaan berat benda yang diangkat, dengan tujuan menjaga posisi garis pusat gravitasi agar tetap stabil dan mencegah cedera, dengan memahami dan mengaplikasikan prinsip-prinsip tersebut, seseorang dapat mempertahankan kesehatan tubuh, mencegah cedera, dan mengoptimalkan kinerja fisiknya dalam berbagai aktivitas sehari-hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Diklat Kuliah. *Fisika Kesehatan*. 2006 Makassar: Jurusan Fisika FMIPA UNHAS
- Gabriel, J.F., 1996, *Fisika kedokteran*, Jakarta: EGC.
- Giancoli D.C., 2001, *Fisika*, Alih Bahasa Yuhilza Hanum, edisi kelima, Jakarta: Erlangga.
- Hani, A.R., Riwidikdo, H., 2007, *Fisika Kesehatan*, Yogyakarta: Nuha Medika.
- Sears F. W and Zemansky M.W, 1954, *Physics for University*, Cambridge.
- Tipler P.A., 1998, *Fisika Untuk Sains dan Teknik*. Alih Bahasa Lea Prasetio & Ramad W.A., edisi ketiga, Jakarta: Erlangga.
- Zelviani, S., 2018, *Fisika Kesehatan & Proteksi Radiasi*, Makassar: UIN Alauddin Press

BAB 8

PENGUNAAN ENERGI DALAM KEDOKTERAN

Oleh Muh. Said L

8.1 Konsep Dasar Energi

Energi dalam teori fisika biasa disebut tenaga yaitu kemampuan untuk bekerja atau melakukan usaha. Pada dasarnya dikehidupan ini bentuk energi banyak ragamnya antara lain energi panas (kalor), energi elektromagnetik, energi gerak (kinetik), energi bunyi, energi listrik, energi kimia, energi cahaya, energi magnet dan lain sebagainya (Giancoli, 2014). Sedangkan energi dalam bidang kedokteran merujuk pada berbagai konsep dan proses yang terkait dengan produksi, penggunaan, dan manajemen sumber daya energi dalam tubuh manusia. Secara umum, energi dibutuhkan untuk mendukung fungsi-fungsi vital sel, organ, dan sistem tubuh, dan pemahaman mengenai aspek ini menjadi krusial dalam praktek kedokteran.

Manusia memiliki alat untuk mengubah energi yakni biolistrik (tubuh energi) dan tubuh fisik. Keduanya sangat berperan dalam mengkonversi energi. Tubuh yang dapat dirasakan secara langsung dan dapat diamati melalui panca indera atau bahkan dipegang disebut tubuh fisik, sedangkan tubuh yang tidak kelihatan secara langsung dimata orang banyak disebut tubuh energi (Pujotomo I., 2016). Beberapa hal yang menjadi bagian penting dalam kebutuhan energi tubuh manusia, yaitu

Pertama, energi metabolisme memainkan peran kunci dalam menjalankan aktivitas seluler. Nutrisi yang dikonsumsi, seperti karbohidrat, lemak, dan protein, diubah melalui proses metabolisme menjadi adenosin trifosfat (ATP), molekul yang menyimpan dan mentransfer energi dalam sel. ATP merupakan sumber energi utama yang digunakan untuk mendukung aktivitas sel, termasuk sintesis (Sepideh, 2019). Jumlah energi yang diperlukan untuk

menjaga tubuh berfungsi dalam keadaan istirahat, terjaga, dan puasa dalam lingkungan yang nyaman dan hangat disebut tingkat metabolisme istirahat (RMR). Faktor-faktor yang menentukan tingkat metabolisme total, meliputi:

1. Tingkat metabolisme istirahat
2. Energi yang diperlukan untuk melakukan segala jenis pekerjaan otot, mulai dari duduk di tempat tidur hingga pekerjaan fisik atau latihan fisik yang sangat berat
3. Efek termik dari makanan.

Makronutrien (karbohidrat, protein, lemak, dan minyak) yang dikonsumsi dalam diet membantu menyediakan energi yang dibutuhkan oleh tubuh untuk menjaga fungsinya. Energi ini digunakan untuk menggerakkan sistem kimia, mekanik, dan listrik yang kompleks dalam tubuh. Tingkat pelepasan energi dari makronutrien melalui proses kimia yang terjadi dalam tubuh dikenal sebagai tingkat metabolisme (www.sciencelearn.org.nz)

Kedua, dalam konteks penyembuhan dan regenerasi, energi menjadi faktor penentu. Proses-proses seperti penyembuhan luka dan regenerasi jaringan memerlukan sejumlah besar energi untuk mempercepat pemulihan. Sel-sel yang terlibat dalam proses ini memanfaatkan ATP dan energi lainnya untuk mensintesis materi baru, mereplikasi sel, dan memperbaiki kerusakan (Sepideh, 2019).

Ketiga, ketidakseimbangan energi dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan. Gangguan metabolisme energi, seperti diabetes mellitus, dapat mempengaruhi kemampuan tubuh dalam menggunakan glukosa sebagai sumber energi, mengakibatkan komplikasi serius. Pemahaman mendalam tentang metabolisme energi membantu dokter dalam menilai dan mengelola kondisi pasien secara lebih efektif, termasuk melalui perencanaan diet dan pengaturan nutrisi yang sesuai. Dengan demikian, dalam bidang kedokteran, energi bukan hanya sekadar konsep fisika, tetapi juga landasan vital bagi fungsi dan pemeliharaan kesehatan tubuh manusia. protein, transportasi zat, dan menjaga potensial membran (Salway, J. G., 2017).

Selain itu, energi dalam konteks kedokteran juga terkait dengan penggunaan teknologi medis dan pemahaman mengenai

konsumsi energi selama prosedur diagnostik. Pemindaian gambar medis seperti MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) dan CT scan membutuhkan sumber daya energi yang signifikan untuk menghasilkan gambaran tubuh yang akurat (Stoller, 2018). Dokter dan tenaga medis perlu mempertimbangkan dampak penggunaan peralatan medis terhadap kebutuhan energi pasien, terutama pada individu dengan kondisi kesehatan yang mungkin memerlukan manajemen energi yang lebih cermat. Dengan demikian, energi bukan hanya terkait dengan aspek biologis tubuh, tetapi juga memasuki ranah teknologi medis yang berkembang pesat, memerlukan pendekatan yang holistik dalam menyelenggarakan perawatan kesehatan modern.

8.2 Konsep Dasar Energi

Beberapa faktor yang mempengaruhi energi dalam kedokteran melibatkan aspek-aspek seperti metabolisme, kondisi kesehatan, gaya hidup, dan penggunaan teknologi medis Langley & Evans. (2019); Rhoades & Bell (2012). Berikut adalah beberapa faktor utama:

1. **Metabolisme Tubuh:**

Faktor yang paling mendasar adalah metabolisme tubuh, yang memengaruhi bagaimana tubuh mengubah nutrisi menjadi energi. Kecepatan metabolisme dapat dipengaruhi oleh faktor genetik, usia, jenis kelamin, dan tingkat aktivitas fisik.

2. **Kondisi Kesehatan:**

Kondisi kesehatan secara langsung mempengaruhi tingkat energi dalam tubuh. Penyakit kronis seperti diabetes, penyakit kardiovaskular, atau gangguan metabolik dapat mengubah cara tubuh memproses dan menggunakan energi.

3. **Nutrisi dan Diet:**

Jenis dan jumlah nutrisi yang dikonsumsi melalui diet memiliki dampak besar pada ketersediaan energi. Diet seimbang yang mencakup karbohidrat, lemak sehat, protein, vitamin, dan mineral penting untuk memastikan fungsi tubuh optimal.

4. **Gaya Hidup dan Aktivitas Fisik:**

Tingkat aktivitas fisik dan gaya hidup juga berperan dalam manajemen energi. Orang yang aktif secara fisik cenderung

memiliki kebutuhan energi yang lebih tinggi, sementara gaya hidup yang kurang aktif dapat menyebabkan kelebihan energi dan masalah kesehatan terkait.

5. Stres dan Kesejahteraan Emosional:

Kondisi stres dan kesejahteraan emosional dapat memengaruhi produksi hormon dan proses metabolisme, yang pada gilirannya dapat memengaruhi tingkat energi. Stres kronis dapat berkontribusi pada kelelahan dan ketidakseimbangan energi.

6. Kualitas dan Durasi Tidur:

Kualitas dan durasi tidur juga memainkan peran penting dalam manajemen energi. Kekurangan tidur dapat mengganggu regulasi hormon yang terlibat dalam metabolisme dan mengakibatkan peningkatan risiko masalah kesehatan terkait energi.

7. Penggunaan Teknologi Medis:

Proses diagnostik dan perawatan medis yang melibatkan penggunaan teknologi seperti MRI, CT scan, atau peralatan medis lainnya memerlukan energi yang signifikan. Faktor ini perlu dipertimbangkan dalam perencanaan perawatan dan manajemen energi pasien.

8. Keseimbangan Energi dan Berat Badan:

Keseimbangan energi, yaitu perbandingan antara asupan energi dan penggunaan energi, memainkan peran kunci dalam pengelolaan berat badan. Ketidakseimbangan dapat mengakibatkan penambahan atau penurunan berat badan yang dapat mempengaruhi kesehatan secara keseluruhan.

Memahami dan memperhatikan faktor-faktor ini menjadi penting dalam praktek klinis untuk merencanakan perawatan yang efektif, mengidentifikasi masalah kesehatan terkait energi, dan memandu pasien menuju gaya hidup yang mendukung keseimbangan energi dan kesehatan tubuh secara keseluruhan.

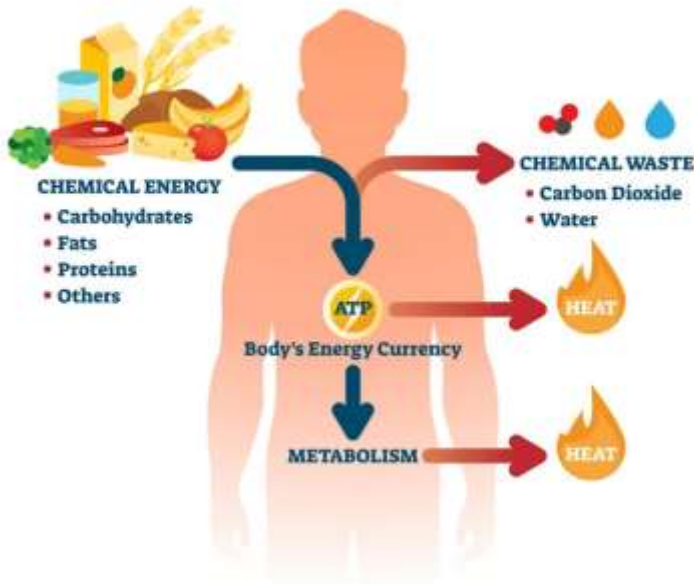
8.3 Jenis Energi dalam Bidang Kedokteran

Dalam bidang kedokteran, berbagai macam energi berperan dalam mendukung fungsi tubuh, proses diagnostik, dan perawatan medis. Berikut adalah beberapa macam energi yang relevan dalam konteks kedokteran (Langley & Evans (2019); Rhoades & Bell (2012), yaitu:

8.3.1 Energi Metabolisme

Energi metabolisme merujuk pada energi yang dihasilkan oleh sel-sel tubuh melalui proses metabolisme nutrisi seperti karbohidrat, lemak, dan protein (seperti pada Gambar 10.1). Adenosin trifosfat (ATP) adalah bentuk energi yang dihasilkan dan digunakan oleh sel-sel tubuh untuk mendukung berbagai fungsi biologis (Sepideh, 2019). Energi metabolisme merupakan reaksi yang terlibat dalam menghasilkan ATP dari nutrisi, termasuk respirasi aerob (dengan adanya oksigen), respirasi anaerob (fermentasi), serta metabolisme asam lemak dan asam amino. Di bawah kondisi normoksik, sel-sel normal menggunakan respirasi aerob untuk mengoksidasi glukosa melalui fosforilasi oksidatif mitokondria. Sebaliknya, sel kanker lebih suka menggumpalkan glukosa menjadi laktat bahkan dengan adanya oksigen (efek Warburg) dan menunjukkan perubahan dalam metabolisme lipid dan asam amino.

METABOLISM



Gambar 8.1. Energi yang dihasilkan oleh sel-sel tubuh
(Sumber: <https://depositphotos.com/>)

8.3.2 Energi Elektrokimia

Sistem saraf tubuh mengandalkan energi elektrokimia untuk transmisi sinyal antar sel saraf. Potensial aksi, perubahan cepat dalam muatan listrik di sepanjang membran sel saraf, memainkan peran kunci dalam proses ini. Dalam struktur sel manusia, ion kalium memiliki muatan negatif, sedangkan di luar sel, ion natrium memiliki muatan positif. Membran sel membatasi pergerakan ion kalium dan natrium. Ketika tubuh sedang dalam keadaan istirahat, tubuh bersifat negatif karena jumlah ion kalium yang lebih banyak daripada ion natrium, yang menghasilkan potensial membran sekitar -70 milivolt.

