



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



BIOFISIKA UNTUK PENGEMBANGAN ELEKTROFISIOLOGI PADA MANUSIA

Profesor Siti Nurul Khotimah

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
22 Juni 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**BIOFISIKA UNTUK PENGEMBANGAN
ELEKTROFISIOLOGI PADA MANUSIA**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

BIOFISIKA UNTUK PENGEMBANGAN ELEKTROFISIOLOGI PADA MANUSIA

Prof. Siti Nurul Khotimah

22 Juni 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:
***Biofisika untuk Pengembangan Elektrofisiologi
pada Manusia***

Penulis : Prof. Siti Nurul Khotimah
Reviewer : Prof. Idam Arif

Editor Bahasa : Rina Lestari
Cetakan I : 2024
ISBN : 978-623-297-479-1
e-ISBN : 978-623-297-480-7 (PDF)

ITB PRESS

© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Segala puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah Swt., bahwasanya atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku orasi ilmiah ini. Kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberi kesempatan untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung.

Buku ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum mengenai biofisika dan penerapannya pada elektrofisiologi. Naskah orasi ilmiah ini mencakup rangkaian hasil penelitian yang telah dilakukan penulis beserta rekan-rekan sejawat dosen dan para mahasiswa bimbingan S-1, S-2, dan S-3 yang banyak membantu dan mendukung kami.

Penulisan buku ini dapat terlaksana tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan diskusi pada penyiapan buku ini, khususnya kepada Prof. Idam Arif, Ph.D. yang telah meluangkan waktu untuk *me-review* buku ini. Semoga Allah Swt. membalas dengan kebaikan.

Semoga tulisan dalam buku orasi ilmiah ini bermanfaat bagi masyarakat umum, masyarakat penggunanya dan juga bagi pengembangan ilmu pengetahuan bidang biofisika, khususnya bidang elektrofisiologi pada manusia.

Bandung, 22 Juni 2024

Prof. Siti Nurul Khotimah

SINOPSIS

Buku ini memaparkan berbagai penelitian bidang biofisika yang dilakukan penulis bersama rekan-rekan dosen dan mahasiswa. Biofisika berperan penting dalam bidang elektrofisiologi yang mempelajari sifat listrik pada sel dan jaringan biologi. Pembahasan diawali dengan konsep dasar timbulnya kelistrikan pada sel, seperti *resting potential* dan potensial aksi. Kemudian, pembahasan tentang perambatan sinyal bioelektrik pada sel saraf dan sel otot. Selanjutnya, pembahasan tentang sinyal elektrogram terutama pada jantung (elektrokardiogram, EKG) dan pada otak (elektroensefalogram, EEG).

Pada EKG, akan dibahas perkembangan peralatan EKG beserta spesifikasinya dan bagaimana konsep dasar pengukuran sinyal EKG. Penelitian dilakukan untuk menguji akurasi sinyal dari EKG-*mobile* terhadap sinyal dari EKG-klinis, mengkaji pengaruh usia pada *heart rate*, menganalisis EKG melalui parameter *Heart Rate Variability* untuk deteksi aritmia, menganalisis EKG melalui entropi secara visual dengan metode *Symbolic Recurrence Plot* (SRP) untuk membedakan antara subjek *normal sinus rhythm* dan fibrilasi atrium. Untuk penelitian lebih lanjut, diusulkan memanfaatkan *Artificial Intelligence* untuk membedakan gambar SRP dengan lebih akurat untuk tujuan klasifikasi.

Pada EEG akan diawali dengan peran EEG untuk mendiagnosis gangguan-gangguan neurologi dan psikiatri, mengulas beberapa jenis peralatan EEG, membahas jenis-jenis gelombang otak serta konfigurasi penempatan dan montase elektroda EEG untuk mendeteksi aktivitas di beberapa lobus otak yang berhubungan dengan aktivitas tubuh, menjelaskan teknik *quantitative Electroencephalography* (qEEG) untuk mengukur dan menganalisis aktivitas gelombang otak melalui besaran rapat spektrum daya (PSD). Peningkatan nilai PSD berkorelasi dengan kenaikan aktivitas otak dan pergeseran nilai frekuensi berkaitan dengan perubahan kondisi mental. Buku ini membahas beberapa penelitian, yaitu untuk menganalisis kualitas rekaman dari *consumer-grade* EEG terhadap rekaman dari perangkat *medical-grade* EEG, menganalisis PSD akibat rangsangan musik dengan variasi *loudness* dan *tempo*, menganalisis PSD pada gangguan jiwa skizofrenia, menganalisis PSD dan uji koherensi pada gangguan jiwa bipolar, dan mempelajari pengaruh *virtual*

reality dalam menyebabkan gejala *virtual reality sickness* (VRS) dengan media tayang berupa layar dan *head-mounted display* (HMD).

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
1 SEJARAH DAN PERAN BIOFISIKA PADA PERKEMBANGAN ELEKTROFISIOLOGI.....	1
2 KELISTRIKAN PADA SEL: DARI KONSEP DASAR HINGGA SINYAL BIOELEKTRIK.....	7
2.1 Konsep Dasar Kelistrikan pada Sel	7
2.2 <i>Resting Potential</i> dan Potensial Aksi	9
2.3 Sinyal Bioelektrik.....	11
3 ELEKTROKARDIOGRAFI: DASAR-DASAR DAN ANALISIS.....	15
3.1 Dasar-Dasar EKG.....	15
3.2 Beda Potensial oleh Momen Dipol Listrik dan Pembentukan Pola EKG	18
3.3 Analisis Statistik Akurasi Sinyal EKG dari <i>Mobile Biomedical Sensor</i>	20
3.4 Pengaruh Usia dan Jenis Kelamin pada <i>Heart Rate</i>	22
3.5 Analisis Elektrokardiogram Melalui <i>Heart Rate Variability</i> untuk Deteksi Aritmia.....	23
3.6 Analisis Elektrokardiogram Melalui <i>Symbolic Recurrence Plot</i> untuk Deteksi Aritmia.....	25
3.7 Rencana Penelitian Lanjutan.....	29
4 ELEKTROENSEFALOGRAFI: DASAR-DASAR DAN ANALISIS.....	31
4.1 Dasar-Dasar EEG.....	31
4.2 Quantitative Electroencephalography (qEEG)	35
4.3 Studi Perbandingan Kualitas Rekaman <i>Consumer-grade EEG</i> dengan <i>Medical-grade EEG</i>	37
4.4 Analisis qEEG karena Stimulus Musik.....	41
4.5 Analisis qEEG pada Gangguan Jiwa: Skizofrenia	44
4.6 Analisis qEEG pada Gangguan Jiwa: Bipolar	46
4.7 Analisis qEEG untuk Deteksi <i>Virtual Reality Sickness</i>	51
4.8 Rencana Penelitian Lanjutan.....	57
5 PENUTUP	59

6 UCAPAN TERIMA KASIH	61
DAFTAR PUSTAKA	63
CURRICULUM VITAE	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Interaksi Fisika dan Biologi: pengembangan model fisis dan aplikasi pada sistem biologi.	2
Gambar 1.2	Topik penelitian elektrofisiologi dipandang dari berbagai disiplin ilmu.....	3
Gambar 2.1	Sel dan diagram pengukuran potensial membran (Guyton dan Hall, 2011; OpenStax College, 2013)	7
Gambar 2.2	Potensial aksi: (a) neuron, (b) sel otot jantung dan (c) sel otoritmik jantung.	11
Gambar 2.3	Pembentukan sinyal EEG: (a) EPSP dangkal, (b) EPSP dalam, dan (c) sinyal EEG.	12
Gambar 3.1	Tampilan EKG dari (a) Apple Watch seri 4 dan (b) Samsung Galaxy Watch3 (apple.com, 2024; samsung.com, 2024).....	15
Gambar 3.2	Tampilan perangkat keras (a) KardiaMobile 6L, (b) Cobra4 electrophysiology dan (c) Fukuda M.E. Cardisuny type C100	16
Gambar 3.3	Sadapan ekstremitas: (a) Vektor yang menghubungkan elektroda ekstremitas standar dan (b) Bidang frontal dengan lingkaran yang ditandai dalam derajat.	18
Gambar 3.4	Muatan dalam sel otot jantung terjadi berpasangan sebagai dipol Listrik: (a) Keadaan <i>resting</i> , (b) proses depolarisasi, (c) telah selesai terdepolarisasi, dan (d) proses repolarisasi (Hobbie & Roth, 2015).....	18
Gambar 3.5	Geometri untuk menghitung beda potensial antara dua titik (B dan A) yang disebabkan oleh momen dipol p	19
Gambar 3.6	Proses pembetulan gelombang EKG pada sadapan I, II dan III (©10ebyu10e, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license).	20
Gambar 3.7	(a) Comparison of HR values obtained from KardiaMobile and clinical ECG and (b) linear regression for HR obtained from KardiaMobile and clinical ECG (Rahmansyah dkk., 2024)	21

Gambar 3.8	(a) Kurva HR terhadap usia dan (b) diagram HR terhadap jenis kelamin pada tiap kelompok usia.	23
Gambar 3.9	Penentuan Interval RR untuk seluruh sinyal EKG pada elektrokardiogram	25
Gambar 3.10	SRP untuk Subjek: (a) FA-NHR, (b) FA-takikardia, (c) NSR, (d) FA-NHR dan (e) FA-bradikardia	27
Gambar 4.1	Perangkat utama EEG: (a) EEG Neurosoft Neuron-Spectrum-63 (b) EEG Emotiv Epoc X (Emotiv, 2024; Neurosoft, 2024)	32
Gambar 4.2	Posisi elektroda pada kulit kepala: (a) Pengaturan IS 10-20, (b) 19+2 elektroda dan (c) 14+2 elektroda (Sanei & Chambers, 2022; Emotiv, 2019).....	33
Gambar 4.3	Montase yang digunakan: (a) montase bipolar longitudinal, (b) montase bipolar transversal dan (c) montase refensial.	35
Gambar 4.4	Skema pembagian data sinyal hasil pengukuran EEG menjadi beberapa segmen pada periodogram Welch.....	37
Gambar 4.5	Contoh tes memori verbal: kategori dan pertanyaannya (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)	37
Gambar 4.6	Diagram batang untuk nilai puncak PSD antara M-EEG dan C-EEG untuk kondisi istirahat: (a) mata tertutup dan (b) mata terbuka (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)	38
Gambar 4.7	Diagram batang untuk pergeseran IPAF antara M-EEG dan C-EEG pada kondisi (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, dan (d) istirahat (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)	40
Gambar 4.8	Diagram metode eksperimen (S N Khotimah dkk., 2019).....	42
Gambar 4.9	Spektrum daya pita alfa dan pemetaannya ketika subjek dalam keadaan istirahat (tanpa musik) dan sedang mendengarkan musik (S N Khotimah dkk., 2019).	42
Gambar 4.10	Pengaruh <i>loudness</i> pada <i>spectral</i> daya pita alfa dan beta (S N Khotimah dkk., 2019).....	43
Gambar 4.11	Kenaikan tempo sebuah lagu pada spectral daya: (a) pita alfa dan (b) pita beta (S N Khotimah dkk., 2019)	43
Gambar 4.12	Ilustrasi gejala pada penderita skizofrenia.....	44
Gambar 4.13	Kurva PSD: (atas) subjek sehat dan (bawah) pasien skizofrenia (Akbar dkk., 2016)	45

Gambar 4.14	<i>brain mapping</i> pada rentang frekuensi (1) delta, (2) theta, (3) alpha, (4) beta, (5) gamma untuk (a) subjek sehat, (b) pasien skizofrenia (Akbar dkk., 2016).....	46
Gambar 4.15	Ilustrasi gejala gangguan bipolar (flaticon.com).....	46
Gambar 4.16	spektrum daya dalam keadaan istirahat: (atas) gangguan bipolar dan (bawah) subjek sehat (Handayani dkk., 2017).....	47
Gambar 4.17	<i>brain mapping</i> pada rentang frekuensi (a) delta, (b) theta, (c) alpha dan (d) beta untuk (atas) gangguan bipolar dan (bawah) subjek sehat (Handayani dkk., 2017).....	49
Gambar 4.18	Konfigurasi penempatan elektroda EEG (a) Montase referensial (b) Peserta mengenakan topi dengan elektroda EEG dan HMD (Suwandi dkk., 2023a).....	52
Gambar 4.19	Desain protokol eksperimen untuk akuisisi data (Suwandi, dkk., 2023a).....	53
Gambar 4.20	Skor rata-rata SSQ untuk tiga tahap: awal, setelah VR berbasis layar, dan setelah VR berbasis HMD (Suwandi, dkk., 2023a).....	54
Gambar 4.21	<i>Brain maps</i> dari seorang subjek saat melihat VR (Suwandi, dkk., 2023a).....	55
Gambar 4.22	Perubahan nilai rata-rata PSD dari kondisi dasar - setelah VR berbasis layar - setelah VR berbasis HMD pada rentang frekuensi: (a) alfa (8-13Hz) dan (b) beta rendah (13-21 Hz). * tanda menunjukkan bahwa $p < 0,05$ (Suwandi, dkk., 2023a).....	56
Gambar 4.23	Pergeseran nilai rata-rata frekuensi puncak dari: (a) pita alfa dan (b) pita beta rendah dari kondisi dasar - setelah VR berbasis layar - setelah VR berbasis HMD. * tanda menunjukkan bahwa $p < 0,05$ (Suwandi, dkk., 2023a).....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Perkembangan peralatan untuk <i>imaging</i> dan elektrofisiologi.....	1
Tabel 1.2	Rentang nilai amplitudo dan lebar pita frekuensi pada sinyal listrik dari beberapa elektrogram	4
Tabel 2.1	Potensial membran dalam keadaan <i>resting</i> dan konsentrasi ion untuk beberapa jenis sel.....	8
Tabel 3.1	Karakteristik alat EKG: KardiaMobile 6L, Cobra4 electrophysiology dan EKG klinis.....	17
Tabel 3.2.	<i>Percent difference</i> bacaan HR dari KardiaMobile dan clinical ECG (Rahmansyah dkk., 2024).	21
Tabel 3.3	Data HR subjek berdasarkan umur dan jenis kelamin	22
Tabel 3.4	Parameter HRV untuk 5 subjek dengan variasi kondisi rytme jantung dan nilai <i>heart rate</i>	25
Tabel 3.5	Warna simbol tiap kelompok.....	26
Tabel 3.6	Metrik pada SRP.....	28
Tabel 4.1	Perbandingan spesifikasi perangkat EEG tingkat medis dan tingkat konsumen	32
Tabel 4.2	<i>p</i> -value, MAPE, dan MSE nilai puncak PSD antara M-EEG dan C-EEG (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)	39
Tabel 4.3	<i>p</i> -value dan MSE untuk pergeseran IPAF antara M-EEG dan C-EEG (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)	40
Tabel 4.4	Musik instrumental dengan variasi volume dan tempo	41
Tabel 4.5	Nilai rata-rata daya sinyal EEG untuk pita frekuensi delta, theta, alfa dan beta pada gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS) (Handayani dkk., 2017).....	48
Tabel 4.6	Koherensi <i>intra-hemisphere</i> untuk pita frekuensi delta, theta, alfa dan beta pada gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS) (Handayani dkk., 2017).....	50
Tabel 4.7	Koherensi <i>inter-hemisphere</i> untuk pita frekuensi delta, theta, alfa, dan beta pada gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS) (Handayani dkk., 2017).	50

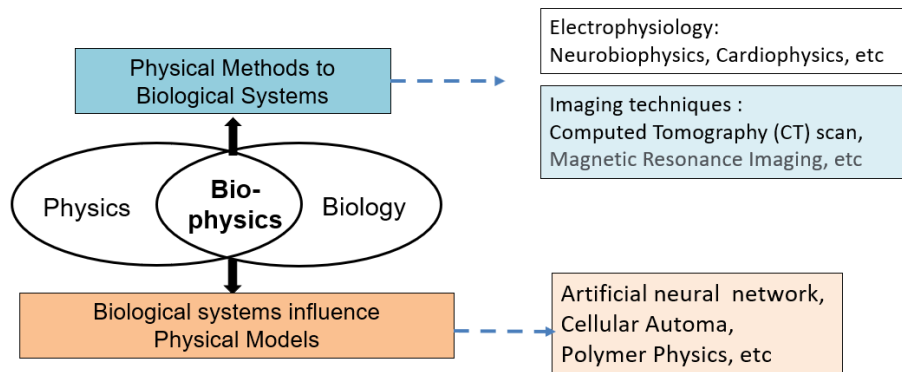
1 SEJARAH DAN PERAN BIOFISIKA PADA PERKEMBANGAN ELEKTROFISIOLOGI

Interaksi antara fisika dan biologi dimulai pada abad ke-20. Interaksi ini dicirikan dengan penerapan metode fisika untuk mempelajari proses-proses biologi dan dinamakan cabang ilmu biofisika (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022). Ilmuwan Jerman mendominasi bidang biofisika terutama tentang efek radiasi medan elektromagnetik pada makhluk hidup. Popularitas biofisika meningkat ketika fisikawan Austria bernama Erwin Schrödinger menerbitkan buku *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* pada tahun 1944. Erwin Schrödinger mengajukan ide bahwa terdapat molekul pada makhluk hidup yang mengandung informasi genetik dalam ikatan kovalen. Hal ini menginspirasi ilmuwan seperti James Watson dan Francis Crick untuk mencari dan mengarakterisasi molekul genetik tersebut dan dengan bantuan penelitian kristalografi sinar-X Rosalind Franklin, mereka menemukan struktur heliks ganda DNA pada tahun 1953 (Mierke, 2020).

Tabel 1.1 Perkembangan peralatan untuk *imaging* dan elektrofisiologi

Peralatan	Tahun	Peralatan	Tahun
Ultrasonic Imaging	1955	Electrocardiograph	1903
Positron Emission Tomography (PET) imaging	1970	Electroencephalograph	1924
Computed Tomography (CT) scan	1973	Electromyograph	1960
Magnetic Resonance Imaging (MRI):	1977	Electrooculograph	1975

Pada pertengahan abad ke-20, program biofisika sudah merambah di negara-negara lain dan kita telah melihat perkembangan secara pesat alat-alat eksperimen yang menjadikan lebih banyak eksperimen kuantitatif (Tabel 1.1). Hal ini didorong oleh interaksi yang kompleks antara sains (biologi, kimia dan fisika) dan teknik yang diserap ke dalam biologi dan dikenal sebagai “biologi kuantitatif,” seperti *computational and systems neuroscience*, *computational biology*, dan banyak subbidang lainnya. Biofisika dan biologi kuantitatif tumpang tindih, baik dalam metode maupun tujuan. Interaksi antara fisika dan biologi meliputi penerapan metode fisika untuk mempelajari proses biologis dan penerapan proses sistem biologi pada model fisis (Gambar 1.1).



Gambar 1.1 Interaksi Fisika dan Biologi: pengembangan model fisis dan aplikasi pada sistem biologi.

Salah satu contoh model fisis yang dipengaruhi cara kerja sistem saraf adalah model *cellular automata* oleh John von Neumann dan Stanislaw Ulam di Los Alamos National Laboratory pada tahun 1940-an. *Cellular automata* meniru logika berpikir pada proses sistem saraf di otak. Automata untuk otak adalah neuron (sel saraf) yang menerima *input* di bagian dendrit untuk diproses di *cell body* dan *output*-nya dihantarkan menuju terminal axon. Selular automata belum dapat dijadikan sebagai model dari pada jaringan neural biologis, tetapi merupakan model yang mengambil berbagai aspek dari jaringan neural biologis yang mempunyai kemampuan *intelligent* yang cukup menarik. Salah satu fungsi dari model ini ialah mereduksi jumlah parameter sistem sehingga kita dapat mengerti dengan baik secara analitis dan komputasi (Eberhart & Dobbins, 1990; Khotimah & Liong, 2002). Sistem selular automata dua dimensi telah terbukti sebagai alat pemodelan yang berguna pada bidang-bidang ilmu seperti: fisika pertumbuhan, kimia fisik, dan hidrodinamika (Weisbuch, 2019) serta pemodelan lalu lintas pejalan kaki di kota (Georgiadi dkk., 2022). Metode ini juga mampu menyimulasikan proses-proses alamiah, seperti pigmentasi *shell* moluska (Markus dkk., 1999). Hal ini dikarenakan sistem selular automata memungkinkan untuk menelusuri mekanisme interaksi antar-titik kisi (automata) dan mengamati keadaan automata pada setiap saat dalam iterasi.

Penerapan metode Fisika pada sistem biologi banyak dijumpai pada bidang elektrofisiologi. *Electrophysiology* adalah kata majemuk yang berasal dari bahasa Yunani, merupakan gabungan dari kata *electron*, *physics* dan *logia*. Elektrofisiologi adalah cabang ilmu yang mempelajari sifat listrik pada sel,

jaringan dan organ biologis. Topik penelitian elektrofisiologi melibatkan kajian dari beberapa disiplin ilmu (Gambar 1.2). Di ITB, bidang ini dipelajari melalui sejumlah mata kuliah di sejumlah prodi pada kurikulum 2019 (SIX ITB), yaitu prodi Fisika FMIPA (mata kuliah pilihan S-1 'Elektrofisiologi dan Bioenergetika' dari KK Fisika Nuklir dan Biofisika), Biologi SITH (mata kuliah S-1 'Anatomi dan Fisiologi Hewan' dan 'Fisiologi Tumbuhan', mata kuliah S-2 'Fisiologi Lanjut' dari KK Fisiologi, Perkembangan Hewan dan Sains Biomedika), Teknik Biomedis STEI (mata kuliah S-1 'Anatomi dan Fisiologi I', 'Anatomi dan Fisiologi II' dari KK Teknik Biomedis), Sain dan Teknologi Farmasi SF (mata kuliah S-1 'Anatomi dan Fisiologi Manusia I' dan 'Anatomi dan Fisiologi Manusia II' dari KK Farmakologi-Farmasi Klinik), Teknik Fisika FTI (mata kuliah S-2 'Pengolahan Sinyal dan Citra' dari KK Instrumentasi dan Kontrol).

Topik penelitian elektrofisiologi yang berisiko tinggi seperti pada organ jantung dan otak dikaji secara medis pada bidang cabang ilmu kedokteran, yaitu kardiologi, psikiatri, dan neurologi. Kondisi mental dapat memengaruhi kesehatan jantung dan sebaliknya. Psikolog memeriksa dan menilai kemampuan intelektual dan kesehatan mental seseorang melalui wawancara psikologis dan psikotes maka psikologi juga berperan di sini.



Gambar 1.2 Topik penelitian elektrofisiologi dipandang dari berbagai disiplin ilmu.

Elektrokardiogram (EKG atau ECG), elektroensefalogram (EEG), elektromiogram (EMG), dan elektrookulogram (EOG) mengukur biopotensial dari aktivitas kelistrikan organ atau jaringan. Elektrogram ini berguna untuk

elektrodiagnosis klinis dan pemantauan. Namun, amplitudo dan *bandwidth* pengukuran ini bervariasi untuk masing-masing electrogram seperti terlihat pada Tabel 1.2 oleh Thakor (2015) pada bab 26 buku berjudul *Telehealth and Mobile Health*.

Tabel 1.2 Rentang nilai amplitudo dan lebar pita frekuensi pada sinyal listrik dari beberapa elektrogram

Modalitas	Singkatan elektrogram	Organ/jaringan	Prevalensi dalam klinis	Amplitudo (mV)	Pita frekuensi (Hz)
<i>Elektroensefalograf</i>	<i>EEG</i>	Otak (korteks serebral)	Agak umum	0,001 – 0,01	0,2 - 100
<i>Elektrokardiograf</i>	<i>EKG (ECG)</i>	Jantung (otot jantung)	Sangat umum	0,5 – 5	0,01 - 250
<i>Elektromiograf</i>	<i>EMG</i>	Otot rangka	Agak umum	1 – 10	20 – 2000
<i>Elektrookulograf</i>	<i>EOG</i>	Seluruh bola mata	Agak umum	0,01 – 0,1	dc - 10

Pada rekaman biopotensial, seperti EEG, ECG, EMG dan EMG sangat mungkin terdapat bising (*noise*) dan artefak (*artifact*) yang tidak membawa informasi apapun tentang sinyal yang diinginkan. *Noise* biasanya bersifat acak dan bersumber dari luar tubuh, seperti peralatan dan lingkungan. Di laboratorium, listrik dengan frekuensi 50 Hz menciptakan medan elektromagnetik di sekitar kabel listrik dan peralatan listrik (dikenal sebagai *powerline noise*) yang mungkin ditangkap oleh sensor biopotensial. Sedangkan artefak merupakan signal terekam yang bukan berasal dari aktivitas organ yang sedang diteliti; artefak fisiologis bersumber dari pasien. Penelitian di sub-KK Biofisika dari KK Fisika Nuklir dan Biofisika, hanya melakukan sadapan non-invasi dengan penempatan sejumlah elektroda pada permukaan kulit dari jaringan biologis yang diukur. Ada banyak hal yang terjadi di bawah kulit yang dapat menyebabkan gangguan, seperti organ yang berbeda saling tumpang tindih sehingga akan menghasilkan signal yang tumpang tindih. Pergerakan, baik yang disengaja maupun tidak, tidak dapat dihindari di sebagian besar penelitian. Penanganannya akan dibahas secara terpisah untuk masing-masing jenis elektrogram.

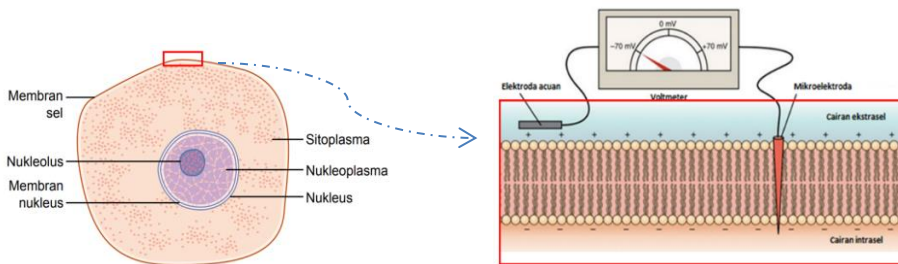
Electroensefalografi dan elektrokardiografi akan dibahas lebih lanjut karena beberapa alasan di antaranya adalah relevansi klinis, popularitas dalam penelitian, aksesibilitas, dan aplikasinya. EEG dan EKG masing-masing digunakan dalam pengaturan klinis untuk mendiagnosis berbagai kondisi

neurologis dan jantung. Gangguan seperti epilepsi, gangguan, cedera kepala, dan gangguan jiwa sering kali didiagnosis menggunakan EEG, sedangkan EKG sangat penting dalam mendiagnosis kondisi jantung seperti aritmia dan *myocardial infarctions*. Aksesibilitas pada peralatan EEG dan ECG tersedia banyak di pasaran. EEG dan EKG memiliki beragam aplikasi di luar diagnosis dan penelitian klinis. EEG, misalnya, digunakan dalam antarmuka otak-komputer (*Brain-Computer Interface*) dan terapi *neurofeedback*, sedangkan ECG digunakan dalam *monitoring* kebugaran dan kesehatan.