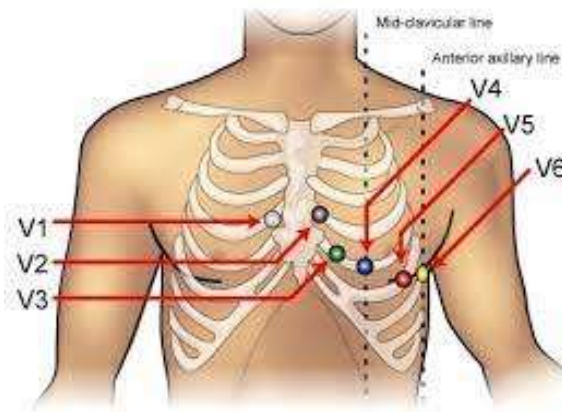
8.3.3 Energi Listrik dalam Kardiovaskular

Aktivitas jantung menghasilkan energi listrik yang dapat diukur melalui elektrokardiografi (ECG). ECG digunakan untuk mendiagnosis gangguan irama jantung dan menyediakan informasi tentang kesehatan jantung secara umum. Elektrokardiografi (ECG atau EKG) adalah teknik untuk merekam dan mengevaluasi aktivitas listrik jantung. Ini adalah alat diagnostik yang umum digunakan dalam dunia medis untuk memantau kesehatan jantung dan mendeteksi gangguan irama jantung. ECG adalah alat penting dalam dunia medis dan memberikan informasi yang berharga untuk diagnosis dan pemantauan penyakit jantung. Interpretasi hasil ECG biasanya dilakukan oleh dokter atau tenaga kesehatan yang berpengalaman. Cara Pengukuran ECG, yaitu:

1. Pemasangan Elektroda:
 - a. Pasien biasanya ditempatkan dalam posisi berbaring atau duduk yang nyaman.
 - b. Elektroda dilekatkan pada kulit pasien di beberapa titik tertentu, biasanya pada dada, kaki, dan tangan. Elektroda tersebut berfungsi sebagai penerima sinyal listrik dari jantung.
2. Perekaman Sinyal:
 - a. Elektroda mengukur perubahan listrik yang terjadi dalam jantung selama satu siklus detak jantung.
 - b. Sinyal ini dicatat dalam bentuk gelombang pada grafik ECG.
3. Durasi Pengukuran:

Proses pengukuran ECG biasanya berlangsung selama beberapa detik hingga beberapa menit, tergantung pada keperluan dokter atau jenis pemantauan yang dilakukan.

Berikut adalah cara umum pengukuran ECG (Gambar 8.2) dan pemanfaatannya dapat digunakan untuk mengidentifikasi aritmia, infark miokard, gangguan konduksi, dan kondisi kardiovaskular lainnya.



Gambar 8.2. Pengukuran ECG

Sumber: <https://sentralalkes.com/blog/pengertian-ekg/>

8.3.4 Energi Pada Proses Diagnostik

Pemindaian gambar medis seperti MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) dan CT scan (*Computed Tomography*) menggunakan energi elektromagnetik untuk menghasilkan gambar tubuh internal. Radiasi ionisasi dalam sinar-X juga merupakan bentuk energi yang digunakan dalam diagnostik radiologi (Stoller, 2018). Alat MRI dan CT Scan adalah dua teknik pencitraan medis yang berbeda namun sangat berguna dalam diagnosis dan penilaian kondisi medis. MRI digunakan untuk mendapatkan gambaran detail struktur internal tubuh manusia, terutama jaringan lunak seperti otak, otot, organ dalam perut, sendi, dan pembuluh darah. Sedangkan CT Scan digunakan untuk membuat gambar potongan melintang dari tubuh manusia, memberikan visualisasi yang baik untuk tulang, organ dalam, dan jaringan lunak. Berikut adalah prinsip kerja masing-masing:

1. Prinsip Kerja MRI:

- a. Penggunaan medan magnet yang kuat untuk mengarahkan proton hidrogen dalam tubuh pasien.
- b. Resonansi magnetik: Saat tubuh terpapar medan magnet, proton hidrogen di dalam tubuh akan mengalami resonansi magnetik.

- c. Sinyal radiofrekuensi dipancarkan ke tubuh, yang kemudian merangsang proton hidrogen untuk berpindah dari keadaan energi rendah ke keadaan energi tinggi.
 - d. Pemulihan dan deteksi sinyal, setelah pemutusan sinyal radiofrekuensi, proton hidrogen kembali ke keadaan awal dan memancarkan energi yang terdeteksi oleh antena.
 - e. Pencitraan 3D, Informasi ini digunakan untuk membuat gambar 2D atau 3D dari struktur internal tubuh, memberikan kontras yang baik antara berbagai jenis jaringan.
2. Prinsip Kerja CT Scan:
- a. Penggunaan Sinar-X: CT Scan menggunakan sinar-X untuk membuat serangkaian gambar melintang (tomografi) dari tubuh.
 - b. Rotasi Tabung Sinar-X dan Detektor, berputar sekitar pasien, mengambil gambar dari berbagai sudut
 - c. Pemrosesan Komputer, komputer memproses data dari serangkaian gambar dan menggabungkannya untuk membuat gambar potongan melintang atau gambar tiga dimensi dari organ atau struktur tubuh tertentu.
 - d. Kontras, Untuk meningkatkan kontras, agen kontras yang dapat diterima oleh sinar-X dapat diberikan kepada pasien melalui injeksi vena.
3. Perbandingan Singkat:
- a. Resolusi Gambar, MRI memberikan resolusi gambar yang tinggi dan detail anatomi yang baik, terutama untuk jaringan lunak. Sedangkan CT Scan lebih baik untuk gambar tulang dan struktur keras, namun resolusi untuk jaringan lunak mungkin tidak sebaik MRI.
 - b. Radiasi: MRI tidak menggunakan sinar-X dan tidak melibatkan paparan radiasi ionisasi. Sedangkan CT Scan menggunakan sinar-X, sehingga melibatkan paparan radiasi ionisasi. Meskipun dosis radiasi CT Scan saat ini telah dikurangi, masih ada paparan radiasi.
 - c. Kecepatan Pencitraan: CT Scan memberikan gambar dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan MRI.

Keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan tergantung pada kebutuhan spesifik diagnosa medis. Pemilihan antara MRI dan CT Scan biasanya bergantung pada kondisi klinis pasien dan informasi yang diinginkan oleh dokter. Berikut ditunjukkan cara pengukuran MRI dan CT Scan seperti pada Gambar 8.3, yaitu:



Gambar 8.3. Pengukuran MRI dan CT scan

Sumber: http://rsudbangil.pasuruankab.go.id/public_html/ct-scan-dan-usg/index.html

8.3.5 Energi Laser

Energi laser digunakan dalam berbagai prosedur medis, termasuk bedah laser, terapi cahaya, dan pengobatan kulit. Energi laser dapat diarahkan secara presisi untuk memotong, mengkoagulasi, atau merangsang jaringan tubuh. Laser ialah salah satu perangkat yang memiliki kemampuan memancarkan cahaya. Terdapat berbagai perangkat lain yang juga mampu memancarkan cahaya, seperti lampu pijar, sinar matahari, senter, dan berbagai sumber cahaya lainnya. Dengan perkembangan zaman, saat ini perangkat elektronik telah luas digunakan di berbagai industri dan perusahaan. Secara umum, laser merupakan cahaya yang diperkuat dan kemudian dirangsang untuk menghasilkan radiasi. Di bidang medis, laser digunakan untuk berbagai prosedur bedah, pengobatan kulit, serta pemindaian dan terapi diagnostik (seperti pada Gambar 8.2). Dengan kata lain, laser merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah gelombang elektromagnetik menjadi cahaya, sehingga mampu mendukung pelaksanaan tugas-tugas tertentu.



Gambar 8.4. Pemanfaatan energi laser

Sumber : <https://www.alodokter.com/pemanfaatan-sinar-laser-dalam-dunia-medis>

8.3.6 Energi Ultrasonik

Energi ultrasonik digunakan dalam teknologi ultrasonografi untuk menghasilkan gambar organ internal dengan menggunakan gelombang suara ultrasonik. Ini umumnya digunakan untuk pemeriksaan kehamilan dan penilaian organ seperti hati dan ginjal.

8.3.7 Energi Termal

Penggunaan energi termal, seperti dalam terapi panas atau terapi frekuensi radio, dapat membantu dalam meredakan nyeri, mengurangi peradangan, dan mempercepat proses penyembuhan pada kondisi tertentu.

8.3.8 Energi Nuklir

Energi nuklir digunakan dalam teknik medis seperti *positron emission tomography* (PET) scan, yang melibatkan deteksi radiotracer yang mengeluarkan positron untuk membentuk gambar aktivitas seluler di dalam tubuh.

8.3.9 Energi Mekanik

Pada beberapa prosedur bedah, energi mekanik dapat digunakan untuk memotong atau menghancurkan jaringan. Contoh termasuk pisau bedah, ultrasonik, dan perangkat bedah laser.

8.3.10 Energi Biokimia

Energi biokimia terlibat dalam proses seperti transduksi sinyal seluler dan sintesis biomolekul. Pemahaman mengenai energi dalam reaksi kimia biologis membantu dalam pengembangan obat dan terapi yang lebih efektif.

8.3.11 Energi Magnetik

Energi magnetik dapat digunakan dalam teknologi medis seperti resonansi magnetik nuklir (Nuclear Magnetic Resonance - NMR) untuk mendapatkan gambaran detail struktur molekuler.

8.3.11 Energi Gravitasi

Walaupun dampaknya mungkin tidak langsung terasa dalam konteks medis modern, energi gravitasi masih memegang peranan dalam mempertahankan postur tubuh dan berbagai fungsi fisiologis yang terkait dengan gaya gravitasi bumi.

8.3.12 Energi Cahaya (Selain dalam tTerapi Cahaya)

Energi cahaya dapat digunakan dalam prosedur medis seperti terapi cahaya (*light therapy*) untuk mengatasi masalah kesehatan mental atau penyakit kulit tertentu.

8.3.13 Energi Sonik (Suara)

Energi sonik atau suara dapat digunakan dalam teknologi medis seperti sonografi atau USG (*Ultrasonography*) untuk menghasilkan gambar organ internal menggunakan gelombang suara ultrasonik.

DAFTAR PUSTAKA

- Giancoli, Douglas. 2014. *Fisika Dasar 1 Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Pujotomo Isworo. 2016. Potensi Listrik dalam Tubuh Manusia. *Jurnal Ilmiah Energi & Kelistrikan*. 8(1). 20-25.
- Rhoades, R. A. dan Bell, D. R. . 2012. *Medical Physiology: Principles for Clinical Medicine*. Lippincott Williams & Wilkins
- Salway, J. G. 2017. *Metabolism at a Glance*. United Kingdom: Wiley-Blackwell
- Sepideh Aminzadeh-Gohari, René Günther Feichtinger and Barbara Kofler. 2019. *Energy Metabolism and Metabolic Targeting of Neuroblastoma (Chapter 7)* dalam Book: *Neuroblastoma: Molecular Mechanisms and Therapeutic Interventions*. Department of Pathology, Microbiology, and Immunology, University of South Carolina School of Medicine, Columbia, SC, United States. ISBN: 978-0-12-812005-7. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02578-0>
- Langley, S., & Evans. 2019. *Nutrition, Health and Disease: A Lifespan Approach*. Wiley
- Sciencelearn.org.nz. Energy Requirements of the Body. <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1835-energy-requirements-of-the-body> (Diakses 15 Januae 2024)
- Stoller, David W., 2018. *Magnetic Resonance Imaging in Orthopaedics and Sports Medicine*. Lippincott Williams & Wilkins

BAB 9

FISIKA DALAM DIAGNOSTIK

LABORATORIUM

Oleh Sitti Nurrahmi

9.1 Pendahuluan

Pemeriksaan penunjang atau pemeriksaan diagnostik merupakan pemeriksaan yang dilakukan oleh seorang dokter dalam mendiagnosis penyakit pasien serta tingkat keparahannya. Pemeriksaan diagnostik biasanya dilakukan saat pasien mengunjungi dokter karena adanya keluhan atau gejala, maupun saat pemeriksaan kesehatan rutin pasien. Selain untuk mendiagnosis penyakit, pemeriksaan diagnostik juga dilakukan untuk menentukan tahapan pengobatan yang tepat dan memantau keberhasilan pengobatan pada pasien. Pemeriksaan diagnostik ini biasanya dilakukan di laboratorium (Provan, 2018).

Penerapan konsep fisika dalam diagnostik laboratorium membuka pintu untuk pemahaman yang lebih mendalam tentang fungsi tubuh dan penyakit. Dengan memahami prinsip fisika di balik teknologi diagnostik, kita dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi prosedur laboratorium, merancang strategi pengobatan yang lebih tepat, dan pada akhirnya meningkatkan kualitas hidup pasien (Provan, 2018).

9.2 Fisika dalam Diagnostik Laboratorium

Laboratorium diagnostik memainkan peran penting dalam dunia medis, menyediakan informasi berharga untuk deteksi penyakit dan perencanaan pengobatan. Teknologi diagnostik canggih ini didasarkan atas prinsip fisika pada berbagai metode dan alat. Alat yang sering digunakan dalam diagnostic laboratorium antara lain :

9.2.1 Pemeriksaan Darah

Tes darah merupakan bagian penting dalam dunia medis, membantu dokter mendiagnosis, memantau, dan mengobati berbagai kondisi kesehatan. Beberapa tes darah mengukur berbagai parameter darah berdasarkan prinsip fisika. Di bawah ini adalah beberapa tes darah umum berdasarkan prinsip fisika (Khandpur, 2003).

1. Hematologi

- a. Menghitung Sel Darah Merah (RBC) dan Sel Darah Putih (WBC). Dalam hematologi, penghitungan sel darah merah dan sel darah putih sering dilakukan menggunakan perangkat berdasarkan prinsip fisik hambatan listrik atau optik. Sel darah merah dan sel darah putih dapat dihitung berdasarkan perubahan ketahanannya terhadap listrik atau cahaya saat melewati sampel darah.
- b. Kadar Hemoglobin. Tes hemoglobin mengukur kemampuan darah dalam menyerap dan melepaskan oksigen. Alat uji seperti spektrofotometer menggunakan prinsip spektroskopi dalam fisika untuk mengukur kadar hemoglobin dalam sampel darah.