2 KELISTRIKAN PADA SEL: DARI KONSEP DASAR HINGGA SINYAL BIOELEKTRIK

2.1 Konsep Dasar Kelistrikan pada Sel

Pada organisme multiseluler, sel-sel yang memiliki bentuk dan fungsi yang sama membentuk jaringan yang membangun organ. Setiap jenis sel beradaptasi secara khusus untuk melakukan satu atau beberapa fungsi tertentu. Namun, semua sel mempunyai karakteristik dasar tertentu yang serupa (Guyton dan Hall, 2011). Sel diselubungi membran sel yang memisahkan sitoplasma dan cairan ekstrasel yang berada di ruang di luar sel.



Gambar 2.1 Sel dan diagram pengukuran potensial membran (Guyton dan Hall, 2011; OpenStax College, 2013)

Sel hidup memiliki *resting potential* di mana potensial listrik sisi dalam sel lebih rendah dibandingkan sisi luar sel. Diagram pengukuran membrane diperlihatkan pada Gambar 2.1. *Resting potential* merupakan nilai potensial membran di mana gaya elektrokimia semua ion seimbang atau fluks total bernilai nol. Nilai resting potensial ini berkaitan dengan distribusi ion melintas membran sel. Ion terpenting yang berkontribusi terhadap potensial membran adalah K^+ , Na^+ dan Cl^- (Tabel 2.1). Konsentrasi K^+ lebih tinggi di dalam sel dibandingkan di luar, tetapi sebaliknya untuk Na^+ dan Cl^- yang memiliki konsentrasi lebih tinggi di luar dibandingkan di dalam sel.

Pergerakan ion melalui membran sel diatur oleh tiga pengaruh utama, yaitu (1) difusi dari konsentrasi tinggi ke rendah, (2) gaya listrik yang menggerakkan ion positif menuju sisi membran yang bermuatan negatif (berpotensial rendah) dan sebaliknya (ion negatif menuju sisi membran yang bermuatan positif), dan (3) permeabilitas membran terhadap ion-ion tertentu

yang dikenal sebagai sifat membran yang semipermeabel. Dalam termodinamika, pergerakan ion j dari satu tempat ke tempat lain diungkapkan dalam besaran potensial kimia yang memasukkan semua bentuk energi penyebab gerak yang disebabkan karena beda konsentrasi, beda tekanan, beda potensial listrik, dan beda ketinggian seperti pada Persamaan (1) (Nobel, 1974).

Tabel 2.1 Potensial membran dalam keadaan *resting* dan konsentrasi ion untuk beberapa jenis sel

No	Nama sel/jaringan	Resting Potential (mV)	Konsentrasi ion K ⁺ (mM)		Konsentrasi ion Na ⁺ (mM)		Konsentrasi ion Cl ⁻ (mM)		Pustaka
			Intra-sel	Ekstrasel	Intra-sel	Ekstrasel	Intra-sel	Ekstrasel	
1	Sel saraf mamalia	-70	150	5	15	145	9	125	Hobbie & Roth, 2015; Sanei & Chambers, 2007
2	Axon cumi	-62	345	10	72	455	61	540	Tarjan, 1987
3	Sel ventrikel jantung	-90	150	4	20	145	4	120	Klabunde, 2017
4	Sel Chara corallina (ganggang air tawar)	-170*	110,0	0,1	5,0	0,1	22,0	0,4	Johnson dkk., 2002; *MacRobbie, 1970.
5	Sel Valonia ventricose (ganggang laut)	-71*	434	12,1	40	508	138	596	*MacRobbie, 1970; Gutknecht, 1966
6	Otot katak	-92	139	2,5	20	120	3,8	120	Tarjan, 1987
7	Otot tikus	-92	180	4,5	12	150	3,8	110	Tarjan, 1987

cairan intrasel = sitoplasma

$$\mu_j = \mu_j^* + RT \ln C_j + \bar{V}_j P + z_j F \psi + m_j g h \quad (1)$$

dengan μ_j^* : potensial kimia acuan, R : konstanta gas, T : temperatur absolut, C : konsentrasi, \bar{V}_j : pertambahan volume sistem per mol, P : tekanan hidrostatis, z : valensi ion, F : konstanta Faraday, ψ : potensial Listrik, m : massa per mol, g : percepatan gravitasi, h : tinggi posisi dari acuan.

Ketika temperatur dan tekanan dijaga konstan maka yang berperan adalah pengaruh beda konsentrasi dan beda potensial listrik pada pergerakan ion melalui membran plasmalemma yang tipis. Pada transport melalui membran yang tipis, kontribusi beda tekanan dan beda ketinggian dapat diabaikan pada beda potensial kimia. Potensial listrik yang menyeimbangkan gradien konsentrasi ion j disebut potensial Nernst untuk ion j . Persamaan Nernst

diperoleh jika potensial kimia untuk ion j di dalam sel dan di luar sel memiliki nilai yang sama, yaitu:

$$\Psi_j = \frac{RT}{z_j F} \ln \left(\frac{c_j^o}{c_j^i} \right) \quad (2)$$

Potensial Nernst dapat dihitung dengan menggunakan data konsentrasi ion (Tabel 2.1) untuk sel saraf mamalia pada suhu 37 °C. Na⁺ lebih terkonsentrasi di luar sel, mempunyai potensial Nernst positif (+60,6 mV) serta cenderung mendepolarisasi sel (membuat bagian dalam lebih positif). K⁺ lebih terkonsentrasi di dalam, mempunyai potensial Nernst negatif (-90,8 mV) dan cenderung menyebabkan hiperpolarisasi sel (membuat bagian dalam lebih negatif). Cl⁻ lebih terkonsentrasi di luar, mempunyai potensial Nernst negatif (-70,2 mV) dan cenderung menyebabkan hiperpolarisasi sel.

Apabila potensial Nernst ion j tidak sama dengan potensial membran, maka ion tersebut tidak dalam kesetimbangan sebab terdapat beda potensial kimia untuk ion j antara di dalam dan di luar sel.

$$\mu_j^i - \mu_j^o = z_j F (\Psi_m - \Psi_j) \quad (3)$$

Transport pasif akan menuju ke tempat yang potensial kimianya lebih rendah (*downhill*). Sebaliknya, transport aktif itu *uphill* yang perlu *pumping* energi dari luar. Gaya penggerak elektrokimia bertanggung jawab atas fluks ion secara netto untuk ion j , yaitu:

$$\Delta\Psi = \Psi_m - \Psi_j \quad (4)$$

2.2 Resting Potential dan Potensial Aksi

Fluks netto dari ion j dapat dihitung sebagai hasil kali gaya penggerak ($\Delta\Psi$) dan konduktansi ionik (g_j), yaitu konduktansi membran dengan saluran ion yang tertanam untuk ion tersebut.

$$I_j[\text{nanoAmpere}] = g_j[\text{mikroSiemens}] \cdot \Delta\Psi[\text{miliVolt}]$$

Fluks ion (arus) total melintasi membran adalah jumlah dari semua arus ion. Kita mendefinisikan arus total membran sebagai arus melintasi membran ke arah luar dari pergerakan muatan positif.

$$I_{total} = I_{K^+} + I_{Na^+} + I_{Cl^-}$$

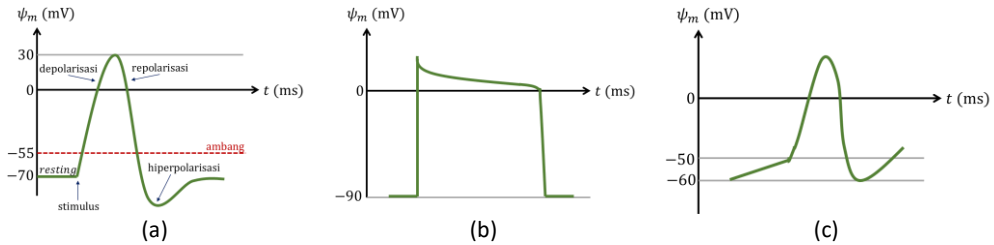
$$I_{total} = g_{K^+}(\Psi_m - \Psi_{K^+}) + g_{Na^+}(\Psi_m - \Psi_{Na^+}) + g_{Cl^-}(\Psi_m - \Psi_{Cl^-}) \quad (5)$$

Resting potential (Ψ_{rest}) tercapai ketika total arus membran adalah nol, yaitu ketika elektronetralitas tetap terjaga (Lüttge & Higinbotham, 1979). Dengan demikian, *resting potential* dari membran (Ψ_{rest}) berkorelasi dengan potensial Nernst dari semua ion yang melintasi membran. Pengaruh masing-masing ion bergantung pada permeabilitasnya. Ion yang lebih permeabel akan memberikan pengaruh yang lebih besar daripada ion yang kurang permeabel. *Resting potential* didominasi oleh ion yang paling permeabel.

$$\Psi_{rest} = \frac{(\Psi_{K^+}) + \left(\frac{g_{Na^+}}{g_{K^+}} \Psi_{Na^+}\right) + \left(\frac{g_{Cl^-}}{g_{K^+}} \Psi_{Cl^-}\right)}{1 + \frac{g_{Na^+}}{g_{K^+}} + \frac{g_{Cl^-}}{g_{K^+}}} \quad (6)$$

Pemahaman kita tentang rangsangan terhadap membran sel adalah terutama didasarkan pada studi potensial aksi dan pembangkitannya pada sel (misal pada sel ganggang, sel saraf dan sel otot hewan). Respons sel terhadap stimulus yang melampaui nilai ambang menghasilkan potensial aksi yang ditandai dengan perubahan cepat dari potensial membran terhadap waktu pada lokasi sel tertentu. Sel chara corallina menghasilkan potensial aksi sebagai respons terhadap stimulus mekanis, cedera, atau rangsangan listrik langsung (Johnson dkk., 2002). Stimulus listrik mudah dilakukan secara eksperimen dikarenakan bisa diatur nilai parameter kelistrikkannya (amplitudo, durasi, frekuensi) dan bentuk pulsanya (Chen dkk., 2019). Kurva potensial aksi sebuah sel diperlihatkan pada Gambar 2.2 (a) yang dinyatakan dalam tegangan membran terhadap waktu. Pada keadaan istirahat, potensial membran adalah -70 mV. Sel mulai terdepolarisasi ketika dikenai stimulus eksternal. Jika tegangan membran mencapai nilai ambang (-55 mV) maka terjadi potensial aksi. Potensial membran mulai naik dengan cepat menuju ke $+30$ mV, kemudian sel mengalami repolarisasi, yaitu potensial membran menuju ke nilai negatif melewati nilai *resting potential*, menghasilkan hiperpolarisasi, lalu tegangan membran segera kembali ke nilai potensial *restingnya*. Potensial aksi berakhir ketika potensial membran kembali ke nilai *restingnya*. Namun demikian, potensial aksi sel otot jantung dan sel otoritmik jantung terlihat sedikit berbeda dibandingkan potensial aksi sebuah sel pada umumnya. Sel otoritmik jantung tidak benar-benar memiliki *resting potential* (Gambar 2.2 (c)), siklus potensial aksi sel otoritmik jantung akan

berulang terus menerus, sesuai umur kita. Kelompok sel ini disebut sinoatrial (SA) node. Sel-sel ini biasanya mengalami potensial aksi dengan frekuensi 60 hingga 100 kali per menit, tetapi dapat sangat bervariasi tergantung pada aktivitas otonom sistem saraf dan aktivitas fisik tubuh (Thaler, 2019).



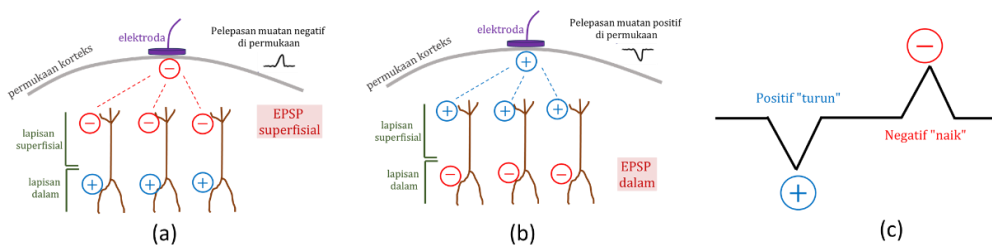
Gambar 2.2 Potensial aksi: (a) neuron, (b) sel otot jantung dan (c) sel otoritmik jantung.

2.3 Sinyal Bioelektrik

Sinyal bioelektrik adalah sinyal fisiologis dari aktivitas kelistrikan oleh sel saraf dan sel otot. Sinyal ini berasal dari potensial membran pada tingkat sel yang pada kondisi tereksitasi akan menghasilkan potensial aksi. Dalam sistem saraf, potensial aksi mengirimkan sinyal melalui satu neuron, neuron-neuron berkomunikasi satu sama lain pada sinapsis melalui neurotransmitter. Glutamat adalah salah satu contoh neurotransmitter yang berikatan dengan reseptor pascasinaps dan menyebabkan *excitatory postsynaptic potential* (EPSP) untuk mendorong depolarisasi dan penjalaran sinyal melalui jaringan neuron. Sebaliknya, neurotransmitter penghambat, seperti *gamma-aminobutyric acid* (GABA), menyebabkan *inhibitory postsynaptic potential* (IPSP) yang mendorong terjadinya hiperpolarisasi dan menghentikan penjalaran sinyal. Depolarisasi menyebabkan tegangan ekstraseluler negatif, sedangkan hiperpolarisasi menyebabkan tegangan ekstraseluler positif. Apapun yang terjadi, tegangan ekstraseluler ini ditangkap oleh elektroda EEG, yang bukan berasal dari depolarisasi tunggal melainkan penjumlahan tegangan dari banyak EPSP dan IPSP pada area korteks seluas sekitar 6 cm² yang timbul dari neuron pyramidal (Valentine, 2020).

Secara khusus, neuron kortikal tersusun pada kolom yang tegak lurus terhadap permukaan korteks. Depolarisasi pada lapisan dangkal dan lapisan dalam menyebabkan sinyal EEG yang berbeda. Depolarisasi pada lapisan dangkal, ruang ekstraseluler yang paling dekat dengan elektroda EEG bermuatan negatif, dan itulah yang terdeteksi oleh EEG. Namun, dengan

depolarisasi pada lapisan dalam, area ekstraseluler yang berada tepat di sekitar area depolarisasi adalah negatif seperti yang diharapkan dan itu berarti ruang ekstraseluler yang lebih dekat ke permukaan adalah relatif positif, dan muatan positif itulah yang terdeteksi oleh elektroda EEG dalam kasus ini. Jadi, depolarisasi dangkal menghasilkan sinyal EEG negatif (defleksi ke atas), sedangkan depolarisasi dalam menghasilkan sinyal EEG positif (defleksi ke bawah). Hal sebaliknya berlaku untuk hiperpolarisasi, yang berperilaku sama tetapi polaritasnya terbalik. Dengan demikian, untuk sinyal EEG, EPSP dangkal dan IPSP dalam terdeteksi sama, serta EPSP dalam dan IPSP dangkal terdeteksi sama oleh elektroda.



Gambar 2.3 Pembentukan sinyal EEG: (a) EPSP dangkal, (b) EPSP dalam, dan (c) sinyal EEG.

EKG, EEG, EMG, dan EOG mengukur beda potensi listrik pada permukaan jaringan hidup dari waktu ke waktu dengan menggunakan elektroda biopotensial. Elektroda biopotensial adalah transduser yang mengubah arus ionik di dalam tubuh menjadi arus elektron. Larutan elektrolit/gel ditempatkan pada sisi elektroda yang bersentuhan dengan jaringan; sisi lain elektroda terdiri atas logam konduktif yang dilekatkan pada kawat timah yang dihubungkan ke instrumen. Reaksi kimia terjadi pada antarmuka antara elektrolit dan elektroda (Lee & Kruse, 2008). Hal ini dimungkinkan oleh fenomena yang dikenal sebagai *the Helmholtz double layer*.

Pada otak, neuron-neuron berkomunikasi melalui kombinasi secara kimiawi (neurotransmitter) dan kelistrikan (gradien listrik). Electroencephalography mendeteksi gradien listrik tersebut untuk memberikan wawasan tentang aktivitas kelistrikan otak. Namun, aktivitas kelistrikan suatu neuron tunggal terlalu kecil untuk dapat dideteksi oleh EEG pada kulit kepala, sehingga apa yang kita lihat pada EEG sebenarnya merupakan penjumlahan dari aktivitas banyak neuron. Pada kenyataannya, kita memerlukan sekitar 6 sentimeter persegi (terdiri atas ribuan hingga jutaan neuron) aktivitas kortikal tersinkronisasi dalam suatu wilayah otak agar

dapat dideteksi oleh elektroda EEG pada kulit kepala (Valentine, 2020). Aktivitas listrik yang diukur dengan EEG mencerminkan berbagai fungsi otak, termasuk proses kognitif, emosi, dan kondisi kesadaran.

EKG mengukur aktivitas listrik yang dihasilkan oleh jantung. Aktivitas listrik jantung berasal dari simpul sinoatrial (SA) sebagai pacu jantung alami, dan menyebar ke seluruh otot jantung, menyebabkan jantung berkontraksi dan memompa darah. Elektroda yang dipasang pada permukaan kulit mendeteksi perubahan listrik sebagai respons terhadap aktivitas listrik jantung pada setiap detak jantung.

Baik pada EEG maupun EKG, elektroda berfungsi untuk menangkap sinyal listrik yang dihasilkan oleh jaringan biologis. Sinyal-sinyal ini kemudian diperkuat, disaring, dan diproses untuk mengekstrak informasi tentang aktivitas otak dalam kasus EEG atau fungsi jantung dalam kasus EKG.

3 ELEKTROKARDIOGRAFI: DASAR-DASAR DAN ANALISIS

3.1 Dasar-Dasar EKG

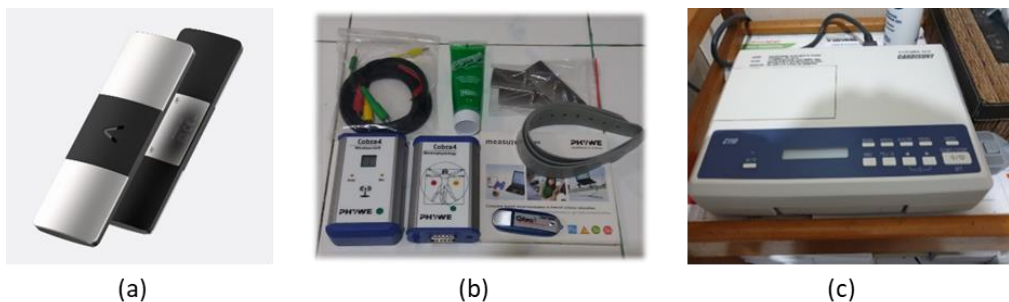
Jantung adalah organ untuk memompa darah ke seluruh tubuh, mengantarkan oksigen dan nutrisi melalui sistem pembuluh darah. Penyakit jantung memengaruhi banyak sistem organ, termasuk sistem pernapasan (Cross dkk., 2020) dan organ ginjal pada homeostasis kardiovaskular (Boudoulas dkk., 2017). Penyakit jantung iskemik dan penyakit jantung hipertensi menduduki peringkat kedua dan kedelapan dari sepuluh besar penyakit mematikan di Indonesia pada tahun 2019. Menurut data WHO, jumlah kematian per 100.000 penduduk Indonesia akibat kedua jenis penyakit jantung ini meningkat dari tahun ke tahun, yaitu 109,34 (tahun 2016), 111,81 (tahun 2017), 114,02 (tahun 2018) dan 115,94 (tahun 2019) (WHO, 2019). Elektrokardiografi berguna dalam mendeteksi kondisi medis jantung yang memungkinkan deteksi dini setiap perubahan tanda-tanda vital dan parameter kesehatan jantung melalui aktivitas kelistrikan jantung yang direpresentasikan dalam bentuk grafik. Prosedur EKG tergolong aman, cepat, dan non-invasi.



Gambar 3.1 Tampilan EKG dari (a) Apple Watch seri 4 dan (b) Samsung Galaxy Watch3 (apple.com, 2024; samsung.com, 2024).

Sejak tahun 2010-an teknologi pencatatan aktivitas kelistrikan jantung berkembang pesat, dijumpai cukup banyak perangkat untuk melakukan elektrokardiogram (EKG) dengan memanfaatkan fasilitas internet dan tanpa kabel, sebagai contoh adalah Apple Watch (Seri 4/versi lebih baru/Apple Watch Ultra) dan Samsung Galaxy Watch3 yang dapat melakukan EKG

langsung dari pergelangan tangan untuk menghasilkan EKG yang mirip sadapan tunggal/ sadapan I (Gambar 3.1). Informasi kondisi ritme detak jantung bisa dibuka lewat aplikasi. Telah ada juga di pasaran *Mobile Biomedical Sensor*, seperti KardiaMobile 1L yang merekam sinyal jantung pada lead I untuk mendeteksi kelainan irama jantung (fibrilasi atrium, bradikardia, takikardia), dan KardiaMobile 6L yang juga mampu mendeteksi irama sinus dengan PVC (*Premature Ventricular Contraction*), irama sinus dengan SVE (*Supraventrikular Extrasystole*), dan irama sinus dengan QRS lebar (AliveCor, 2024). Pada tahun 2019, KardiaMobile 6L mendapat persetujuan dari The United States Food and Drug Administration (AliveCor, 2024). KardiaMobile menentukan *heart rate* dan kondisi irama jantung dari data yang tercatat pada sadapan I. Perangkat ini menawarkan kenyamanan dan portabilitas bagi pengguna untuk dapat melakukan pengambilan EKG kapanpun dan dimanapun, tetapi perangkat tersebut mungkin tidak menggantikan keakuratan dan kemampuan diagnostik mesin EKG standar untuk klinis yang masih menggunakan elektrokardiograf dengan 12 sadapan. Tabel 3.1 memperlihatkan karakteristik dari 3 alat EKG, yaitu KardiaMobile 6L, Cobra4 electrophysiology dan EKG klinis (Gambar 3.2).



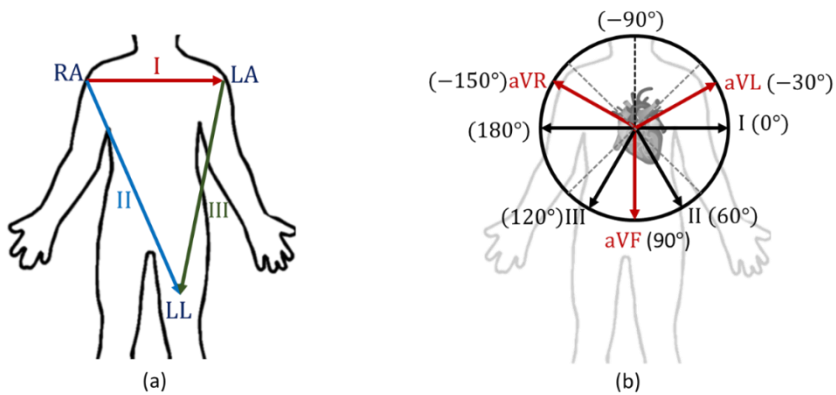
Gambar 3.2 Tampilan perangkat keras (a) KardiaMobile 6L, (b) Cobra4 electrophysiology dan (c) Fukuda M.E. Cardisun type C100

EKG sadapan tunggal (dengan dua elektroda) cukup untuk mengukur *heart rate* dan *heart rate variability* (HRV) dalam aplikasi olahraga dan kesehatan. Menempatkan elektroda tambahan di lokasi yang tepat akan memberikan gambaran fungsi jantung yang lebih menyeluruh. Dalam diagnostik medis, sistem EKG memiliki hingga 10 elektroda yang dapat memberikan 12 sadapan yang membantu dokter menilai fungsi dan struktur jantung untuk mendiagnosis aritmia kompleks.

Tabel 3.1 Karakteristik alat EKG: KardiaMobile 6L, Cobra4 electrophysiology dan EKG klinis

No	Characteristics	Biomedical Sensor for Personal Mobile Health	Educational Laboratory	Clinical ECG
1	Type of device	KardiaMobile 6L	Cobra4 Electrophysiology ECG	Fukuda M.E Cardisunyn type C100
2	Number of electrodes	3	3 (with cable)	10 (with cable)
3	Electrode placement	on the right thumb, left thumb, and on the left knee or left ankle of the subject.	on the right and left wrists and on the left ankle of the subject.	on the right and left wrists, right and left ankles, and six electrodes on the chest of the subject.
4	Recorded leads	Lead I, II, III, aVR, aVL, and aVF.	Lead I	Lead I, II, III, aVR, aVL, aVF, and V1-V6.
5	Electrocardiogram	PDF format	File data	ECG paper
6	The number of wave patterns in electrocardiogram	30-50 wave patterns for normal sinus rhythm, and more than 50 wave patterns for tachycardia.	many wave patterns can be recorded depending on the recording duration.	About 5 wave patterns for all subjects.
7	Diagnose determination	Based on lead I	Lead I	Pair 2 leads: Lead I-II, lead III-aVR, lead aVL-aVF
8	Recording time	30 seconds, all leads come out at the same time	can be up to 600 seconds	Different times for each pair of 2 leads
9	Heart rate	one HR value for each subject	HR can be measured on a suitable section of recording duration.	one HR value for each subject

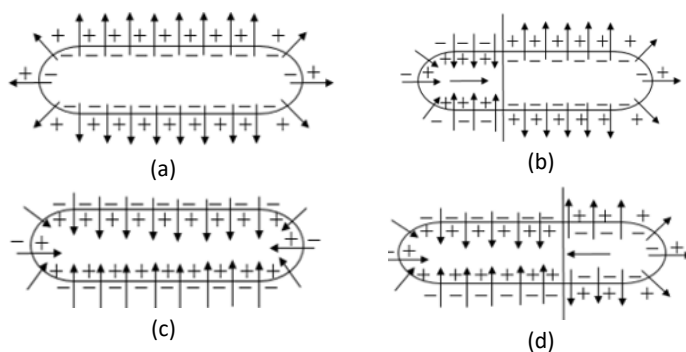
Penempatan dan konfigurasi elektroda sangat penting untuk memastikan perolehan sinyal yang akurat dan andal. Penelitian ini hanya fokus pada penempatan 3 elektroda di RA (tangan kanan), LA (tangan kiri) dan LL (kaki kiri) untuk mendapatkan sadapan ekstremitas standar (sadapan I, II, dan III) dan sadapan ekstremitas tambahan (sadapan aVL, aVR, dan aVF). Sadapan ekstremitas memandang jantung dalam bidang frontal (Gambar 3.3). Sadapan ekstremitas standar adalah sadapan bipolar dan membentuk segitiga (*Einthoven triangle*).