2. Kimia darah

- a. Kadar Gula Darah. Pengukuran kadar gula darah dilakukan dengan menggunakan metode enzimatis atau elektrokimia. Beberapa perangkat menggunakan prinsip fisika elektrokimia untuk mengukur arus listrik yang dihasilkan dari reaksi enzimatis antara glukosa dan enzim.
 - b. Profil Lipid. Studi tentang lipid seperti kolesterol, trigliserida, dan lipoprotein juga dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip fisika fotometri. Reaksi kimia diukur dengan mengukur perubahan penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu.
3. Koagulasi darah. Tes ini mengukur waktu yang diperlukan darah untuk membeku. Prinsip fisika pada koagulasi atau pembekuan darah ini dapat diukur menggunakan metode

- elektrokimia atau optik yang memantau perubahan sampel darah selama proses pembekuan.
4. Elektroforesis. Tes elektroforesis hemoglobin memisahkan berbagai jenis hemoglobin dalam sampel darah berdasarkan muatan listriknya. Prinsip fisika elektroforesis digunakan untuk memindahkan hemoglobin melalui media gel menggunakan medan listrik.
 5. Gas darah. Tes gas darah yang mengukur kadar oksigen dan karbon dioksida dalam darah sering kali dilakukan dengan menggunakan metode elektrokimia atau spektrofotometri. Prinsip fisika ini memungkinkan pengukuran konsentrasi gas dalam sampel darah.

9.2.2 Pemeriksaan Urine

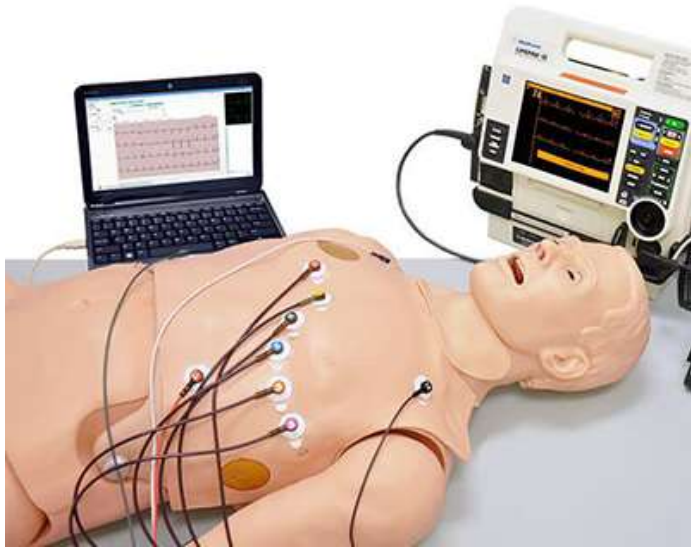
Urinalisis adalah metode diagnostik yang umum digunakan untuk menilai kesehatan manusia. Beberapa tes urin dilakukan dengan menggunakan prinsip fisika untuk mengukur dan memahami komposisi dan keadaan fisika sampel urin. Di bawah ini beberapa tes urin yang mempertimbangkan prinsip fisika (Maharani, 2017).

1. Berat jenis urin. Berat jenis urin mencerminkan konsentrasi zat dalam urin. Refraktometer atau densitometer digunakan untuk mengukur refraksi atau kepadatan sampel urin. Alat ini menggunakan prinsip fisika pembiasan cahaya untuk menghitung berat jenis, yang memberikan informasi tentang asupan air tubuh Anda dan fungsi ginjal.
2. pH urin. Nilai pH urin mengukur derajat keasaman atau kebasaan. Pengukur pH atau strip pH menggunakan prinsip fisika elektrokimia untuk mengukur konsentrasi ion hidrogen dalam urin. Pengukuran ini memberikan informasi tentang keseimbangan asam basa dalam tubuh.
3. Glukosa Urine. Pengujian glukosa dalam urin biasanya menggunakan metode tes strip reaktif yang bergantung pada reaksi kimia antara glukosa dan senyawa spesifik pada strip. Prinsip fisika perubahan warna strip indikator menunjukkan adanya glukosa dalam urin.

4. Pengujian protein dalam urin. Pengujian protein dalam urin dapat dilakukan dengan menggunakan strip uji reaktif yang mengandung senyawa khusus. Ketika ada protein dalam urin, reaksi kimia pada strip menyebabkan perubahan warna. Prinsip fisik perubahan warna digunakan untuk mendeteksi keberadaan protein yang mungkin merupakan tanda adanya masalah ginjal atau infeksi.
5. Pengujian nitrit dan sel darah putih dalam urin. Pengujian nitrit dan sel darah putih dalam urin dapat dilakukan dengan menggunakan strip tes reaktif. Kehadiran bakteri dalam urin menghasilkan nitrit sebagai produk sampingan. Sel darah putih muncul pada strip melalui reaksi kimia dengan suatu senyawa. Mendeteksi nitrit dan sel darah putih menggunakan prinsip fisika perubahan warna.
6. Tes Bilirubin dan Urobilinogen. Tes ini melibatkan strip tes reaktif yang berubah warna ketika terjadi reaksi kimia antara bilirubin dan urobilinogen. Prinsip fisika perubahan warna dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan pigmen tersebut dan memberikan petunjuk tentang kesehatan hati dan sistem hepatobilier.

9.2.3 Elektrokardiogram (EKG)

Elektrokardiogram (EKG) adalah tes medis yang mencatat aktivitas listrik jantung. Tes ini cocok untuk mendeteksi aritmia, penyakit arteri koroner, dan kondisi jantung lainnya. Jantung adalah organ berotot yang mengandung sel otot khusus yang dapat menghasilkan dan mengirimkan sinyal listrik. Ketika jantung berkontraksi, impuls listrik yang dihasilkan oleh nodus sinoatrial (SA) merambat melalui jaringan konduktif di dalam jantung. Prinsip fisika konduktivitas listrik digunakan untuk mencatat perjalanan sinyal melalui permukaan tubuh. Akan tetapi, sinyal listrik yang dihasilkan oleh jantung sangat kecil sehingga harus diperkuat sebelum dapat direkam. Prinsip fisika amplifikasi memperbesar sinyal listrik, memungkinkan profesional kesehatan mengamati dan menganalisisnya dengan jelas (Laksono, 2021).



Gambar 9.1. Elektrokardiogram
(Sumber : Klinik Respirasi Malang, 2017)

EKG dilakukan menggunakan mesin pendeteksi impuls listrik jantung yang disebut elektrokardiograf. Dengan alat tersebut, impuls atau aktivitas listrik jantung akan terpantau dan tampak berupa grafik yang ditampilkan di layar monitor. EKG didasarkan pada prinsip fisika yang berkaitan dengan aktivitas listrik dan konduktivitas. Prinsip kerja EKG menggunakan elektroda yang ditempelkan pada permukaan kulit untuk mencatat potensi listrik yang dihasilkan jantung. Potensi ini mencerminkan depolarisasi dan repolarisasi sel jantung. Elektroda menerima sinyal listrik dan mengirimkannya ke mesin EKG untuk direkam dan diinterpretasikan (Khandpur, 2003).

9.2.4 Radiografi Sinar-X

Pencitraan radiografi sinar-X atau foto Rontgen adalah prosedur diagnostik yang menggunakan sinar-X untuk membuat gambar struktur internal tubuh manusia. Prinsip fisika yang mendasari teknologi ini melibatkan interaksi sinar X dengan zat di dalam tubuh, menghasilkan gambar pada film atau detektor digital (Ananthi, 2005).



Gambar 9.2. Foto Rontgen yang diambil oleh Rontgen
(Sumber :Wikipedia, 2023)

1. Pembangkit sinar-X. Sinar-X dihasilkan dengan memberikan energi tinggi pada elektron dalam tabung sinar-X. Elektron dipercepat melalui elektroda menuju target logam (biasanya tungsten), dan ketika elektron bertabrakan dengan atom target, mereka menghasilkan cahaya sinar-X. Energi kinetik elektron diubah menjadi sinar-X frekuensi tinggi.
2. Penyerapan Sinar-X. Ketika sinar-X masuk ke dalam tubuh, sebagian besar energinya diserap oleh berbagai jaringan dan organ. Jaringan padat, seperti tulang atau logam, menyerap lebih banyak sinar-X dan menciptakan bayangan pada film atau detektor.
3. Deteksi dan Perekaman. Film sinar-X konvensional atau detektor digital digunakan untuk merekam gambar yang dihasilkan oleh sinar-X yang melewati tubuh manusia. Alat ini menggunakan prinsip fisika yang memvariasikan sensitivitas film atau detektor terhadap radiasi pengion

- untuk merekam intensitas cahaya yang mencerminkan jumlah sinar-X yang diserap oleh jaringan.
4. Kontras dan Pencahayaan. Untuk memperoleh gambar yang lebih tajam, diperlukan kontras yang baik antara berbagai jenis jaringan dan organ. Prinsip fisika interaksi sinar-X dengan berbagai jenis zat digunakan untuk mencapai kontras optimal, yang dapat berguna dalam mendiagnosis kondisi kesehatan tertentu.
 5. Proteksi Radiasi. Proteksi radiasi melibatkan penggunaan peralatan dan teknik pelindung yang dirancang untuk mengurangi paparan pasien dan petugas kesehatan terhadap radiasi pengion. Prinsip fisika pengurangan dosis radiasi mencakup pemilihan teknik pemindaian yang sesuai dan pengaturan parameter sinar-X.
 6. Radiografi Digital dan Bantuan Komputer. Radiografi digital menggunakan detektor digital untuk mengambil gambar sinar-X. Teknologi ini menggunakan prinsip fisika untuk mengubah energi sinar-X menjadi sinyal digital. Pemrosesan gambar dengan bantuan komputer memungkinkan pemrosesan dan penyimpanan yang lebih efisien.

9.2.5 Ultrasonografi (USG)

Ultrasonografi (USG) diagnostik diterapkan untuk mendapatkan gambar dari hampir seluruh rentang internal organ dalam perut termasuk ginjal, hati, limpa, pankreas, kandung kemih, darah dan pembuluh darah, serta janin selama kehamilan. Ultrasonografi juga telah digunakan untuk menyajikan gambar kelenjar tiroid, mata, payudara dan berbagai struktur permukaan lainnya. Dalam sejumlah kasus yang bermakna secara medis, diagnostik ultrasonik telah memungkinkan pendeteksian kista, tumor atau kanker pada organ-organ ini (Khandpur, 2003).

Prinsip fisika yang mendasari USG meliputi fenomena gelombang suara dan refleksi gelombang. Berikut beberapa prinsip fisis yang terdapat dalam USG:

1. Gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik adalah jenis bunyi yang mempunyai frekuensi di atas batas pendengaran

manusia, atau diatas 20 kHz. Gelombang ini dihasilkan oleh transduser ultrasonik yang menghasilkan getaran pada frekuensi tertentu. Gelombang ultrasonik ini digunakan untuk membuat gambar organ di dalam tubuh.

2. Pemantulan gelombang. Ketika gelombang ultrasonik bertemu dengan batas antara dua media berbeda, misalnya antara jaringan tubuh, sebagian gelombang dipantulkan kembali ke transduser. Prinsip fisik refleksi gelombang ini memungkinkan kita membuat gambar organ dan struktur di dalam tubuh.
3. Frekuensi dan Resolusi. Frekuensi gelombang ultrasonik mempengaruhi resolusi gambar. Frekuensi radio menawarkan resolusi tinggi tetapi transparansinya kurang. Sebaliknya, frekuensi yang lebih rendah menembus lebih dalam namun memiliki resolusi yang lebih rendah. Prinsip fisik ini diperhitungkan ketika memilih frekuensi untuk tujuan tertentu.
4. Pemrosesan Sinyal. Sinyal ultrasonik yang dipantulkan diubah menjadi sinyal listrik oleh transduser dan diproses oleh perangkat elektronik untuk menghasilkan gambar yang dapat ditampilkan di layar. Ini menggunakan prinsip fisika pemrosesan sinyal untuk meningkatkan kualitas dan kejelasan gambar.
5. Doppler ultrasonografi. Doppler ultrasonografi menggunakan perubahan frekuensi gelombang suara yang dipantulkan dari benda bergerak, misalnya darah pada pembuluh darah. Prinsip fisika efek Doppler digunakan untuk mengukur kecepatan aliran darah dan mendeteksi perubahan warna pada gambar, memberikan informasi tentang arah dan kecepatan aliran darah.