Gambar 3.3 Sadapan ekstremitas: (a) Vektor yang menghubungkan elektroda ekstremitas standar dan (b) Bidang frontal dengan lingkaran yang ditandai dalam derajat.

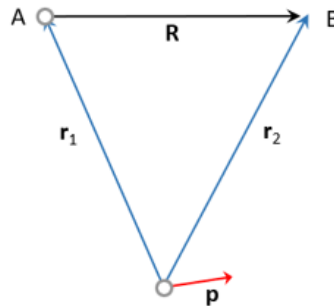
3.2 Beda Potensial oleh Momen Dipol Listrik dan Pembentukan Pola EKG

Elektrokardiogram mengukur beda potensial antara dua titik pada permukaan tubuh yang dihasilkan oleh aktivitas listrik sel otot jantung. Muatan listrik dalam sel otot jantung terjadi berpasangan sebagai dipol listrik seperti terlihat pada Gambar 3.4. Sel yang sepenuhnya telah terpolarisasi (a) atau terdepolarisasi (c) mempunyai momen dipol nol. Sel dalam proses depolarisasi (b) mempunyai momen dipol yang berarah sesuai arah penjalaran gelombang depolarisasi. Sel yang berada dalam keadaan repolarisasi (d) akan memiliki momen dipol yang berarah berlawanan dengan penjalaran gelombang repolarisasi.



Gambar 3.4 Muatan dalam sel otot jantung terjadi berpasangan sebagai dipol Listrik: (a) Keadaan *resting*, (b) proses depolarisasi, (c) telah selesai terdepolarisasi, dan (d) proses repolarisasi (Hobbie & Roth, 2015)

Model sederhana pada Gambar 3.5 digunakan untuk menentukan beda potensial antara dua titik dalam ruang akibat dipol listrik pada media non-konduktif. Kita hanya tertarik pada titik-titik pengamatan yang jaraknya relatif jauh dari jarak antar-muatan pada dipol, artinya ukuran sel otot jantung kecil sekali dibanding jarak dari otot ke permukaan tubuh.



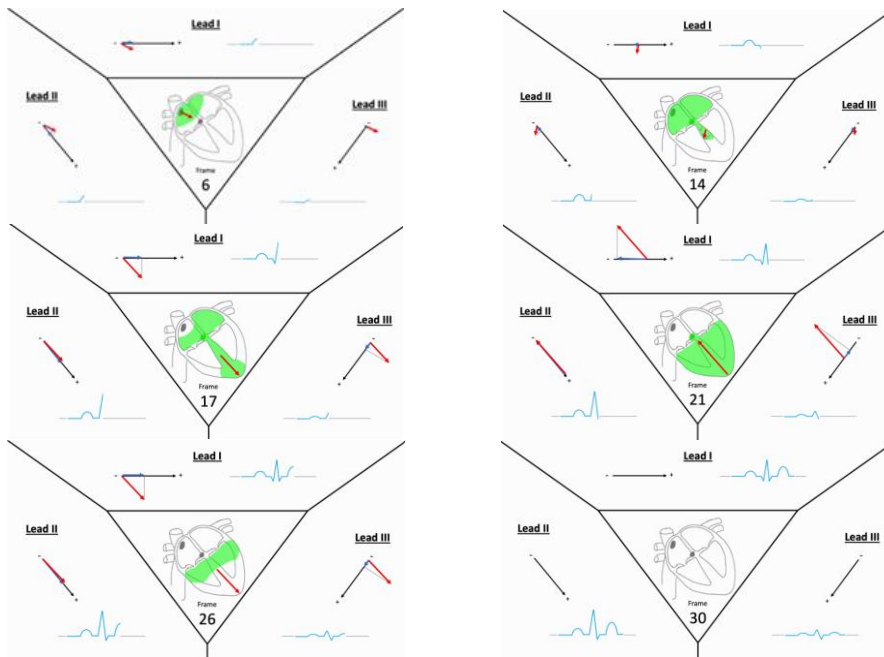
Gambar 3.5 Geometri untuk menghitung beda potensial antara dua titik (B dan A) yang disebabkan oleh momen dipol \mathbf{p}

Beda potensial antara titik B dan titik A pada posisi \mathbf{r}_2 and \mathbf{r}_1 dengan masing-masing titik berjarak r dari vektor momen dipol listrik \mathbf{p} adalah (Hobbie & Roth, 2015)

$$v_B - v_A = \frac{\mathbf{p} \cdot (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)}{4\pi\epsilon r^3} = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{R}}{4\pi\epsilon r^3} \quad (7)$$

dengan $\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \mathbf{R}$ sebagai arah sadapan (*lead*) pada EKG dan \mathbf{p} = vektor momen dipol listrik dari jantung ketika memompa darah sehingga momen dipol listrik jantung berubah berubah terhadap waktu, yaitu berubah magnitudo dan arahnya sesuai arah penjalaran gelombang depolarisasi (kontraksi) atau berlawanan arah penjalaran gelombang repolarisasi (relaksasi). *Dot product* dua vektor $\mathbf{p} \cdot \mathbf{R}$ ini akan memberikan pola gelombang EKG yang hasilnya bisa positif, negatif, atau nol.

Pada Gambar 3.6 diperlihatkan proses pembentukan gelombang PQRST hasil *dot product* vektor momen dipol listrik dari jantung dengan arah sadapan pada masing-masing *lead*. Warna hijau adalah bagian jantung yang menjalani gelombang depolarisasi dengan arah momen dipol totalnya diperlihatkan dengan tanda panah merah.



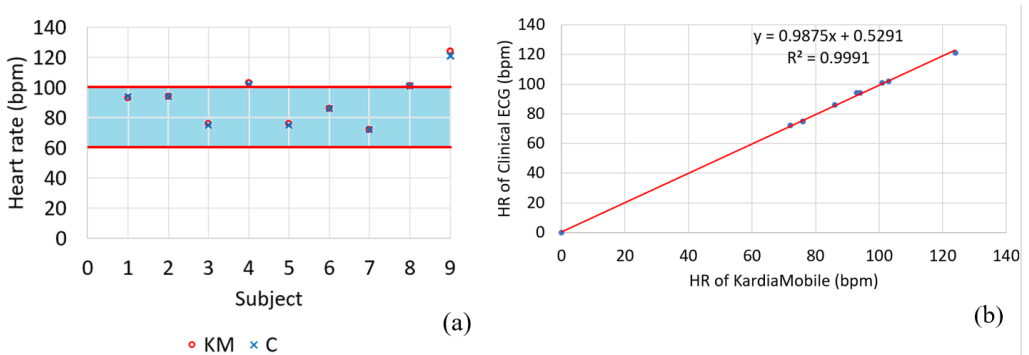
Gambar 3.6 Proses pembetulan gelombang EKG pada sadapan I, II dan III (©10ebyu10e, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license).

Artefak pada perekaman EKG di antaranya adalah gerakan pernapasan subjek yang dapat menyebabkan perubahan lambat pada garis dasar EKG seiring berjalannya waktu (penyimpangan garis dasar). Biasanya dengan mengkondisikan pasien, artefak karena pergerakan bisa dihindari dalam perekaman EKG yang hanya butuh waktu sebentar (30 detik). Artefak gerakan dari sensor, seperti sensor meluncur pada permukaan kulit, peregangan kulit atau perubahan area antarmuka, atau perubahan jarak atau diskoneksi antara elektroda dan kulit. Artefak gerakan dari sensor ini diminimalisir dengan desain elektroda yang baik dari perangkat EKG.

3.3 Analisis Statistik Akurasi Sinyal EKG dari *Mobile Biomedical Sensor*

Penelitian kami ini bertujuan untuk menganalisis akurasi sinyal elektrokardiografi dari *Mobile Biomedical Sensor* (KardiaMobile 6L). Pasien diukur menggunakan *Mobile Biomedical Sensor* dan elektrokardiograf klinis secara bersamaan untuk mendapatkan dua elektrokardiogram. Pengukuran dilakukan di klinik kesehatan di Kota Garut. Variabilitas detak jantung dari masing-masing elektrokardiogram dianalisis melalui nilai heart rate. Akurasi

hasil EKG diuji melalui nilai regresi linier (Pérez-Valero dkk., 2020), *percent difference* (PD), dan *root mean square error* (RMSE) antara hasil yang diperoleh dari kedua perangkat.



Gambar 3.7 (a) Comparison of HR values obtained from KardiaMobile and clinical ECG and (b) linear regression for HR obtained from KardiaMobile and clinical ECG (Rahmansyah dkk., 2024)

Gambar 3.7 menunjukkan enam subjek dengan HR normal (60-100 bpm) dan tiga subjek dengan kategori takikardia (>100 bpm). Gambar 3.6.a memperlihatkan bahwa nilai data HR dari KardiaMobile dan EKG klinis cukup banyak yang sama sehingga titik-titik data dari kedua alat cukup banyak yang tumpang tindih. Hasil regresi linier dari data HR kedua alat memberikan ukuran kesesuaian yang sangat baik (yaitu koefisien determinasi, $R^2 = 0,9991$ dan kemiringan kurva = 0,9875).

Percent difference bacaan HR dari kedua alat dihitung untuk masing-masing subjek dan hasilnya diperlihatkan pada Tabel 3.2. Ambang batas sebesar 3% untuk *percent difference* digunakan karena telah kami lakukan bahwa ketika seseorang dalam kondisi tertentu diukur sebanyak delapan kali pengukuran secara terus menerus dengan KardiaMobile akan menghasilkan *percent difference* sekitar 3%. Dengan demikian, *percent difference* dari kedua alat pada HR setiap subjek adalah di bawah ambang batas dan bisa diterima

Tabel 3.2. *Percent difference* bacaan HR dari KardiaMobile dan clinical ECG (Rahmansyah dkk., 2024).

Subject	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
PD (%)	1.1	0	1.3	1.0	1.3	0	0	0	2.6

Sedangkan nilai RMSE antara HR yang diperoleh dari kedua perangkat adalah:

$$RMSE_{HR} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (HR_{KM_i} - HR_{C_i})^2} = 1,202 \quad (8)$$

dengan i adalah subjek- i , n adalah jumlah total semua subjek.

Nilai RMSE = 1,202 dari 9 subjek dengan rentang nilai HR (72 -124 bpm) ini cukup kecil yaitu kurang dari 3% nilai HR.

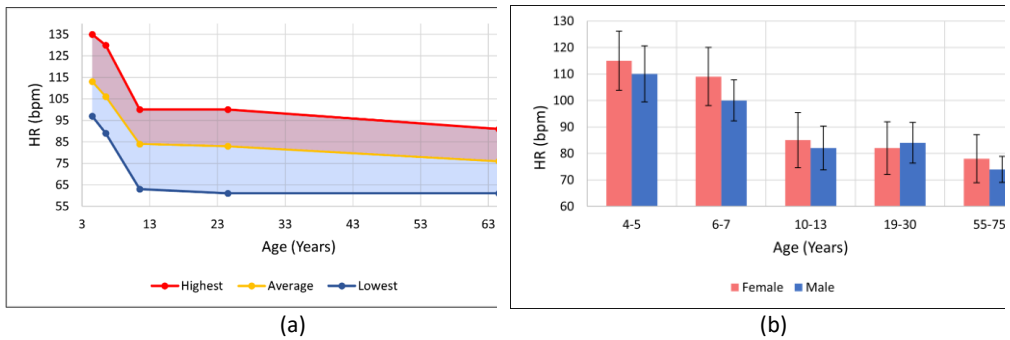
Dari hasil regresi linier, *percent difference* (PD), dan *Root Mean Square Error* (RMSE) dapat disimpulkan bahwa KardiaMobile memiliki akurasi yang setara dengan elektrokardiograf klinis dalam menentukan HR. Ini menunjukkan validasi alat (KardiaMobile 6L) yang digunakan, yaitu setara dengan alat klinis dalam penentuan HR.

3.4 Pengaruh Usia dan Jenis Kelamin pada *Heart Rate*

Heart rate dapat dipengaruhi oleh aktivitas fisik (latihan kardio) dan aktivitas non fisik (seperti usia, jenis kelamin, dan indeks massa tubuh). HR umumnya akan menurun seiring bertambahnya usia dari 40 tahun menjadi lebih dari 80 tahun (Santos dkk., 2013; Zhang, 2007). Penelitian ini mengukur HR dari pengaruh umur pada usia 4 tahun (anak-anak) hingga 75 tahun (lansia) dengan hipotesis terjadi perbedaan perubahan nilai *heart rate* terhadap usia pada remaja. *Heart rate* diukur menggunakan KardiaMobile 6L yang sudah teruji akurasinya dan bisa digunakan pada subjek berbagai usia dari usia sekitar 4 tahun yang sudah mampu memegang alat secara mandiri. Distribusi subjek penelitian berdasarkan umur dan jenis kelamin dituliskan pada Tabel 3. 3.