9.2.6 Computed Tomography Scan (CT Scan)

Computed Tomography Scan (CT Scan), adalah teknik pencitraan medis yang menggunakan sinar-X dan teknologi komputer untuk membuat gambar tiga dimensi penampang bagian dalam tubuh manusia. Prinsip fisika yang mendasari CT scan mencakup produksi sinar-X, mendeteksi pantulan sinar-X, dan

memproses data untuk membuat gambar detail struktur internal tubuh (Sari, 2022)

1. Pencitraan dengan sinar X. Sinar-X dipancarkan dari sumber di sekitar pasien dan melewati tubuh. Jaringan dan organ dalam tubuh menyerap sinar-X secara berbeda, menciptakan kontras yang memungkinkan visualisasi gambar lebih baik.
2. Rotasi dan pemindaian berbasis silinder. Sumber dan detektor sinar-X disusun dalam konfigurasi silinder dan berputar mengelilingi pasien. Setiap rotasi menghasilkan serangkaian sinar-X yang menembus tubuh Anda dari berbagai sudut. Alat ini menggunakan prinsip fisika rotasi dan pemindaian berbasis silinder untuk mendapatkan sekumpulan data yang mencakup seluruh rentang area observasi.
3. Deteksi dan Pengukuran Intensitas Sinar-X. Detektor mendeteksi intensitas sinar-X yang melewati dan mencapai tubuh. Pengukuran intensitas sinar-X dengan detektor ini memberikan informasi sejauh mana sinar-X diserap oleh berbagai jenis jaringan dalam tubuh. Prinsip fisika ini digunakan untuk mengukur kepadatan dan komposisi jaringan.
4. Tomografi Terkomputasi dan Rekonstruksi Gambar. Data intensitas sinar-X yang diukur dari sudut berbeda digunakan untuk rekonstruksi gambar tiga dimensi pada bagian tubuh. Prinsip fisika tomografi komputer menggunakan teknik pemrosesan data matematis dan algoritma rekonstruksi untuk menghasilkan gambar irisan yang detail dan akurat.
5. Proteksi Radiasi. Proteksi radiasi pada saat CT scan itu penting. Meskipun sinar-X memberikan informasi yang berharga, penggunaannya harus dipantau dan dikendalikan untuk meminimalkan paparan radiasi pada pasien. Dasar fisika proteksi radiasi mencakup pemilihan teknologi pemindaian dan pengaturan parameter yang sesuai.

9.2.7 Magnetic Resonance Imaging (MRI)

Magnetic Resonance Imaging (MRI) adalah teknik pencitraan medis yang menggunakan medan magnet dan gelombang radio untuk menghasilkan gambar struktur dan fungsi tubuh manusia yang sangat detail. MRI memberikan gambar organ dan struktur tubuh yang sangat detail tanpa menggunakan sinar-X atau radiasi pengion, menjadikannya pilihan diagnostik yang aman.



Gambar 9.3. Magnetic Resonance Imaging
(Sumber : Rumah Sakit Krakatau Medika, 2023)

Penerapan prinsip-prinsip fisika pada MRI terus berkembang untuk meningkatkan resolusi gambar dan memberikan informasi lebih rinci tentang kondisi kesehatan. Prinsip fisika yang mendasari MRI melibatkan interaksi antara inti atom di dalam tubuh dan medan magnet eksternal serta pengukuran sinyal radio yang dihasilkan.

1. Resonansi Magnetik Nuklir. Atom hidrogen terdapat di dalam tubuh, dan intinya dapat memancarkan sinyal resonansi magnetik yang sangat kuat, itulah sebabnya atom hidrogen sering digunakan dalam MRI. Ketika inti hidrogen

- terkena medan magnet luar, ia mengalami presesi, atau gerakan giroskopik, terhadap sumbu medan magnet.
2. Pembangkit Sinyal Frekuensi Radio. Frekuensi radio digunakan untuk "mengguncang" inti atom hidrogen yang diposisikan oleh medan magnet luar. Dalam prinsip fisika ini, inti hidrogen diberi energi oleh pulsa frekuensi radio dan dipaksa keluar dari keadaan awalnya.
 3. Relaksasi dan Pemulihan. Ketika inti hidrogen dipengaruhi oleh pulsa frekuensi radio, ia kembali ke keadaan semula dalam proses yang disebut relaksasi. Proses ini menciptakan sinyal yang terukur. Ada dua jenis relaksasi, T1 (longitudinal) dan T2 (lateral), yang memberikan informasi tentang sifat jaringan dan kontras pada gambar.
 4. Pengukuran dan Rekonstruksi Sinyal. Sinyal yang dihasilkan inti hidrogen dicatat dan diukur oleh detektor untuk memperoleh informasi tentang sifat jaringan. Proses pengolahan dan rekonstruksi data didasarkan pada prinsip fisika transformasi Fourier, yang memungkinkan data spasial diubah menjadi gambar visual.
 5. Kontras. Kontras pada gambar MRI dapat ditingkatkan dengan menggunakan zat kontras gadolinium atau zat lain yang mempengaruhi sinyal resonansi magnetik. Prinsip fisika perbedaan sinyal antara jaringan kontras dan non-kontras membantu meningkatkan visibilitas.
 6. Pengaturan dan Gradien Magnetik. Pengaturan medan magnet menggunakan gradien magnet membantu menciptakan ruang tiga dimensi di dalam tubuh, sehingga gambar dapat diambil dari berbagai sudut. Prinsip fisika ini melibatkan perubahan medan magnet tergantung pada posisi dalam ruang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ananthi, S. 2005. *A Text Book of Medical Instruments*. New Delhi : New Age International (P) Limited, Publishers.
- Khandpur, R. S. 2003. *Handbook of Biomedical Instrumentation*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Klinik Respirasi Malang. 2017. <https://klinikrespirasimalang.com/layanan/35-ekg-/elektrokardiogram>. Diakses 15 Januari 2024.
- Laksono, S. 2021. Interpretasi EKG Normal Praktis Bagi Pemula: Suatu Tinjauan Mini. *Jurnal Kedokteran : Media Informasi Ilmu Kedokteran dan Kesehatan Vol 7 (1)*. <http://dx.doi.org/10.36679/kedokteran.v7i1.408>
- Maharani, D. M. S., Inayati, N., dan Wiwin, M. 2017. Jenis dan Jumlah Sedimen Urine Menggunakan Variasi Konsentrasi Pengawet Formalin. *Quality : Jurnal Kesehatan Vol 11 (2)*. <https://ejournal.poltekkesjakarta1.ac.id/index.php/adm/article/download/74/34>
- Provan, D. 2018. *Oxford Handbook of Clinical and Laboratory Investigation*. London : Oxford University Press.
- Rumah Sakit Krakatau Medika. 2023. <https://krakataumedika.com/layanan-kami/penunjang-medik/mri-magnetic-resonance-imaging>. Diakses 15 Januari 2024.
- Sari, N. L. K., Prataminingsih, dan Santoso, B. 2022. Evaluasi Indeks Massa Tubuh untuk Penentuan Size-Specific Dose Estimate CT Scan Abdomen. *Jurnal Fisika Vol 12 (2) (2022) 76-82*. <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jf/index>
- Suhardi, S., Setiabudi, W., dan Anam, C. Upaya Peningkatan Kualitas Citra MRI Dengan Pemberian Media Kontras. *BERKALA FISIKA*, vol. 16 (1), pp. 9-14, Jan. 2013.
- Wikipedia. 2023. <https://id.wikipedia.org/wiki/Sinar-X>. Diakses 14 Januari 2024.

BAB 10

BIOFISIKA DAN ILMU PENGETAHUAN TENTANG MATERIAL KEDOKTERAN

Oleh Sefrilita Risqi Adikaning Rani

10.1 Pendahuluan

Biofisika adalah ilmu interdisipliner yang berkembang pesat yang menerapkan teori dan metode ilmu fisika pada masalah biologi. Ini mencakup banyak disiplin ilmu, seperti fisika, kimia, matematika, biologi, biokimia, kedokteran, farmakologi, fisiologi, dan ilmu saraf, dan penting bagi para ilmuwan yang bekerja di bidang ini untuk memahami penelitian satu sama lain.

Selain itu, biofisika juga memainkan peran penting dalam bidang teknik biomedis, yang melibatkan penerapan prinsip-prinsip teknik untuk mengatasi masalah biomedis. Biofisika memberikan pemahaman mendasar tentang sifat fisik dan mekanik material biologis, seperti jaringan dan sel, yang sangat penting untuk merancang perangkat medis dan mengembangkan terapi baru. Sebagai contoh, biofisika telah digunakan untuk mengembangkan katup jantung buatan, alat pacu jantung implan, sistem penghantaran obat, untuk perawatan patah tulang dan lain lain. Singkatnya, biofisika adalah disiplin ilmu yang sangat penting dalam bidang teknik biomedis karena memberikan wawasan tentang sifat fisik dan mekanik bahan biologis yang penting untuk mengembangkan teknologi medis baru.

Banyak jenis material memiliki berbagai manfaat, tetapi biomaterial menonjol karena mampu berinteraksi dengan jaringan tubuh manusia. Bidang yang menarik ini telah berkembang pesat selama lima puluh tahun terakhir dan mencakup aspek kedokteran. Pada bab ini akan memperkenalkan berbagai material khusus yang berbasis biomaterial

10.2 Biomaterial

Biomaterial alami adalah bahan yang diekstrak dari organisme hidup atau produk sampingannya. Bahan-bahan ini memiliki banyak keunggulan, seperti tidak beracun, biokompatibilitas, dan biodegradabilitas, penggunaan biomaterial alami terus meningkat karena tingginya permintaan untuk aplikasi medis. Bahan-bahan ini, termasuk kolagen, kitosan, dan alginat, telah berhasil digunakan sebagai hidrogel, perancah, matriks, dan implan dalam rekayasa jaringan, manajemen luka, pengiriman obat, dan teknologi nano. Karena bahan-bahan tersebut memiliki sifat biokompatibel dan biodegradable.

Penggunaan biomaterial alami dapat menyebabkan untuk penghematan biaya dalam perawatan kesehatan karena mereka dapat diserap dengan aman oleh tubuh tanpa operasi tambahan. Namun, biodegradabilitas juga merupakan kelemahan dari bahan alami karena mungkin tidak tahan lama seperti bahan sintetis tradisional dan dapat dengan mudah rusak dari keausan karena interaksi intensif dengan tubuh. Terlepas dari keterbatasan ini, biokompatibilitas dan non-toksisitas biomaterial alami dapat mengatasi kelemahan biodegradabilitasnya dalam banyak aplikasi medis. Oleh karena itu, diperlukan lebih banyak penelitian untuk menyelidiki efek pengobatan biomaterial dan untuk mengembangkan metode untuk mengontrol tingkat degradasi bahan-bahan ini (Wang, 2023).

10.2.1 Collagen

Polimer berbasis kolagen sering kali diproduksi dari kulit atau tendon kuda, babi, atau sapi, di mana struktur kolagen mikrofibrilar tipe 1 dipanen untuk membentuk matriks untuk jerat atau bulu kolagen. Bulu-bulu kolagen ini mampu mengikat dan melepaskan obat, dan kemampuan ini dapat dimodifikasi dengan mengubah sifat-sifatnya seperti porositas dan persiapan kimiawi. Pelepasan antibiotik dari kolagen terjadi dalam tiga tahap, yaitu, pelepasan cepat karena porositas bulu kolagen, pelepasan menengah karena pembukaan pori-pori tertutup pada bulu kolagen, dan pelepasan yang berkepanjangan setelah pelepasan dari struktur kolagen selama resorpsi bulu kolagen.

Kolagen, protein yang secara alami ditemukan dalam tubuh kita, berkurang seiring bertambahnya usia yang menyebabkan tanda-tanda penuaan seperti keriput, garis-garis halus, dan hilangnya elastisitas pada kulit. Suplemen kolagen telah mendapatkan popularitas karena dapat meningkatkan kadar kolagen dalam tubuh, baik melalui penggunaan oral maupun topikal. Manfaat kolagen termasuk meningkatkan kesehatan kulit dengan mengurangi garis-garis halus dan kerutan, meningkatkan penampilan yang lebih muda, dan memperbaiki tekstur kulit. Kolagen juga meningkatkan kesehatan sendi dengan memberikan struktur dan dukungan pada tulang rawan, mengurangi nyeri sendi dan kekakuan pada penderita osteoarthritis. Kolagen mendukung kesehatan tulang dengan meningkatkan kepadatan mineral tulang dan mengurangi risiko patah tulang pada wanita pascamenopause. Kolagen juga dapat meningkatkan kesehatan usus dengan mengurangi peradangan pada orang dengan kondisi seperti sindrom usus bocor (Van Vugt et al., 2017).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa suplemen kolagen dapat meningkatkan penurunan berat badan dengan mengurangi nafsu makan dan meningkatkan perasaan kenyang. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk sepenuhnya memahami potensi manfaat kesehatan dari suplemen kolagen, dan disarankan untuk berkonsultasi dengan penyedia layanan kesehatan sebelum memulai rejimen suplemen baru, terutama jika kita memiliki kondisi kesehatan yang mendasari atau sedang mengonsumsi obat yang dapat berinteraksi dengan suplemen kolagen. Kolagen, umumnya ditemukan dalam matriks ekstraseluler dari berbagai jaringan, memiliki berbagai aplikasi medis. Igielska-Kalwat (2022) mengembangkan produk perawatan rambut dalam bentuk gel yang terbuat dari kolagen alami yang diperoleh dari limbah ikan, dan laminasi kolagen ini dapat menghilangkan produksi sebum yang berlebihan, mengembalikan nilai pH yang sesuai, dan mengurangi kulit peradangan (Igielska-Kalwat et al., 2022). Penggunaan perancah kolagen seperti spons berpori dalam rekayasa jaringan adalah diteliti oleh Bacakova dkk. Perancah disiapkan dengan pengeringan beku dan kemudian termineralisasi dalam cairan tubuh yang disimulasikan. Perancah termineralisasi mungkin lebih

menjanjikan untuk rekayasa jaringan tulang daripada perancah yang tidak termineralisasi (Bacakova et al., 2022). Vallecillo (2021) melakukan penelitian tentang degradasi tiga matriks kolagen (Fibro-Gide, Mucograft, dan Mucoderm) berakhir waktu melalui tes yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Fibro-Gide memiliki ketahanan tertinggi terhadap degradasi dari waktu ke waktu dibandingkan dengan Mucograft dan Mucoderm (Vallecillo et al., 2021). Tinjauan sistematis dan meta-analisis dilakukan untuk membandingkan kemanjuran matriks kolagen dengan cangkok jaringan ikat autogenous dalam meningkatkan dimensi jaringan lunak di sekitar gigi dan implan. Efek pengobatan kolagen pada berbagai penyakit dan kondisi, termasuk regenerasi kulit, cacat tulang, sarkopenia, penyembuhan luka, terapi gigi, refluks gastroesofagus, osteoarthritis, dan arthritis reumatoid, telah diulas oleh Wang (Wang, 2021). Obat berbasis kolagen mungkin merupakan pilihan yang baik untuk mengobati berbagai kondisi, termasuk COVID-19, dan mencegah komplikasi.

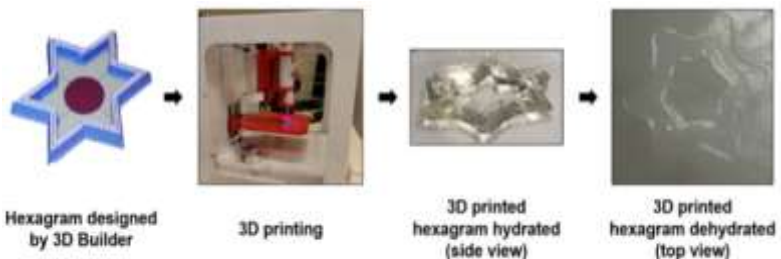
10.2.2 Printing 3D

Pencetakan tiga dimensi, bidang biomaterial yang berkembang pesat, dapat digunakan untuk membuat perancah khusus untuk sistem pengiriman obat, rekayasa jaringan, dan perangkat implan. Dalam pengobatan cacat tulang, Åkerlund et al. Meneliti penggunaan filamen komposit berbasis polimer biokompatibel dan bioresorbable yang dibuat dengan menggabungkan asam polilaktat (PLA), polikaprolakton (PCL), dan hidroksiapatit (HA) melalui ekstrusi untuk pencetakan 3D. Pengembangan material khusus yang terdiri dari polimer biokompatibel dan biodegradable, sendiri atau dikombinasikan dengan bagian mineral, menghasilkan material yang dapat dicetak dengan stabilitas kimia dan sifat mekanik yang cocok untuk regenerasi tulang. Sifat mekanik ditunjukkan untuk memenuhi ambang batas mekanis untuk aplikasi tulang trabekuler. Penyesuaian laju degradasi sangat bergantung pada komposisi material, yang menunjukkan peningkatan melalui penggabungan fase mineral, seperti hidroksiapatit, yang selanjutnya meningkatkan degradasi kombinasi PLA:PCL (Åkerlund et al., 2022). Hata dkk

mengembangkan contoh resin baru berbasis PMMA untuk pencetakan 3D dengan mencampurkan metil metakrilat (MMA), etilen glikol dimetakrilat (EGDMA), dan bubuk PMMA dalam berbagai rasio pencampuran seperti pada gambar 12.1. Kemampuan mencetak dan viskositas resin berbasis PMMA diperiksa untuk menentukan kesesuaiannya untuk pencetakan 3D (Hata et al., 2021).



Gambar 10.1. Fotografi mahkota cetak 3D yang dipasang pada gigi penyangga model phantom. Mahkota dibuat menggunakan pencetakan 3D SLA dan resin berbasis PMMA P30E56M14. Permukaan mahkota dicetak digiling dan dipoles untuk menyesuaikan dengan gigi penyangga.
(sumber : (Hata et al., 2021))



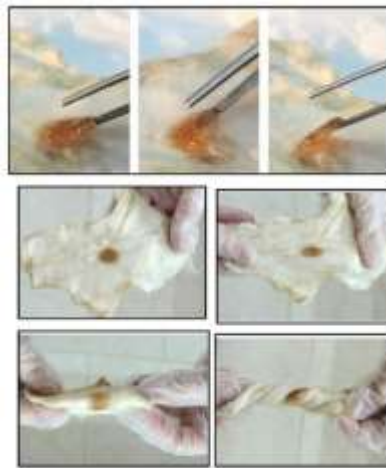
Gambar 10.2. Proses pencetakan 3D MA-NG-GelMA dalam bentuk heksagram.
(sumber : (Zu et al., 2021))

Zu dkk. (2021) dalam penelitiannya mengembangkan hidrogel yang dapat dicetak 3D yang meniru struktur hierarki matriks ekstraseluler dengan menyematkan nanogel, partikel kecil dengan sifat kimia dan biologis serbaguna, ke dalam hidrogel yang lebih besar yang disebut gelatin methacryloil (GelMA). Hidrogel jenis baru ini berpotensi digunakan dalam kultur sel 3D dan aplikasi biomedis lainnya. Pada penelitiannya Zu (2021) diperkenalkan metode sederhana dan serbaguna untuk memproduksi hidrogel komposit nanogel-GelMA hierarkis. Kemampuan cetak 3D diuji dengan printer 3D BioBot 1 seperti pada gambar 10.2, dan struktur cetakan divisualisasikan di bawah mikroskop confocal, Secara keseluruhan Zu (2021) memberikan konsep baru dalam pencetakan 3D sistem hidrogel hierarki yang stabil, dengan memperkenalkan nanogel nanocarrier dalam jaringan hidrogel mikropori GelMA. Sistem yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk mencapai pengiriman in situ dan pelepasan molekul bioaktif yang terkendali ke sel yang dienkapsulasi, yang dapat mengarah pada rekayasa langsung sistem kultur sel 3D yang dapat dikontrol secara in vitro yang mendekati analog jaringan asli dan dengan demikian lebih cocok untuk transplantasi (Zu et al., 2021).

10.2.3 Perancah Vaskular biodegradable

Perancah vaskular biodegradable bukanlah istilah yang umum dikenal dalam bidang medis. Namun, terdapat berbagai biomaterial biodegradable yang telah digunakan dalam aplikasi vaskular, seperti asam poliglikolat (PGA), asam polilaktat (PLA), dan kopolimernya (PLGA). Bahan-bahan ini telah digunakan dalam pengembangan cangkok pembuluh darah, stent, dan perancah untuk aplikasi rekayasa jaringan. PGA dan PLA adalah polimer biodegradable yang telah disetujui oleh FDA untuk digunakan pada perangkat medis. Mereka telah terbukti memiliki biokompatibilitas dan sifat mekanik yang baik, dan produk degradasinya tidak beracun. Penggunaan bahan biodegradable dalam aplikasi vaskular berpotensi mengurangi risiko komplikasi jangka panjang yang terkait dengan implan permanen (Kulinets, 2015).

Lee (2021) mengembangkan jenis baru perancah vaskular biodegradable (BVS) yang terbuat dari poli (asam L-laktat) (PLLA) dengan membuat film PLLA sebagai permukaan BVS dan membagi film PLLA menjadi dua lapisan pelapis. Modifikasi film PLLA diharapkan memiliki kemampuan multifungsi untuk mengatasi permasalahan BVS secara efektif, seperti penetrasi sinar-X, inflamasi, trombosis, dan hiperplasia neointimal (Lee et al., 2021). Coroli et al. menyelidiki penggunaan asam laktobionat (LBA) yang dicampur dengan protein zein dan asam oleat sebagai sistem film penghantaran obat. LBA yang dilepaskan dari film tersebut ditemukan memiliki sifat antioksidan dan menghambat pertumbuhan bakteri tertentu (Coroli et al., 2021). Niculescu dan Grumezescu meninjau penelitian terbaru mengenai perancah dan pakaian biomaterial yang sesuai untuk pengobatan luka (Niculescu & Grumezescu, 2022). Mokhtari et al. meninjau perkembangan terbaru dalam platform berbasis karagenan yang dimodifikasi secara kimia dan hibrida untuk rekayasa jaringan, pemberian obat, dan penyembuhan luka (Mokhtari et al., 2021).



Gambar 10.3. Platform berbasis karagenan hibrida untuk aplikasi penyembuhan luka. Evaluasi kekuatan rekat jaringan hidrogel Z/P yang melekat pada kulit sapi sebagai fungsi dari berbagai deformasi dan gambar hidrogel yang terkelupas dari kulit.
(sumber : (Mokhtari et al., 2021))

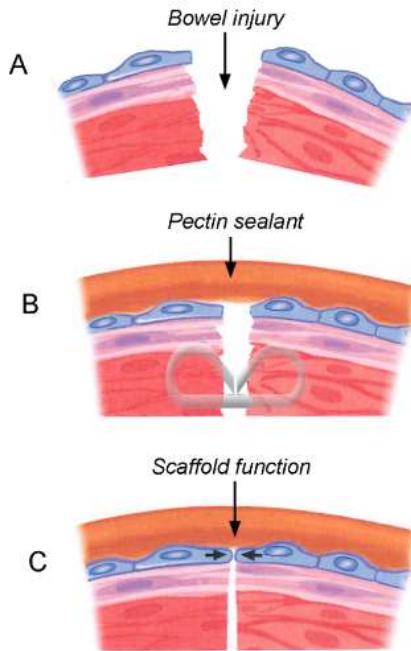
Segala jenis luka dapat terjadi sepanjang hidup siapa pun, sehingga memerlukan perawatan yang cepat dan efisien untuk menghindari potensi komplikasi. Oleh karena itu, manajemen luka terus menjadi topik yang menarik perhatian di bidang medis, yang bertujuan untuk mengembangkan formulasi biomaterial yang lebih baik untuk berbagai balutan dan perancah. Berbagai macam film semipermeabel, busa, hidrogel, hidrokoloid, pembalut hidroaktif, alginat, dan perancah biomaterial telah dilaporkan dalam literatur dengan tingkat keberhasilan yang berbeda-beda dalam penyembuhan luka, sementara beberapa produk serupa telah berhasil memasuki pasar dan saat ini sedang dikembangkan dalam praktek klinis.

Kesimpulannya, meskipun penelitian intensif dilakukan di lapangan, masih ada ruang untuk perbaikan dalam menciptakan dressing dan perancah multifungsi yang berkinerja baik. Optimalisasi manajemen luka harus dicapai mulai dari desain, pemilihan bahan, dan pemilihan balutan untuk jenis luka tertentu. Hanya melalui pemahaman yang jelas tentang kondisi terkini, tantangan, keterbatasan, dan perspektif pembangunan, solusi yang lebih baik dapat dibayangkan untuk perawatan luka pribadi yang efektif.

10.2.4 Pektin

Pektin adalah biomaterial yang berasal dari alam yang telah digunakan dalam berbagai aplikasi medis. Pektin adalah polisakarida yang ditemukan di dinding sel tanaman, terutama pada buah-buahan seperti apel, jeruk, dan lemon. Pektin telah digunakan sebagai sistem penghantaran obat, pembalut luka, dan perancah rekayasa jaringan karena biokompatibilitas, biodegradabilitas, dan kemampuannya untuk membentuk gel. Hidrogel berbasis pektin telah digunakan untuk pelepasan obat dan faktor pertumbuhan yang terkontrol, serta untuk regenerasi jaringan seperti tulang rawan dan tulang. Pektin juga telah digunakan dalam kombinasi dengan biomaterial lain seperti kitosan dan gelatin untuk meningkatkan sifat mekanik dan kinerja biologisnya (Dharadhar & Majumdar, 2019).

Zheng dkk., dalam artikelnya meneliti penggunaan pektin heteropolisakarida yang berasal dari tumbuhan, sebagai biomaterial untuk membantu penyembuhan anastomosis setelah operasi usus. Dibandingkan dengan perekat yang peka terhadap tekanan dan film serat nanoselulosa, pektin memiliki daya rekat yang lebih besar pada serosa. Ada beberapa manfaat potensial dari penerapan tempelan pektin pada permukaan anastomosis usus yang baru dibuat seperti pada skema gambar 10.4. Film pektin menunjukkan kekuatan tarik adhesi dan ketahanan geser yang signifikan. Film pektin juga menunjukkan penutupan yang efektif pada segmen usus kecil yang bertekanan. Kami menyimpulkan bahwa pektin merupakan biomaterial dengan sifat fisik dan perekat yang mampu memfasilitasi penyembuhan anastomosis setelah operasi usus (Zheng et al., 2021).



Gambar 10.4. Skema fungsi potensial biopolimer pektin setelah cedera usus (A). Pektin dapat berfungsi sebagai penutup dengan fungsi mekanis dan penghalang (B). Pektin juga dapat berfungsi sebagai perancah penyembuhan luka (sumber : (Zheng et al., 2021))

10.3 Material dalam Fiksasi Fraktur

Pada tahun 2000, di seluruh dunia, sekitar 9 juta orang menderita patah tulang. Ada beberapa penyebabnya, mulai dari trauma berenergi tinggi seperti luka tembak, kecelakaan kendaraan bermotor, dan olahraga kontak hingga trauma berenergi rendah seperti jatuh dari ketinggian. Jatuh adalah alasan paling umum untuk masuk rumah sakit pada kelompok usia lanjut dan menyumbang 87% dari patah tulang. Patah tulang ini menyebabkan kesulitan finansial, emosional, dan psikologis yang cukup besar - karena banyak faktor seperti timbulnya rasa sakit, kurangnya mobilitas, kurangnya kemandirian, dan cedera yang terjadi bersamaan. Selain itu, sekitar 5-10% patah tulang mengalami komplikasi seperti mal- dan nonunion. Tujuannya perawatan fraktur adalah untuk mendapatkan penyatuan fraktur, sambil memulihkan anatomi dan fungsi normal. Keberhasilan penanganan fraktur tergantung pada evaluasi menyeluruh terhadap pasien dan perumusan rencana perawatan yang disesuaikan dengan kebutuhan mereka.