Tabel 3.3 Data HR subjek berdasarkan umur dan jenis kelamin

Age Group (years)	Gender	The number of subjects	Percentage (%)	HR (bpm) ($\overline{HR} \pm SD$)	HR (bpm)		
					average	lowest	highest
A (4-5)	Female	11	47.8	115 ± 11.2	113	97	135
	Male	12	52.2	110 ± 10.6			
B (6-7)	Female	13	65.0	109 ± 11.0	106	89	130
	Male	7	35.0	100 ± 7.8			
C (10-13)	Female	22	59.5	85 ± 8.3	84	63	100
	Male	15	40.1	82 ± 10			
D (19-30)	Female	30	41.7	82 ± 7.7	83	61	100
	Male	42	58.3	84 ± 9.9			
E (55-75)	Female	8	50.0	78 ± 4.9	76	61	91
	Male	8	50.0	74 ± 9.1			



Gambar 3.8 (a) Kurva HR terhadap usia dan (b) diagram HR terhadap jenis kelamin pada tiap kelompok usia.

Berdasarkan jenis kelamin, dapat disimpulkan bahwa HR perempuan sedikit lebih tinggi (tetapi tidak signifikan) dibandingkan laki-laki pada kelompok umur 4-5 tahun, 6-7 tahun, dan 55-75 tahun. Kajian ini (Gambar 3.8) menyatakan bahwa HR menurun dengan bertambahnya usia melalui dua persamaan, yaitu:

$$HR = -4.1923 \text{ age} + 132.44 \quad \text{for } 4 \leq \text{age}(\text{years}) \leq 11.5$$

$$HR = -0.1566 \text{ age} + 86.247 \quad \text{for } 11.5 \leq \text{age}(\text{years}) \leq 75. \quad (9)$$

Pada usia remaja terjadi perubahan kemiringan kurva HR, yaitu HR mulai menurun secara lambat dengan penambahan usia.

3.5 Analisis Elektrokardiogram Melalui *Heart Rate Variability* untuk Deteksi Aritmia

Aritmia adalah kondisi irama jantung yang tidak normal. Aritmia dapat dibagi menjadi aritmia sinus, aritmia ventrikel, dan aritmia supraventrikel. Aritmia sinus merupakan sebuah kondisi medis di mana terjadi adanya perubahan irama jantung menjadi lebih cepat (sinus takikardia, $HR > 100$ bpm) ataupun lebih lambat (sinus bradikardia, $HR < 60$ bpm) daripada irama normal ($60 \text{ bpm} \leq HR \leq 100 \text{ bpm}$). Kondisi ini berkaitan erat dengan fungsi sinus pada daerah jantung yang disebut nodus sinoatrial yang berfungsi untuk mengontrol irama jantung seseorang. Aritmia sinus dikatakan gangguan kesehatan jantung tanpa gejala. Pada aritmia ventrikel, kelainan aktivitas listrik terdapat pada ventrikel itu sendiri dengan ciri kompleks QRS melebar ($> 0,12$ s). Pada aritmia supraventrikel, kelainan aktivitas listrik terdapat pada atrium atau pada

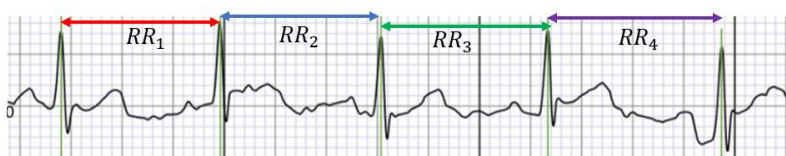
perbatasan atrium dan ventrikel dengan ciri durasi kompleks QRS menyempit ($< 0,06$ s). Kelainan yang masuk ke dalam kategori aritmia supraventrikel di antaranya adalah (1) takikardia supraventrikel paroksismal dengan ciri HR yang tinggi dan adanya gelombang P *retrograd* pada sadapan II atau III, (2) *flutter* atrium dengan ciri munculnya gelombang P lebih dari satu dalam satu pola pada sadapan II dan III atau defleksi negatif gelombang P pada sadapan II, dan (3) fibrilasi atrium dengan ciri gelombang P tidak terlihat dan interval RR tidak konstan atau detak jantung yang tidak teratur (Thaler, 2019).

Fibrilasi atrium (FA) sering kali dimulai dengan detak abnormal dalam waktu singkat, yang menjadi lebih lama atau terus menerus seiring berjalannya waktu (Zoni-Berisso dkk., 2014). Ini mungkin juga dimulai sebagai bentuk aritmia lain seperti *flutter* atrium yang kemudian berubah menjadi fibrilasi atrium (Bun dkk., 2015). Gejala awal fibrilasi atrium adalah jantung terasa berdebar, jika tidak segera ditangani maka gejala selanjutnya adalah mudah lelah ketika melakukan aktivitas yang biasa dilakukan, seperti naik tangga. Kelanjutannya adalah napas akan terasa sesak walaupun hanya melakukan aktivitas ringan seperti bangun dari tidur atau berjalan ke kamar mandi. Oleh karenanya, penderita fibrilasi atrium banyak dijumpai di klinik kesehatan jantung pada pasien dengan usia > 60 tahun. Pada penelitian ini akan dianalisis subjek dengan diagnosis normal *sinus rhythm* dan fibrilasi atrium serta dengan variasi nilai HR.

Heart rate variability (HRV) adalah fluktuasi dalam interval waktu antara detak jantung yang berurutan. HRV sebagai penanda kesehatan dengan mengukur interval RR pada seluruh sinyal EKG (Gambar 3.9) untuk mengetahui aritmia, tingkat stres fisiologis, dan risiko sakit. Pada penelitian ini, perekaman EKG dilakukan 3-4 kali secara berturutan pada tiap subjek di suatu klinik kesehatan di Kota Garut. Setiap perekaman data membutuhkan waktu selama 30 detik menggunakan KardiaMobile 6L. File pdf elektrokardiogram didigitisasi dengan $\Delta t = 0,002$ s atau *sampling rate* = 500 sehingga akan diperoleh deret waktu dari data interval RR.

Terdapat 4 parameter *Heart Rate Variability* yang ditentukan pada setiap subjek. Parameter pertama adalah rata-rata interval RR (\overline{RR}). Pada usia dewasa, normal bila $0,6 \text{ s} \leq \overline{RR} \leq 1,0 \text{ s}$ ($60 \text{ bpm} \leq \text{HR} \leq 100 \text{ bpm}$), takikardia bila $\overline{RR} < 0,6 \text{ s}$ ($\text{HR} > 100 \text{ bpm}$) dan bradikardia bila $\overline{RR} > 1,0 \text{ s}$ ($\text{HR} < 60 \text{ bpm}$). Parameter kedua adalah standar deviasi interval RR (SDRR). Standar deviasi

adalah salah satu konsep penting dalam statistik yang digunakan untuk mengukur penyebaran data dari nilai rata-rata. Parameter ketiga adalah *Root Mean Square of Successive RR interval Differences*. RMSSD adalah ukuran variabilitas denyut jantung yang mencerminkan modulasi parasimpatis jantung dan berhubungan dengan faktor risiko SUDEP (*Sudden Unexplained Death in Epilepsi*) (DeGiorgio dkk., 2010) dan Parameter kelima adalah *Percentage of successive RR intervals that differ by more than 50 ms* (PRR50). PRR50 adalah persentase banyaknya RR50 (selisih interval RR berurutan > 50 ms). Hasil parameter HRV pada interval RR antara subjek *Normal Sinus Rhythm* (NSR) dan subjek Fibrilasi Atrium (FA) dituliskan pada Tabel 3.4.



Gambar 3.9 Penentuan Interval RR untuk seluruh sinyal EKG pada elektrokardiogram

Tabel 3.4 Parameter HRV untuk 5 subjek dengan variasi kondisi rytme jantung dan nilai *heart rate*

Parameter HRV pada domain waktu	FA-normal heart rate	FA-takikardia	Normal Sinus Rythm	FA-normal heart rate	FA-bradikardia
\overline{RR} (s)	0,622	0,593	0,874	0,676	1,005
SDRR (s)	0,103	0,433	0,018	0,185	0,199
RMSSD (s)	0,143	0,361	0,017	0,253	0,292
PRR50 (%)	75,3	80,0	3,5	77,6	84,7

Untuk usia 25-74 tahun, PRR50 normal berada di rentang 3% - 43% (Elite HRV, 2024). RMSSD normal berada pada rentang 0,016 s – 0,028 s untuk usia 60 – 69 tahun (Weinberg, 2023). Dengan demikian, HRV metrik seperti SDRR, RMSSD, PRR50 memberikan perbedaan nilai yang signifikan antara subjek normal *sinus rhythm* dan fibrilasi atrium.

3.6 Analisis Elektrokardiogram Melalui *Symbolic Recurrence Plot* untuk Deteksi Aritmia

Pada bagian ini deret waktu interval RR sinyal EKG yang memiliki pengulangan pola keteraturan akan dianalisis secara visual melalui SRP (*Symbolic Recurrence Plot*), yaitu pengkodean simbolik dari lintasan bernilai kontinu $(x_t)_{t \geq 0}$ menurut urutan beberapa suku yang berurutan, misalnya $(x_t,$

x_{t+1}, x_{t+2}). Pendekatan ini sangat efisien untuk mengukur fitur dinamis deret waktu bivariat. SRP berguna untuk memvisualisasikan dominasi jenis simbol tertentu dan mencerminkan distribusi temporal dari dinamika tersebut (Pérez-Valero dkk., 2020).

Di sini, SRP dilakukan menggunakan 3 data interval RR untuk tiap kelompok ($m = 3$) sehingga memiliki $3! = 6$ simbol, yaitu:

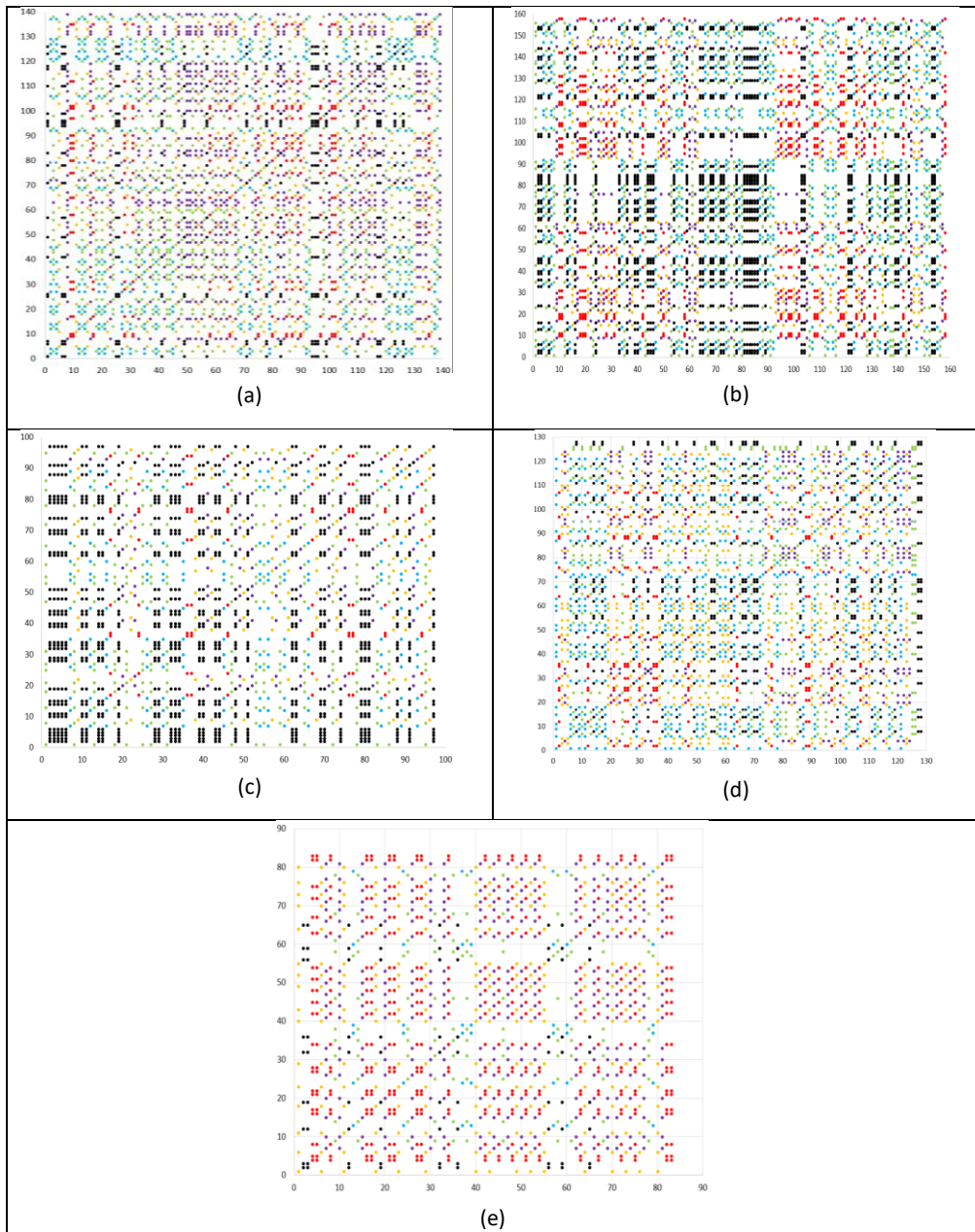
$$S_3 = \{(2,1,0), (2,0,1), (1,2,0), (1,0,2), (0,1,2), (0,2,1)\}$$