Selama setengah abad terakhir, kemajuan besar telah dibuat dalam pembuatan perangkat fiksasi untuk perawatan patah tulang. Terlepas dari kemajuan ini, 5-10% dari semua patah tulang yang terjadi di Amerika Serikat menunjukkan bukti penyembuhan yang tertunda atau terganggu, menekankan perlunya metode augmentasi. Kemampuan untuk memberikan stabilitas pada lokasi fiksasi fraktur. Fiksasi patah tulang memiliki efek yang signifikan pada keberhasilan penyembuhan tulang. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lokasi fiksasi meliputi kualitas tulang pasien, tingkat awal perpindahan fraktur, dan tingkat keparahan kominusi fraktur. Akibatnya, beberapa produsen telah mengembangkan bahan sintesis yang dirancang untuk menstabilkan fragmen tulang yang mengalami kominusi, memfasilitasi pemindahan beban di daerah fraktur metafisis, dan internal yang lebih aman perangkat fiksasi internal yang lebih aman dalam kondisi kualitas tulang yang buruk.

Meskipun sebagian besar patah tulang sembuh secara spontan, ada beberapa patah tulang yang mana augmentasi

struktural telah terbukti bermanfaat dengan mengurangi risiko impaksi terkait kegagalan perangkat keras, memfasilitasi penahan beban secara dini, dan meningkatkan hasil klinis secara keseluruhan. Contoh umum patah tulang yang memerlukan augmentasi struktural adalah dataran tinggi tibialis, badan vertebra, dan daerah intertrokanter femoralis. Misalnya, fraktur intertrokanterika yang tidak stabil secara rutin ditangani melalui pembedahan dengan fiksasi internal menggunakan sekrup pinggul geser sudut tetap dalam upaya untuk memfasilitasi bantalan beban dini; namun, perangkat ini dikaitkan dengan tingkat kegagalan mekanis sebesar 16-23% dengan 76% kegagalan terjadi karena runtuhnya sudut leher-poros femoralis ke posisi varus, menyebabkan ekstrusi atau 'terpotongnya' sekrup pinggul dari kepala femoralis. Di masa lalu, semen akrilik yang dikenal sebagai PMMA secara rutin digunakan untuk stabilisasi struktural konstruksi fiksasi, namun semen ini gagal mencapai penerimaan klinis yang luas karena komplikasi seperti nekrosis termal, gangguan penyembuhan, dan kesulitan pelepasan jika terjadi operasi revisi. Keramik nontermogenik yang lebih baru telah dikembangkan dengan kemampuan remodeling in vivo dan penggantian oleh tulang inang, sambil mempertahankan sifat-sifat yang diperlukan untuk augmentasi struktural. Pada bagian ini, kami membahas bahan augmentasi terbaru dan aplikasi klinisnya: keramik kalsium fosfat, dengan subkelompok CPC, hidroksiapatit, dan TCP; keramik kaca; polimer; dan komposit.

10.3.1 Keramik kalsium fosfat

Keramik kalsium fosfat adalah garam mineral teroksidasi tinggi yang dibuat menjadi struktur polikristalin melalui proses yang disebut sintering. Sintering memadukan senyawa dengan pemanasan hingga lebih dari 1000 °C. Proses sintering dapat mengurangi jumlah kalsium apatit yang tidak stabil dan sedikit larut dalam perancah. Sebagian besar orang menganggap keramik inert secara kimia dan biologis. Sifat-sifat ini diperoleh keramik dari panas pembentukan yang besar yang dilepaskan selama proses sintering. Ini menempatkan keramik dalam kondisi energi dan biokompatibel yang sangat rendah. Dengan reputasinya yang rapuh

dan kekuatan tarik yang rendah, keramik biasanya digunakan untuk mengisi kekosongan tulang dan memperbaiki area tulang yang keropos karena patah tulang. Sebaliknya, keramik kalsium fosfat telah terbukti bermanfaat dalam berbagai aplikasi ortopedi, termasuk meningkatkan kekuatan penahan mekanis sekrup dan perangkat fiksasi konvensional. Selain itu, perancah tulang sintetis ini telah digunakan untuk mengirimkan antibiotik, faktor pertumbuhan, dan sel osteoprogenitor secara lokal.

1. Semen kalsium fosfat (*Calcium Phosphate Cements*)

Kalsium dan fosfat anorganik dapat digabungkan menjadi pasta yang dapat disuntikkan untuk disuntikkan ke dalam tulang kalsus di lokasi fraktur untuk meningkatkan penyembuhan tulang secara struktural. Beberapa CPC (*Calcium Phosphate Cements*) yang dapat disuntikkan (Bone Source, AlphaBSM, Biopex) sedang dalam penelitian praklinis pada hewan atau penelitian percontohan pada manusia, namun belum ada yang terbukti dengan baik. dan didokumentasikan dalam penggunaan klinis sebagai Norian SRS (sistem perbaikan kerangka; Norian Corp., Cupertino, CA). Ini adalah semen pengerasan cepat yang mengeras dalam beberapa menit secara *in vivo*, membentuk mineral apatit berkarbonasi yang dikenal sebagai dahllite. Pembentukan dahllite selesai 85-90% dalam waktu 12 jam dengan komposisi dan morfologi kristal mirip dengan tulang termineralisasi.



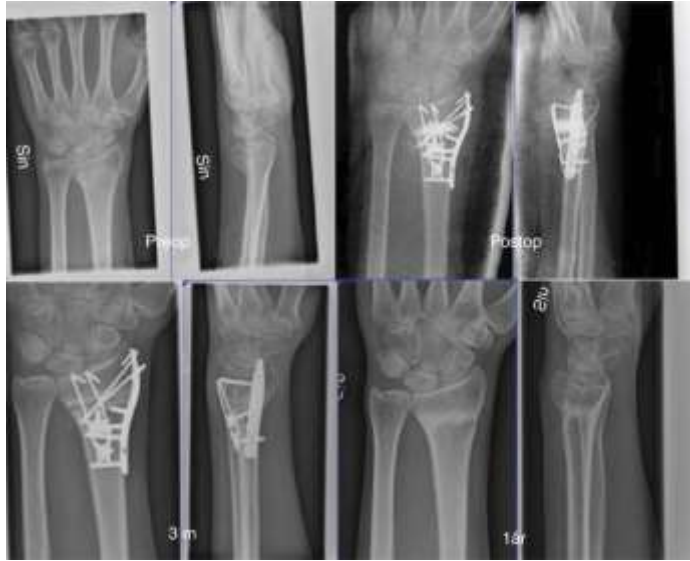
Gambar 10.5. Radiografi menunjukkan penerapan semen kalsium fosfat (Norian SRS). (a) Radiografi anteroposterior lutut kiri menunjukkan penggunaan semen tulang kalsium fosfat untuk mengisi defek setelah fraktur (b) Semen tulang dapat digunakan sebagai tambahan untuk meningkatkan sekrup selama fiksasi fraktur. (sumber: (Lane et al., 2011))

Ini menunjukkan tingkat yang lebih tinggi kekuatan tekan maksimum dan kekuatan tarik serupa dengan tulang cancellous. Karena struktur kristalnya, Norian SRS dapat diserap selama berbulan-bulan dan model hewan menunjukkan bahwa Norian SRS mengalami remodeling in vivo yang dimediasi sel dengan penggantian oleh tulang inang. Norian SRS mempunyai sifat osteokonduktif, namun berfungsi terutama dalam meningkatkan stabilitas mekanis perangkat fiksasi internal pada cedera tulang, mengurangi waktu untuk menahan beban penuh dan pemulihan fungsional total. Aplikasi penerapan Semen Kalsium fosfat berbasis Norian SRS bisa dilihat pada gambar 10.5.

2. Hydroxyapatite

Kristal hidroksiapatit adalah kalsium fosfat keramik yang menyerap perlahan dan sangat stabil in vivo dan memiliki tingkat penyerapan 5-15% per tahun. Bentuk hidroksiapatit berpori dan sangat kristalin yang paling relevan yang saat ini digunakan secara klinis diproduksi dengan metode pertukaran

hidrotermal sederhana, yang mengubah kalsium karbonat lemah menjadi hidroksiapatit yang unggul secara mekanis. Kristal hidroksiapatit ini mirip dengan tulang kanvas manusia, dengan diameter pori berkisar antara 230–600 nm. Beberapa hidroksiapatit sintetis (*Synatite*, *Cerapatite*, *permaOS*, *Orthoss*) dan biologis (*Pro-Osteon*, *Endobon*, *Pyrost*) saat ini digunakan secara klinis. Dari ketiganya, Pro-Osteon (Interpore, Irvine, CA) adalah yang paling terkenal dalam hal augmentasi struktural. Ini adalah bahan osteokonduktif yang efektif karena fungsinya sebagai perancah matriks dengan sistem pori luas yang saling berhubungan, yang memungkinkan pertumbuhan tulang ke dalam. Biokompatibilitas Pro-Osteon dan hidroksiapatit koralin lainnya ditunjukkan oleh kurangnya toksisitas lokal dan sistemik in vivo dan kurangnya menimbulkan respons benda asing. Kerugian utama dari bahan ini adalah kurangnya resorpsi yang signifikan, sehingga mencegah penggantian tulang inang seiring berjalannya waktu. Selain itu, ia juga tidak memiliki sifat osteoinduktif, sehingga membatasi kemampuannya untuk memfasilitasi pembentukan tulang baru, dan banyak peneliti telah melaporkan masalah migrasi partikel sebagai potensi komplikasi penggunaan hidroksiapatit (Lane et al., 2011). Salah satu contoh aplikasi material hidroksiapatit yakni pada kasus tindak lanjut osteotomi pada radius distal yang diobati dengan pengganti tulang hidroksiapatit/kalsium sulfat menunjukkan penyembuhan tulang lengkap dan tulang trabekuler dan kortikal baru setelah 1 tahun ditunjukkan pada gambar 10.6 (Nilsson et al., 2013).

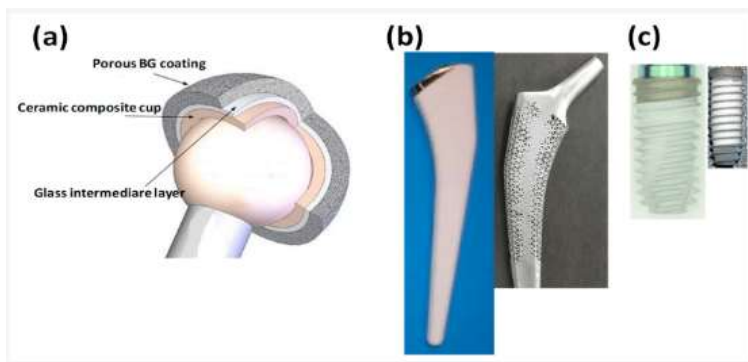


Gambar 10.6. Tindak lanjut osteotomi pada radius distal yang diobati dengan pengganti tulang hidro ksiapatit/kalsium sulfat. (sumber : (Nilsson et al., 2013))

10.3.2 Keramik glass

Bioglass ditemukan sejak tahun 1970an, beberapa lebih banyak gelas dan keramik kaca telah ditemukan dengan kemampuan serupa untuk mengikat langsung ke tulang hidup. Namun, sifat mekaniknya yang lemah telah membatasi aplikasi klinisnya hanya pada kapasitas menahan beban yang rendah. Bahan ini bersifat bioaktif dalam arti mengikat tulang dengan menimbulkan respons pada antarmuka antara bahan dan jaringan. Pengujian in vitro menunjukkan bahwa Bioglass mengalami proses yang cepat reaksi permukaan multistage, yang membentuk lapisan tipis apatit hidroksi-karbonat yang aktif secara biologis, bagian penting dari ikatan langsungnya dengan tulang. Kacamata berbahan dasar silikon dan keramik kaca yang saat ini digunakan secara klinis masing-masing meliputi Bioglass dan *Apatite Wollastonite Glass Ceramics* (AWGC) atau keramik kaca bioaktif. Bioglass terbuat dari SiO_2 , Na_2O , CaO , dan P_2O_5 , sedangkan AWGC terdiri dari oksapatit, fluorapatit, dan b-wollastonite.

Bioglass dan keramik kaca bioaktif sebagian besar memiliki komposisi yang sama, kecuali P_2O_5 sedikit lebih tinggi, dan Na_2O pada keramik kaca sedikit lebih sedikit. Meskipun kedua bahan tersebut menunjukkan ikatan yang baik dengan tulang, AWGC secara mekanis lebih unggul daripada Bioglass, sehingga memungkinkannya digunakan dalam aplikasi penahan beban yang lebih kuat seperti prostesis tulang belakang. Dalam bentuk butiran, Bioglass dan AWGC dapat digunakan sebagai pengisi tulang untuk cacat bentuk tidak beraturan. Namun, ada laporan kesulitan dalam menangani bentuk granular dan mempertahankannya dalam kondisi cacat. Hal ini mendorong pencampuran bahan-bahan ini dengan produk lain (yaitu campuran kaca-keramik-fibrin) untuk membuatnya lebih mudah ditangani dan memfasilitasi retensi dalam cacat (Lane et al., 2011). Untuk ilustrasi aplikasi penerapan keramik kaca bioaktif dapat dilihat pada gambar 10.7.

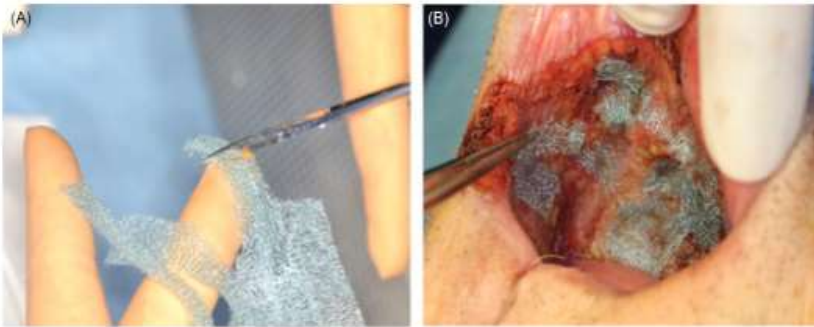


Gambar 10.7. Ilustrasi kemungkinan penerapan pelapis kaca bioaktif pada implan penahan beban (a) gambar skema pada konstruksi, (b) pelapis pada implan pinggul, (c) pelapis pada perlengkapan implan gigi.
(sumber : (Kaou et al., 2023))

10.3.3 Polimer

Dari sekian banyak senyawa organik biodegradable dan resorbable yang diketahui saat ini, hanya sedikit yang memiliki sifat biokompatibel dan mekanik yang penting untuk digunakan dalam perangkat fiksasi internal. Senyawa yang paling sesuai dan relevan secara klinis adalah polimer yang diperkuat sendiri *polymer*

polylactic acid (PLA), *Polyglycolic acid* (PGA), *polidioksanon* (PDS), dan kopolimer PLA-PGA. Dalam penggunaan klinis, polimer ini telah dibuat menjadi implan yang stabil secara mekanis seperti pin, batang, sekrup, dan pelat untuk tujuan fiksasi fraktur. Munculnya implan polimer yang dapat diserap berasal dari upaya untuk menghilangkan komplikasi jangka panjang dari implan logam, yang pada akhirnya memerlukan pengangkatan melalui pembedahan, sehingga membuat pasien berpotensi mengalami komplikasi pembedahan. Implan ini terserap sepenuhnya, diikuti dengan penggantian tulang inang. Fungsinya sebanding dengan perangkat fiksasi logam dalam hal hasil pengobatan dan tingkat komplikasi, menjadikan polimer ini sebagai tambahan yang menarik dalam pengobatan patah tulang akibat beban. Ada beberapa kesulitan teknis yang terkait dengan penggunaan implan polimer dalam fiksasi patah tulang, terutama upaya untuk mencegah kerusakan implan saat dimasukkan ke lokasi fraktur. Hal ini mungkin memerlukan instrumen khusus seperti obeng torsi, mata bor, dan inserter dengan berbagai ukuran. Kerugian utama dari penggunaan polimer adalah dilaporkan adanya tingkat keterlambatan respons jaringan inflamasi noninfeksius yang tertunda sebesar 7,9% yang memerlukan drainase bedah. Selain itu, biaya implan polimer ini lima belas kali lipat dari biaya implan logamnya. Sehubungan dengan aplikasi penahan beban untuk pengobatan patah tulang, polimer sering dikombinasikan dengan biomaterial lain untuk membentuk komposit yang relevan secara klinis (Lane et al., 2011). Contohnya adalah Plexur, Plexur dikembangkan oleh Osteotech, Inc., sebuah perusahaan yang berspesialisasi dalam solusi biologis untuk penyembuhan regeneratif. Plexur dapat digunakan sebagai pengisi kekosongan tulang atau untuk meningkatkan pembelian bahan implan seperti sekrup. Selain itu ada contoh lain seperti perancah kopolimer PLA-PGA yang mengandung kalsium, fosfat, dan elemen jejak protein matriks. Ini tersedia dalam bentuk blok, silinder, lembaran, dan butiran. PGA dalam bentuk lembaran yang dipotong untuk menutupi luka bisa kita lihat pada gambar 10.8 (Manoukian et al., 2019)



Gambar 10.8. (A) Lembaran PGA dipotong kecil-kecil (lebar 5–10 mm) dan (B) sekitar 3–10 lembar digunakan untuk menutupi setiap luka
(sumber : (Manoukian et al., 2019))

10.3.4 Komposit

Material komposit tersusun dari semen akrilik yang dikombinasikan dengan keramik. Mirip dengan konstituennya, komposit bersifat biokompatibel dan bioaktif serta memiliki sifat mekanik yang unggul, sehingga memungkinkan penerapan klinis yang beragam. Keuntungan utama penggunaan komposit adalah bahwa kombinasi konstituen memungkinkannya untuk menunjukkan sifat mekanik yang unggul dari masing-masing komponen, sementara masing-masing komponen dapat mengatasi kelemahan orang lain. Meskipun terdapat banyak komposit di pasaran, Cortoss (Orthovita, Malvern, PA) adalah salah satu material yang sudah mapan dalam penggunaan klinis. Ini adalah tetrapolimer dengan viskositas rendah dan pengaturan cepat yang diperkuat dengan partikel kaca yang disebut combeite. Mirip dengan keramik kaca, tersedia dalam bentuk semen injeksi. Dibandingkan dengan PMMA, bahan ini memiliki suhu pengeringan yang lebih rendah dan memiliki viskositas yang optimal dan konstan, sehingga meminimalkan risiko kebocoran setelah penempatan. Kuat tekannya adalah 211 MPa lebih dari dua kali lipat PMMA. Cortoss sedang menjalani uji klinis sebagai pengganti PMMA dalam augmentasi tulang belakang, khususnya vertebroplasti perkutan dan kyphoplasty. Ini juga sedang dalam pengujian praklinis sebagai augmentasi semen untuk fraktur femur proksimal.

Cortoss berfungsi sebagai pengisi tulang yang baik dalam kasus ini karena memiliki karakteristik yang mirip dengan tulang kortikal manusia. Demikian pula, Actifuse Synthetic Bone Graft (Apatech, Inc. Foxborough, MA), komposit kalsium fosfat tersubstitusi silikat, juga telah digunakan sebagai pengganti rongga tulang setelah fraktur kompresi tulang belakang dan kyphoplasty. Apabila dibandingkan dengan keramik tradisional, keramik tersubstitusi silikon memiliki efek yang dapat menunjukkan peningkatan kapasitas untuk resorpsi dan pertumbuhan tulang di dalam dan sekitar bahan yang ditanamkan.

Fiksasi patah tulang osteoporosis terbukti sulit karena kualitas tulang yang buruk. Augmentasi semen pada sekrup kanulasi dengan lubang samping saat ini digunakan secara klinis. Sekrup ini memungkinkan semen tulang (Norian SRS atau Cortoss) disuntikkan melalui kanula dan ke dalam tulang kanvas yang mengelilingi benang. Setelah semen mengeras, kekuatan penahan sekrup meningkat secara signifikan. Karena kerapuhannya, Norian SRS diketahui mudah retak, terutama saat memasang sekrup. Namun, bentuk Norian yang dapat dibor dan diperkuat dengan serat kopolimer juga tersedia. Jika sekrup kanulasi tidak tersedia, augmentasi semen masih dapat dilakukan dengan menyuntikkan semen ke dalam lubang bor, diikuti dengan memasukkan sekrup standar sebelum semen mengeras (Lane et al., 2011).

DAFTAR PUSTAKA

- Åkerlund, E., Diez-Escudero, A., Grzeszczak, A., & Persson, C. (2022). The Effect of PCL Addition on 3D-Printable PLA/HA Composite Filaments for the Treatment of Bone Defects. *Polymers*, 14(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/polym14163305>
- Bacakova, L., Novotna, K., Hadraba, D., Musilkova, J., Slepicka, P., & Beran, M. (2022). Influence of Biomimetically Mineralized Collagen Scaffolds on Bone Cell Proliferation and Immune Activation. *Polymers*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/polym14030602>
- Coroli, A., Romano, R., Saccani, A., Raddadi, N., Mele, E., & Mascia, L. (2021). An In-Vitro Evaluation of the Characteristics of Zein-Based Films for the Release of Lactobionic Acid and the Effects of Oleic Acid. *Polymers*, 13(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/polym13111826>
- Dharadhar, S., & Majumdar, A. (2019). Biomaterials and Its Medical Applications. In S. Paul (Ed.), *Application of Biomedical Engineering in Neuroscience* (pp. 355–380). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7142-4_18
- Hata, K., Ikeda, H., Nagamatsu, Y., Masaki, C., Hosokawa, R., & Shimizu, H. (2021). Development of Dental Poly(methyl methacrylate)-Based Resin for Stereolithography Additive Manufacturing. *Polymers*, 13(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/polym13244435>
- Igielska-Kalwat, J., Kilian-Pięta, E., & Połoczańska-Godek, S. (2022). The Use of Natural Collagen Obtained from Fish Waste in Hair Styling and Care. *Polymers*, 14(4), 749. <https://doi.org/10.3390/polym14040749>
- Kaou, M. H., Furkó, M., Balázs, K., & Balázs, C. (2023). Advanced Bioactive Glasses: The Newest Achievements and Breakthroughs in the Area. *Nanomaterials*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/nano13162287>

- Kulinets, I. (2015). 1—Biomaterials and their applications in medicine. In S. F. Amato & R. M. Ezzell (Eds.), *Regulatory Affairs for Biomaterials and Medical Devices* (pp. 1–10). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857099204.1>
- Lane, J. M., Mait, J. E., Unnanuntana, A., Hirsch, B. P., Shaffer, A. D., & Shonuga, O. A. (2011). Materials in Fracture Fixation. In *Comprehensive Biomaterials* (pp. 219–235). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-055294-1.00251-8>
- Lee, H. I., Heo, Y., Baek, S.-W., Kim, D.-S., Song, D. H., & Han, D. K. (2021). Multifunctional Biodegradable Vascular PLLA Scaffold with Improved X-ray Opacity, Anti-Inflammation, and Re-Endothelization. *Polymers*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/polym13121979>
- Manoukian, O. S., Sardashti, N., Stedman, T., Gailiunas, K., Ojha, A., Penalosa, A., Mancuso, C., Hobert, M., & Kumbar, S. G. (2019). Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. In R. Narayan (Ed.), *Encyclopedia of Biomedical Engineering* (pp. 462–482). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.64098-9>
- Mokhtari, H., Tavakoli, S., Safarpour, F., Kharaziha, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2021). Recent Advances in Chemically-Modified and Hybrid Carrageenan-Based Platforms for Drug Delivery, Wound Healing, and Tissue Engineering. *Polymers*, 13(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/polym13111744>
- Niculescu, A.-G., & Grumezescu, A. M. (2022). An Up-to-Date Review of Biomaterials Application in Wound Management. *Polymers*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/polym14030421>
- Nilsson, M., Zheng, M.-H., & Tägil, M. (2013). The composite of hydroxyapatite and calcium sulphate: A review of preclinical evaluation and clinical applications. *Expert Review of Medical Devices*, 10, 675–684. <https://doi.org/10.1586/17434440.2013.827529>

- Vallecillo, C., Toledano-Osorio, M., Vallecillo-Rivas, M., Toledano, M., & Osorio, R. (2021). In Vitro Biodegradation Pattern of Collagen Matrices for Soft Tissue Augmentation. *Polymers*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/polym13162633>
- Van Vugt, T. A., Geurts, J. A. P., Arts, J. J., & Lindfors, N. C. (2017). Biomaterials in treatment of orthopedic infections. In *Management of Periprosthetic Joint Infections (PJIs)* (pp. 41–68). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100205-6.00003-3>
- Wang, H. (2021). A Review of the Effects of Collagen Treatment in Clinical Studies. *Polymers*, 13(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/polym13223868>
- Wang, H. (2023). Biomaterials in Medical Applications. *Polymers*, 15(4), 847. <https://doi.org/10.3390/polym15040847>
- Zheng, Y., Pierce, A. F., Wagner, W. L., Khalil, H. A., Chen, Z., Funaya, C., Ackermann, M., & Mentzer, S. J. (2021). Biomaterial-Assisted Anastomotic Healing: Serosal Adhesion of Pectin Films. *Polymers*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/polym13162811>
- Zu, G., Meijer, M., Mergel, O., Zhang, H., & van Rijn, P. (2021). 3D-Printable Hierarchical Nanogel-GelMA Composite Hydrogel System. *Polymers*, 13(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/polym13152508>

BIODATA PENULIS



Arshy Prodyanatasari, M.Pd.

Dosen Program Studi D3 Fisioterapi
Fakultas Kesehatan, Institut Ilmu Kesehatan Bhakti Wiyata Kediri

Penulis lahir di Kediri tanggal 28 Mei 1987. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D3 Fisioterapi, Fakultas Kesehatan Institut Ilmu Kesehatan Bhakti Wiyata Kediri sejak tahun 2013 samai sekarang. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Pendidikan Fisika di Universitas Negeri Surabaya pada tahun 2009 dan melanjutkan Pendidikan jenjang magister di Universitas Negeri Surabaya pada Program Studi S2 Pendidikan Sains. Penulis pernah mendapatkan Amanah untuk menjadi Kepala Pusat Pengembangan Teknologi dan Sistem Informasi (PPTSI) pada tahun 2018-2021 dan menjadi codeputi Manajemen dan Teknologi Sistem Informasi (MTSI) pada 2021-2022. Penulis juga aktif menulis buku, beberapa karya buku yang telah terbit, diantaranya: Kimia Analisis Bahan Pangan, Landasan Pendidikan, Ilmu Pendidikan, Pengembangan Sumber dan Media Pembelajaran PAI, Kimia Klinik Darah, dan Biokimia dan Fisika dalam Kebidanan. Harapannya semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

BIODATA PENULIS



Dokter Dito Anurogo, M.Sc., Ph.D. (Candidate)

Dosen tetap di Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan Universitas Muhammadiyah Makassar Indonesia

Dosen tetap di Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan Universitas Muhammadiyah Makassar Indonesia, dokter umum, pengajar bioetika, pemerhati filsafat dan komunikasi, pengamat media sosial, penulis puluhan buku di penerbit ternama di Indonesia. *Magnum opus*-nya berjudul *The Art of Medicine* diterbitkan Penerbit Gramedia dan telah didistribusikan secara Internasional melalui Amazon.com. Karya terbarunya bersama Prof. Dr. Taruna Ikrar, M. Biomed, Ph.D. berjudul "Ensiklopedia Penyakit dan Gangguan Kesehatan" diterbitkan oleh CV Pustaka Setia Bandung, setebal 448 halaman telah dikoleksi di berbagai perpustakaan dan sekolah di Indonesia. Karyanya bersama tim membahas komunikasi multiperspektif, bertajuk *The Art of Healthy Neurophilocommunication*

<https://journals2.ums.ac.id/index.php/mier/article/view/2893>

Seorang kolumnis (penulis) tetap di berbagai media cetak online dan offline (misalnya: Harian Fajar, Suara Merdeka, Antaraneews.com, detik.com), pelopor di bidang Nanoimmunobiotechnomedicine (NiBTM) dan hematopsikiatri, penggerak literasi digital, dan pemberdayaan masyarakat, pembelajar dan pemerhati psikologi.