Angka 0, 1, dan 2 berkorelasi dengan nilai interval RR dari sebuah kelompok yang berisi tiga nilai interval RR berurutan, dengan 0 sebagai simbol nilai terkecil, 2 sebagai simbol nilai terbesar, dan 1 sebagai simbol nilai diantara keduanya. Masing-masing simbol akan memiliki warna yang berbeda seperti pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Warna simbol tiap kelompok

simbol	(2,1,0)	(2,0,1)	(1,2,0)	(1,0,2)	(0,1,2)	(0,2,1)
warna	merah	hijau	biru	oranye	hitam	ungu

Jika deret waktu interval RR memiliki N data interval RR dengan memilih $m = 3$ untuk tiap kelompok maka akan terdapat $(n = N - m + 1)$ kelompok. Masing-masing kelompok memiliki warna sesuai aturan pada Tabel 3.5. Dot berwarna akan muncul pada *recurrence plot* jika dan hanya jika urutan waktu untuk kelompok pada sumbu horizontal dan pada sumbu vertikal memiliki simbol warna yang sama. Dengan demikian akan muncul warna pada titik-titik data diagonal *Recurrence Plot* seperti terlihat pada Gambar 3.10. Warna yang sama akan muncul pada koordinat (t, s) dan (s, t) . Pada satu baris *recurrence plot* akan dijumpai satu warna yang sama di titik-titik data yang bersesuaian dengan warna pada nilai sumbu vertikal baris tersebut. Sebaliknya juga dijumpai bahwa pada satu kolom *recurrence plot* akan dijumpai satu warna yang sama di titik-titik data yang bersesuaian dengan warna pada nilai sumbu horizontal kolom tersebut.



Gambar 3.10 SRP untuk Subjek: (a) FA-NHR, (b) FA-takikardia, (c) NSR, (d) FA-NHR dan (e) FA-bradikardia

Metrik pada SRP di antaranya adalah SRR (*Symbolic Recurrence Rate*) yang digunakan sebagai nilai pembandingan antara subjek aritmia dengan subjek normal. SRR dilakukan pada masing-masing warna dan keseluruhan. SRR dihitung dengan persamaan:

$$SRR(i) = \frac{1}{n^2} \sum_{t,s=1}^n SRR_{ts}(i)$$

$$SRR_{total} = \sum_{i=1}^6 SRR(i) \tag{10}$$

SRR(i) adalah SRR untuk warna i dan n² adalah banyaknya total dot pada diagram SRP. Di sini, kami mengusulkan besaran entropi untuk mengukur derajat keacakan warna dot pada SRP. Semakin besar nilai entropi, maka semakin kuat bahwa subjek terindikasi fibrilasi atrium. Entropi tak-berdimensi ini dihitung menggunakan perumusan yang diperoleh dari mekanika statistik.

$$S = - \sum_{i=1}^6 P_i \ln P_i, \text{ dengan } P_i = \frac{SRR(i)}{SRR_{total}} \tag{11}$$

P_i menyatakan probabilitas simbol warna i muncul pada *recurrence plot*. Hasil metrik SRP diperlihatkan pada Tabel 3.6.

SRP untuk subjek *Normal Sinus Rhythm* sangat berbeda dengan SRP untuk subjek Fibrilasi Atrium. Pada subjek *Normal Sinus Rhythm*, warna yang dominan adalah warna hitam, yaitu untuk simbol naik (0,1,2) yang sangat kuat membentuk persegi pada *recurrence plot*. Sementara pada subjek Fibrilasi Atrium, tampak warna-warni yang tersebar. Derajat keacakan warna dinyatakan dalam entropi. Nilai entropi SRP subjek Fibrilasi Atrium lebih besar karena warnanya lebih acak dibandingkan dengan Subjek Normal Sinus Rhythm dengan warna yang lebih teratur. Dengan demikian, SRP bisa membantu pembaca untuk membedakan Fibrilasi Atrium dari Normal Sinus Rhythm secara inspeksi visual dengan lebih mudah dan jelas.

Tabel 3.6 Metrik pada SRP

	FA-normal heart rate	FA-takikardia	Normal Sinus Rythm	FA-normal heart rate	FA-bradikardia
SRR Hitam	0,021	0,064	0,109	0,035	0,012
SRR Merah	0,017	0,021	0,011	0,014	0,064
SRR Orange	0,025	0,014	0,015	0,035	0,037
SRR Biru	0,023	0,027	0,021	0,038	0,007
SRR Hijau	0,044	0,031	0,034	0,030	0,018
SRR Ungu	0,044	0,019	0,013	0,020	0,052
SRR Total	0,172	0,178	0,203	0,172	0,190
Entropi	1,732	1,507	1,394	1,741	1,559

3.7 Rencana Penelitian Lanjutan

SRP menangkap pola berulang sistem dinamik dalam deret waktu dengan menyimbolkan titik data ke dalam simbol diskrit berdasarkan aturan tertentu. Pola yang diperoleh dari SRP perlu dianalisis dengan lebih lanjut dengan *Image classification* untuk kategori pola ke dalam kelas yang telah ditentukan. Menggabungkan *Image classification* ke dalam analisis SRP melibatkan penggunaan teknik *machine learning* atau *deep learning* untuk mengklasifikasi pola-pola yang didapat dari SRP. Dengan demikian, kami berharap mendapat pemahaman yang lebih mendalam tentang dinamika yang mendasari sistem kompleks dan berpotensi mengungkap pola lain yang belum terungkap.

Langkah-langkah yang akan dilakukan meliputi: pemilihan model klasifikasi, pelatihan, evaluasi, pengujian, dan interpretasi. Proses ini memerlukan data yang berkualitas, pemilihan fitur, dan pengoptimalan model untuk mencapai hasil yang akurat. Selain itu, diperlukan juga ahli di bidang kardiologi untuk menafsirkan keluaran *Image classification* dan mengintegrasikannya ke dalam praktik klinis.

Model klasifikasi dilakukan berdasarkan kompleksitas masalah dan ukuran kumpulan data. Jika masalah cukup sederhana atau kumpulan data yang kecil dengan algoritme *machine learning* seperti *Support Vector Machines* (SVM), *Random Forests*, atau *k-Nearest Neighbors* (k-NN). Jika masalah lebih kompleks dengan kumpulan data lebih besar maka dengan model *deep learning* (Kachuee dkk., 2018; Rajpurkar dkk., 2017) seperti *Convolutional Neural Networks* (CNNs) (U. R. Acharya dkk., 2017; Rajpurkar dkk., 2017). Kumpulan data dibagi ke dalam kumpulan pelatihan dan validasi. Melatih model klasifikasi yang dipilih menggunakan set pelatihan dan mengoptimalkan parameternya. Mengevaluasi model yang dilatih pada set validasi untuk menilai kinerjanya. Metrik kinerja seperti akurasi, sensitivitas, dan spesifisitas dapat digunakan untuk menilai kinerja pengklasifikasi. Menguji model tersebut pada data yang tidak terlihat untuk mengevaluasi kemampuan generalisasinya. Analisis hasil klasifikasi untuk mendapatkan wawasan tentang pola pengulangan dan perilaku dinamisnya. Hal ini dapat melibatkan visualisasi kejadian yang salah klasifikasi, pemeriksaan pentingnya fitur, atau eksplorasi batasan keputusan.

4 ELEKTROENSEFALOGRAFI: DASAR-DASAR DAN ANALISIS

4.1 Dasar-Dasar EEG

Elektroensefalografi adalah metode untuk merekam aktivitas kelistrikan otak dengan menggunakan elektroda yang ditempel di kulit kepala. Elektroensefalografi digunakan untuk mendiagnosis gangguan neurologis, seperti epilepsi, cedera kepala, gangguan tidur, demensia, atau kelainan psikiatrik (Adeli dkk., 2003; Siloam Hospital Medical Team, 2023). EEG juga berguna untuk *treatment* gangguan perilaku (misal autisme), gangguan perhatian, masalah belajar dan keterlambatan bahasa (Siuly dkk., 2016). Namun, hanya sedikit penelitian yang mengonfirmasi pentingnya EEG dalam diagnosis gangguan mental dan perubahan yang terjadi akibat terapi; oleh karena itu, diperlukan analisis di bidang ini (Kopańska dkk., 2022). EEG bersifat *real time* (memberikan informasi secara langsung), non-invasi (elektroda EEG ditempatkan pada kulit kepala), *portabel (mobile)*, non-radiatif dan biaya rendah. EEG memiliki resolusi waktu yang tinggi, namun resolusi spasialnya terbatas (National Academies of Sciences, 2022).

Elektroensefalogram menyajikan rekaman beda potensial listrik sebagai fungsi waktu. Tinggi sinyal EEG pada sumbu vertikal elektroensefalogram dapat diatur berdasarkan sensitivitas alat. Sensitivitas standar yang digunakan adalah $7 \mu\text{V}/\text{mm}$. Pada elektroensefalogram untuk anak-anak diperlukan sensitivitas yang lebih tinggi dikarenakan pada umumnya anak-anak cenderung memiliki amplitudo aktivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan orang dewasa. Sedangkan sumbu horizontal elektroensefalogram menyatakan penelusuran yang ditampilkan dalam satu satuan waktu. Nilai standar untuk subjek orang dewasa dan anak adalah $30 \text{ mm}/\text{detik}$, dan untuk bayi yang baru lahir (neonatal) adalah $15 \text{ mm}/\text{detik}$ (Valentine, 2020).

Harga perangkat *medical-grade* EEG relatif tinggi. Kondisi ini telah mendorong perusahaan untuk produksi perangkat *consumer-grade* EEG yang relatif murah. Sebagai perbandingan, harga *consumer-grade* EEG di pasaran berkisar USD 99-1700, sedangkan untuk *medical-grade* EEG berkisar USD 2000-25000 (Suwandi, Risyad, dkk., 2023). Tabel 4.1 membandingkan spesifikasi kedua tipe perangkat EEG ini dan Gambar 4.1 memperlihatkan satu contoh

perangkat utama EEG yang digunakan pada penelitian kami. Oleh karena itu, penting untuk menilai kinerja perangkat *consumer-grade* EEG nirkabel untuk menentukan apakah perangkat tersebut memadai untuk keperluan medis.

Tabel 4.1 Perbandingan spesifikasi perangkat EEG tingkat medis dan tingkat konsumen

	Medical-grade EEG	Consumer-grade EEG
Device	EEG Neurosoft Neuron-Spectrum-63	EEG Emotiv Epoc X
Number of electrodes	19 (+2 references)	14 (+2 references)
Electrodes	FP1, FP2, FZ, F3, F4, F7, F8, T7, T8, CZ, C3, C4, PZ, P3, P4, P7, P8, O1, O2	AF3, AF4, F3, F4, FC5, FC6, F7, F8, T7, T8, P7, P8, O1, O2
Configuration	IS 10-20	IS 10-20
Connectivity	Cable	Wireless with Bluetooth
Sampling rate	500 Hz	128 Hz



(a)



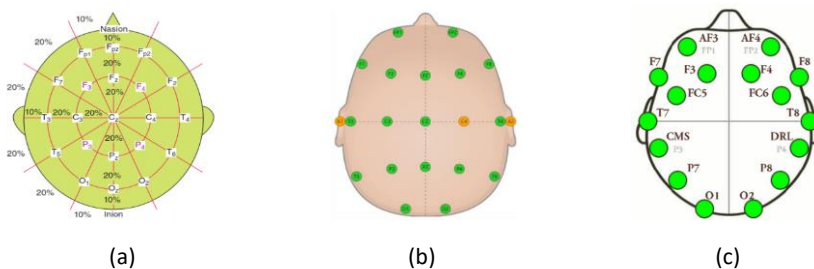
(b)

Gambar 4.1 Perangkat utama EEG: (a) EEG Neurosoft Neuron-Spectrum-63 (b) EEG Emotiv Epoc X (Emotiv, 2024; Neurosoft, 2024)

Aktivitas sinyal EEG dapat dikenali dari amplitudo dan frekuensinya. Amplitudo sinyal EEG mencerminkan kekuatan sinyal dan diukur dalam satuan microvolt (μV). Frekuensi menyatakan banyaknya osilasi per detik dan diukur dalam satuan hertz (Hz). Frekuensi gelombang otak memiliki rentang antara 0.5 – 100 Hz yang bergantung pada tingkat aktivitas dari *cerebral cortex*. Gelombang otak dapat dibedakan berdasarkan rentang komponen frekuensinya menjadi 5 kategori (Abhang dkk., 2016) yaitu rentang frekuensi Delta (δ) (0,5 – 4 Hz saat seseorang pada fase meditasi dalam keadaan tidur dalam atau koma), Theta (θ) (4 – 8 Hz ketika subjek tidur ringan, mengantuk atau melamun), Alpha (α) (8 - 13 Hz ketika subjek kondisi rileks dan kesadaran penuh), Beta (β) (13 – 30 Hz ketika subjek aktif pada keadaan sadar, waspada, fokus, dan stress), dan Gamma (γ) (30 – 45 Hz ketika subjek mengalami aktivitas mental yang sangat tinggi atau hiperkonsentrasi seperti memproses informasi.