Beliau memiliki sertifikasi CME (*Continuing Medical Education*) dari berbagai universitas ternama dunia, seperti: Harvard, Oxford, dan John Hopkins University, dsb. Beliau juga memiliki berbagai sertifikasi di bidang: kegawatdaruratan, trauma, dan neurologi (ATLS, ACLS, ANLS, TCD), herbal dan tanaman obat, grafologi dasar, jurnalisme, kepenulisan, dan training (pelatihan). Ia memiliki lebih dari 45 gelar non-akademik lintas-multidisiplin keilmuan serta lebih dari 15 HAKI. Dia juga seorang pembelajar seumur hidup. Saat ini ia sedang studi S3 di Taipei Medical University Taiwan. Di sela-sela kesibukannya, ia menjadi reviewer di puluhan jurnal nasional dan Internasional, termasuk reviewer tetap di *Journal of Translational Medicine* (terindeks Scopus Q1) penerbit Springer-Nature. Dokter Dito bersama tim ASPI (Asosiasi Sel Punca Indonesia) lainnya telah berkontribusi dalam merumuskan rancangan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2018 tentang Penyelenggaraan Pelayanan Sel Punca dan/atau Sel.

Beliau memiliki pengalaman di lebih dari 20 organisasi nasional hingga Internasional (sebagai dewan penasihat/pelindung/pembina, CEO, pendiri, penggagas, ketua, anggota). Saat ini masih aktif menjabat sebagai Wakil Ketua Komisi Kesehatan Ditlitka PPI Dunia dengan program kerja "Telehealth - Telemedicine" sebagai andalannya.

Alumnus Ilmu Kedokteran Dasar (IKD) Biomedis Fakultas Kedokteran Universitas Gadjah Mada (FK UGM) Yogyakarta ini juga telah menerima berbagai penghargaan bergengsi tingkat internasional dan nasional, antara lain: Best paper Award kategori Best Idea 2023 dalam forum The 5th International Conference on Religious and Cultural Sciences, Duta Perdamaian dari World Wide Peace Organization (WWPO) di Indonesia 2022, International Scientist Awards 2022 di bidang Engineering, Science, and Medicine International Research Awards 2022 di bidang Science, Technology, and Management; The Best Position Paper of UN Women 2021 (kerja sama antara International Model United Nations, UNDP, UNESCO, dan Kedutaan Besar Australia), The Distinguished Proponent and Excellent Scientist 2022 at "First Generation of Cadre of Indonesian Islamic Thinkers" held by institute of Religious and

Philosophical Studies in Collaboration with Universitas Paramadina, Indonesia. Gadjah Mada Awards 2015 (kategori Mahasiswa Paling Inspiratif dan Mahasiswa Penulis Terbaik); Seed Grant Award Blended Learning batch II, 2015 Pusat Kebijakan Manajemen Kesehatan, Fakultas Kedokteran, Universitas Gadjah Mada; The Best Winner, kategori sains, lomba esai nasional, forum AGRINOVA, yang diselenggarakan oleh HIMMPAS IPB 2015; dan First Winner "2013 World Young Doctors' Organization (WYDO) Indonesia Essay Contest Award". Ia dapat dihubungi via email: dito.anurogo@med.unismuh.ac.id.

BIODATA PENULIS



Jannes Bastian Selly, M.Si., M.Kes.

Dosen Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Cendana

Penulis lahir di Kupang, Nusa Tenggara Timur, tanggal 04 Juni 1992. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada program studi Pendidikan Fisika, Universitas Nusa Cendana, tahun 2013. Program magister pada program studi Ilmu Fisika, dengan peminatan Fisika Medis dan Biofisika, FMIPA Universitas Brawijaya, tahun 2015, dan program studi magister Ilmu Kesehatan Masyarakat, konsentrasi Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan Kerja, di Universitas Nusa Cendana, tahun 2019. Penulis mulai menjadi dosen sejak tahun 2016. Sejak tahun 2022 penulis menjadi dosen tetap di Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Nusa Cendana.

Dalam memenuhi salah satu kegiatan dari tridharma perguruan tinggi, yaitu penelitian dan publikasi, penulis aktif dalam menulis buku. Hingga saat ini penulis sudah terlibat dalam menulis tiga *book chapter* yang telah dipublikasikan ber-ISBN yaitu buku *Metodologi Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif, Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan Kesehatan Kerja*, serta buku *thermodynamika*. Buku ini merupakan *book chapter* keempat yang penulis kerjakan. Semoga tulisan dalam buku ini dapat menambah pengetahuan dan dapat dijadikan sebagai referensi khususnya dalam bidang fisika kedokteran.

BIODATA PENULIS



Fitriyanti, S.Si.,M.Sc.

Dosen Program Studi Fisika

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin
Makassar

Penulis lahir di Parepare tanggal 25 Mei 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin Makassar dan melanjutkan S2 pada Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada. sejak tahun 2012 hingga sekarang. Aktif melakukan penelitian, dan telah menerbitkan berbagai jurnal penelitian

BIODATA PENULIS



Fetronela Rambu Bobu, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Informasi
Fakultas Pertanian, Sains, dan Kesehatan Universitas timor

Penulis lahir di Madidi Palamedu tanggal 13 April 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Pertanian, Sains, dan Kesehatan Universitas timor. Menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 pada Jurusan Fisika di Universitas Brawijaya Malang. Penulis menekuni bidang Biofisika dan Fisika Medis.

BIODATA PENULIS



Nurul Fuadi, S.Si., M.Si.

Prodi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar

Penulis lahir di Sengkang Kab. Wajo tanggal 30 Oktober 1983. Anak ke 1 dari 2 bersaudara merupakan Lulusan Sarjana Fisika (S1) Fakultas MIPA di Universitas Hasanuddin Makassar pada tahun 2007 dan juga telah menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada jurusan Biofisika Fakultas MIPA, Institut Pertanian Bogor pada tahun 2010. Saat ini Penulis aktif mengajar di Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Mata kuliah yang diajarkan di antaranya Fisika Dasar, Biofisika, Termodinamika, Fisika Statistik, Biomaterial, Biokimia dan Anatomi dan Fisiologi Tubuh Manusia. Penulis telah menulis buku referensi yaitu Fisika Dasar, Fisika Optik, Anatomi Olahraga dan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) Terpadu. Penulis juga aktif menerbitkan beberapa artikel baik jurnal Nasional bersinta maupun prosiding conference Nasional dan Internasional. Penulis juga sebagai reviewer pada jurnal JFT Jurusan Fisika UINAM dan jurnal JPF Jurusan Pendidikan Fisika UINAM. Serta aktif dalam organisasi bidang kepakaran maupun non kepakaran.

Email : nurul.fuadi@uin-alauddin.ac.id

BIODATA PENULIS



Sri Zelviani, S.Si., M.Sc.

Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar

Penulis lahir di Enrekang, 15 Mei 1988. Penulis adalah dosen pada program studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar. Setelah menyelesaikan studi S1 pada Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar pada tahun 2010, penulis kemudian melanjutkan studi S2 pada tahun 2011 pada Jurusan Ilmu Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Sebagai tenaga pengajar, mata kuliah yang diampu saat ini adalah mata kuliah Pendahuluan Fisika Inti, Fisika Kesehatan & Proteksi Radiasi, Fisika Radiologi & Dosimetri, serta Instrumentasi Medis.

BIODATA PENULIS



Muh. Said L., S.Si., M.Pd.

Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

Penulis Lahir di Jeneponto, tepatnya tanggal 4 September 1983. Penulis menempuh Pendidikan mulai tingkat SD (1989-1995), SMP (1995-1998), SMA (1998-2001), S1 Fisika (2001-2005) dan S2 Pendidikan Fisika (2007-2009). Sejak tahun 2009 hingga sekarang, penulis aktif sebagai Pengajar di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Penulis membidangi kepakaran dibidang Fisika Kebumian, Energi dan Lingkungan dan bidang Pendidikan Fisika. Beberapa kegiatan tri darma perguruan tinggi telah aktif dilakukan antara lain dari bidang pengajaran aktif mengajar beberapa mata kuliah yaitu: Pengantar Laboratorium Fisika, Metode Komputasi Fisika, Fisika Dasar, Fisika Matematika, Instrumentasi, Fisika Eksperimen.

Bidang penelitian dan publikasi ilmiah telah banyak dilakukan baik didanai oleh PT UIN Alauddin, maupun bersumber dari Kementerian Agama R.I. Penelitian yang dilakukan antara lain Studi Analisis Koefisien Absorpsi Papan Akustik Pada Ketebalan Bervariasi Berbahan Dasar Limbah Kulit Jagung dan Sabut Kelapa (Solusi Alternatif Ramah Lingkungan) (2020), Karakterisasi Sifat Fisis Papan Partikel Sabut Kelapa-Serat Pelepah Lontar (2021), Identifikasi Zona Rawan Longsor Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas di Desa Pao Kecamatan Tombolo Pao Kabupaten Gowa

(2022). Adapun publikasi ilmiah lainnya yang dihasilkan dalam bentuk Jurnal Terakreditasi dan Prosiding Nasional. Penulis juga telah aktif menulis karya ilmiah buku ber-ISBN. Buku yang terbit terakhir pada tiga tahun terakhir adalah Sistem Pemurni Air Laut Menjadi Air Minum : Sebuah Terobosan dalam Mengatasi Krisis Air Bersih Bagi Komunitas Muslim Pesisir dan Pulau di Sekitar Kota Makassar (2021), Teknik Analisis Data Dan Rambat Ralat Eksperimen Fisika Dasar (Mengasah Psikomotorik Melalui Keterampilan Menganalisis Data Percobaan Fisika), BC Kinematika Partikel (2023), BC Fisika Dasar 1 (2023), BC Pencemaran Lingkungan (2023). BC Fisika Dasar 2 (2023), Fisika Optik (Teori, Instrumen dan Aplikasinya) (2023). Sedangkan tridarma bidang Pengabdian kepada masyarakat juga telah aktif dilakukan perwujudan aktualisasi keilmuan ke masyarakat antara lain: Penerapan Alat Geolistrik Dalam Menentukan Struktur dan Lapisan Air Tanah (Aquifer) Bawah Permukaan di Desa Tino Kec. Tarowang Kab. Jeneponto (2022); Sosialisasi dan Pendampingan Siswa Melalui Pengenalan Praktikum Fisika Lebih Menarik (2022); Pendampingan Siswa SMA dalam Menumbuhsemangatkan Motivasi, Kreativitas dan Keterampilan Bereksperimen Melalui Praktikum Fisika di SMA Negeri 2 Bantaeng (2023). Akhirnya karya prestasi ini, penulis dedikasikan kepada masyarakat, bangsa dan negara, semoga apa yang diraih menjadi bermanfaat untuk semuanya.

BIODATA PENULIS



Sitti Nurrahmi, S.Si., M.Sc.

Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

Penulis lahir di kota Palu pada tanggal 21 November 1988. Pada waktu SMA, penulis bersekolah di SMA Negeri 3 Palu dan memiliki wali kelas yang mengajar mata pelajaran Fisika. Penyampaianya terhadap mata pelajaran Fisika sangat menarik perhatian penulis, sehingga menjadi mata pelajaran favorit penulis sewaktu SMA. Ketertarikan di dunia Fisika membuat penulis bertekad untuk melanjutkan pendidikan yang lebih tinggi dengan memilih jurusan Fisika di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Tadulako pada tahun 2006 dan lulus tahun 2011. Pada tahun 2012, penulis kembali melanjutkan studi S2 dengan mengambil program Magister Ilmu Fisika di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada dan lulus tahun 2015. Saat ini penulis aktif sebagai dosen tetap jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar, dan aktif melaksanakan tridarma perguruan tinggi, melalui pengajaran, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat, salah satunya sebagai dosen pengampu matakuliah Mekanika I dan II serta matakuliah binaan Fisika Statistik.

BIODATA PENULIS



Sefrilita Risqi Adikaning Rani, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar

Penulis lahir di Kediri tanggal 11 April 1994. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Fisika, Universitas Negeri Alauddin Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) tahun 2016 dan menyelesaikan studi S2 pada Jurusan Fisika bidang fisika material di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) tahun 2018. Interes riset yang ditekuni yaitu pada material keramik. Penulis menekuni bidang menulis di bidang fisika dan fisika material.