Sel-sel otak (terutama neuron dan glia) terorganisasi dalam berbagai tingkat jaringan yang rumit. Membran sel adalah media semipermeabel antara larutan (cairan) ekstrasel dan intrasel, yang berisi ion dan molekul bermuatan listrik. Pergerakan ion-ion melalui membran sel merepresentasikan arus listrik yang mengalir melintasi membran sel yang menyebabkan perubahan distribusi muatan di dalam dan di luar sel. Oleh karena arus yang mengalir berubah terhadap waktu maka tercipta medan listrik dan medan magnet yang berubah terhadap waktu. Medan elektromagnetik ini dapat dideteksi di permukaan tubuh oleh elektroda pada permukaan kulit kepala, yang mencatat perubahan aktivitas sel-sel otak (Amzica & Lopes da Silva, 2017). Sinyal yang terekam pada elektrokardiogram akan bervariasi terhadap posisi elektroda dan montase yang menghubungkan elektroda-elektroda tersebut.

Penempatan elektroda pada kulit kepala menggunakan sistem 10-20 telah menjadi standar internasional untuk perekaman EEG pada penggunaan klinis (Acharya dkk., 2016). Sistem 10-20 ini diusulkan oleh the International Federation of Societies for Electroencephalography and Clinical Neurophysiology pada tahun 1958. Sistem 10-20 merupakan metode penentuan posisi relatif berbasis permukaan kepala standar untuk berbagai metode pemetaan otak transkranial. Gambar 4.2 memperlihatkan penempatan 19+2 dan 14+2 elektroda pada kulit kepala subjek dengan jarak relatif antar-elektroda sebesar 10% dan 20%.



Gambar 4.2 Posisi elektroda pada kulit kepala: (a) Pengaturan IS 10-20, (b) 19+2 elektroda dan (c) 14+2 elektroda (Sanei & Chambers, 2022; Emotiv, 2019)

Dalam sistem 10-20, setiap elektroda diidentifikasi dengan huruf dan angka. Huruf bersesuaian dengan wilayah otaknya: F (frontal), T (temporal), P (parietal), dan O (oksipital). Angka terkait dengan belahan otak, yaitu angka ganjil untuk hemisfer kiri dan genap untuk hemisfer kanan. Khusus untuk elektroda di garis tengah digunakan huruf z sebagai pengganti angka. Secara

umum, angka yang lebih rendah untuk posisi elektroda yang lebih dekat ke garis tengah.

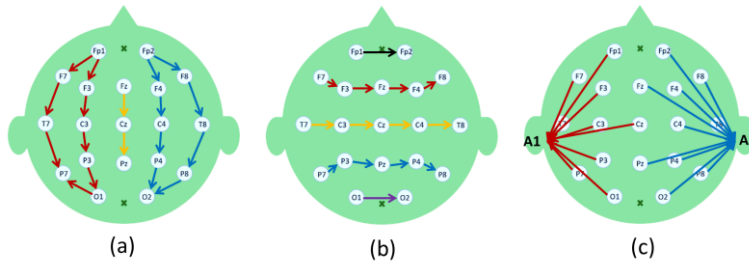
Pada EEG, terdapat elektroda referensi. Elektroda referensi yang terletak di daun telinga diidentifikasi dengan huruf A (*auricle*), yaitu A1 dan A2. Elektroda referensi yang terletak di kulit kepala bernama CMS dan DRL. Elektroda CMS berperan sebagai *channel* referensi yang dibandingkan terhadap seluruh sinyal EEG yang terukur. Elektroda DRL berperan sebagai “*ground*” (Dissanayaka dkk., 2020). Elektroda referensi pada umumnya adalah elektroda pada bagian *ipsilateral*, *contralateral ear*, atau *vertex* karena bersifat netral.

Elektroensefalogram menyajikan kurva beda potensial listrik sebagai fungsi waktu untuk seluruh elektroda di seluruh kulit kepala. Beda potensial listrik diperoleh dari pasangan elektroda. Susunan koneksi antara pasangan elektroda untuk semua elektroda dinamakan *montage* (montase) untuk memberikan informasi lateralisasi dan lokalisasi. Terdapat beberapa montase yang digunakan (Gambar 4.3). Bipolar Montage menyatakan selisih nilai dari dua elektroda yang berdekatan, yaitu montase bipolar longitudinal (*double banana*) dan montase *bipolar transversal*. Referential Montage menyatakan selisih antara elektroda referensi dan elektroda tertentu. Salah satu dari kedua elektroda tersebut akan bersifat aktif yang merekam aktivitas otak dan elektroda lainnya berperan sebagai referensi. *Average Reference Montage* menggunakan rata-rata sinyal dari seluruh elektroda sebagai referensi untuk setiap *channel* elektroda.

Elektroensefalografi rutin biasanya menggunakan montase bipolar dan referensial. Montase rata-rata juga dapat membantu dalam beberapa situasi. Oleh karena setiap jenis montase memiliki kekuatan dan keterbatasan tertentu, pedoman ACNS merekomendasikan penggunaan beberapa montase untuk setiap rekaman elektroensefalografi pada inspeksi visual (Acharya & Acharya, 2019).

Artefak pada EEG di antaranya adalah kedipan mata terlihat sebagai defleksi positif frontal yang besar; pada montase bipolar ditandai dengan bentuk gelombang negatif dengan amplitudo sangat tinggi di wilayah bifrontal. Pergerakan mata ke samping muncul sebagai defleksi frontal positif pada sisi yang dilihat; pada montase bipolar ditandai dengan polaritas yang berlawanan pada sadapan frontal pada hemisfer kiri dan kanan. Artefak gerak

mengunyah adalah dari aktivitas otot temporalis yang ditandai dengan aktivitas tiba-tiba dan sangat cepat pada banyak sadapan di EEG. Artefak hipoglosal dari pergerakan lidah akan muncul sebagai aktivitas pada frekuensi delta yang menyebar. Artefak denyut jantung tampak seperti lonjakan negatif posterior pada kompleks QRS, biasanya di sisi kiri (Valentine, 2020).



Gambar 4.3 Montase yang digunakan: (a) montase bipolar longitudinal, (b) montase bipolar transversal dan (c) montase refensial.

4.2 Quantitative Electroencephalography (qEEG)

Pada umumnya, sinyal EEG dianalisis secara visual oleh seorang ahli untuk mengidentifikasi dan memahami kelainan di dalam otak. Pendekatan inspeksi visual untuk data EEG itu bergantung pada sumber daya manusia yang mahal, dan rentan terhadap kesalahan dan bias (Siuly dkk., 2016).

Penelitian EEG di KK Fisika Nuklir dan Biofisika menggunakan *quantitative Electroencephalography* (qEEG), yaitu sebuah teknik yang digunakan untuk mengukur dan menganalisis aktivitas gelombang otak secara objektif, yaitu dengan melakukan analisis statistik menggunakan algoritme transformasi fourier pada data digital sinyal EEG (Fetz, 2007). Elektroensefalografi kuantitatif (qEEG) menjadi metode yang semakin umum untuk mendiagnosis gangguan neurologis dan mengikuti rekomendasi dari The American Academy Neurologi (AAN) dan American Clinical Neurophysiology Society (ACNS).

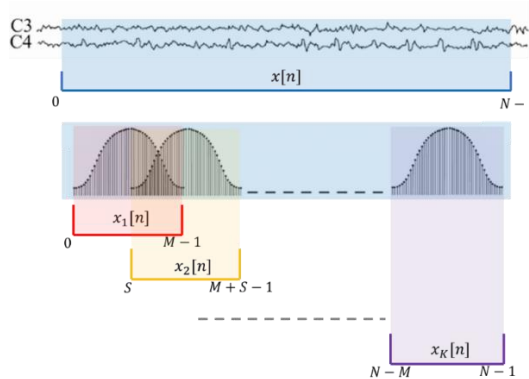
Sinyal EEG yang diperoleh kemudian diolah melalui pra-pemrosesan yang meliputi beberapa tahap: *centering*, *filtering*, dan esktraksi fitur berupa perhitungan rapat spektrum daya. Tahap *centering* untuk menghilangkan DC *offset* sehingga sinyal yang semula berfluktuasi di sekitar suatu nilai akhirnya berfluktuasi di sekitar nilai nol. Tahap *filtering* merupakan proses

menghilangkan *noise* dan artifak. Pada tahap ini dilakukan pula pemilihan data pada pita frekuensi tertentu dari gelombang otak untuk memfokuskan tahap analisis. Proses ini menggunakan metode *bandpass filter* (BPF) dengan prinsip kerja mentransformasikan sinyal dalam domain waktu ke domain frekuensi menggunakan proses *Fast Fourier Transform* (FFT) kemudian meloloskan sinyal dengan rentang frekuensi yang dipilih (0,5 - 45) Hz. Selanjutnya, data ditransformasikan kembali menjadi sinyal domain waktu menggunakan *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT). Pada bagian akhir pra-pemrosesan, BPF digunakan untuk meloloskan frekuensi sinyal yang dibutuhkan, yakni rentang frekuensi Delta (δ), Theta (θ), Alpha (α), Beta (β) dan Gamma (γ).

Tahap selanjutnya adalah ekstraksi fitur berupa perhitungan rapat spektrum daya (PSD). Spektrum ini memberikan informasi tentang intensitas sinyal EEG dalam berbagai rentang frekuensi, yang dapat menggambarkan perubahan keadaan mental, tingkat kewaspadaan, atau respons terhadap stimulus eksternal. PSD dilakukan pada data yang telah melalui pra-pemrosesan, yaitu dengan menggunakan metode Welch (Welch, 1967). Prosedur utama dari metode ini adalah membagi sinyal dalam domain waktu menjadi beberapa segmen yang saling tumpang tindih di ujungnya. Gambar 4.4. memperlihatkan data EEG yang panjangnya N dibagi menjadi K segmen yang tumpang tindih dengan panjang tiap segmen M ($M < N$). Kemudian, fungsi jendela akan diterapkan pada setiap segmen dengan mengalikan setiap segmen $x_k[n]$ dengan fungsi jendela $w[n]$. Window Hamming adalah salah satu jenis fungsi jendela yang digunakan dalam analisis sinyal, terutama dalam konteks Transformasi Fourier. Fungsi ini memiliki karakteristik penurunan secara eksponensial sehingga memberikan bobot yang rendah pada ujung-ujung sinyal, mengurangi efek leakage (Wang dkk., 2015). Kemudian, perhitungan periodogram dilakukan pada tiap segmen dengan DFT. Hasil periodogram dari setiap segmen dijumlah dan dirata-ratakan untuk memperoleh PSD.

Analisis PSD di EEG memiliki aplikasi luas dalam pemahaman otak manusia pada neurologi klinis, psikologi kognitif, dan pengembangan neurologi otak-komputer. Hasil rapat spektrum daya ini yang kemudian dianalisis berkaitan dengan karakteristik kasus yang akan diteliti, seperti studi perbandingan kualitas rekaman eeg-konsumen dengan eeg-medis, diagnosis

kelainan psikiatrik dan deteksi awal vims dari penggunaan media tayang pada realitas virtual.



Gambar 4.4 Skema pembagian data sinyal hasil pengukuran EEG menjadi beberapa segmen pada periodogram Welch.

4.3 Studi Perbandingan Kualitas Rekaman *Consumer-grade* EEG dengan *Medical-grade* EEG

Pada penelitian ini, kami (Suwandi, Risyad, dkk., 2023) melakukan perbandingan kualitas rekaman *consumer-grade* EEG (Emotiv Eporc X) terhadap rekaman perangkat *medical-grade* EEG (Neurosoft Neuron-Spectrum-63).

Data rekaman C-EEG dan M-EEG diperoleh dari 20 subjek laki-laki berusia 19-23 tahun. Perekaman dengan kedua perangkat dilakukan secara berurutan dengan metode yang sama, yaitu subjek duduk di kursi menghadap layar dengan membuka mata (30 detik), menutup mata (30 detik). Melaksanakan tes memori verbal (Gambar 4.5) dengan 30 detik mengingat dan dilanjutkan 3 pertanyaan pilihan jamak (Q1, Q2, dan Q3) dengan subjek menjawab secara lisan.

FLOWER: Chrysolite, Frangipani, Tulip, Rafflesia
TOOLS: Secateur, Broom, Wok, Hoe
ART: Puppet, Quintet, Angklung, Orchestra
ANIMAL: Lion, Iguana, Deer, Moose
FRUIT: Kiwi, Jackfruit, Guava, Pomegranate

- Q1. A word that starts with the letter A is a...
 A. Flower
 B. Tools
 C. Art
 D. Animal
 E. Fruit
- Q2. A word that starts with the letter S is a...
 A. Flower
 B. Tools
 C. Art
 D. Animal
 E. Fruit
- Q3. A word that begins with the letter A and ends with the letter T is a...
 A. Flower
 B. Tools
 C. Art
 D. Animal
 E. Fruit

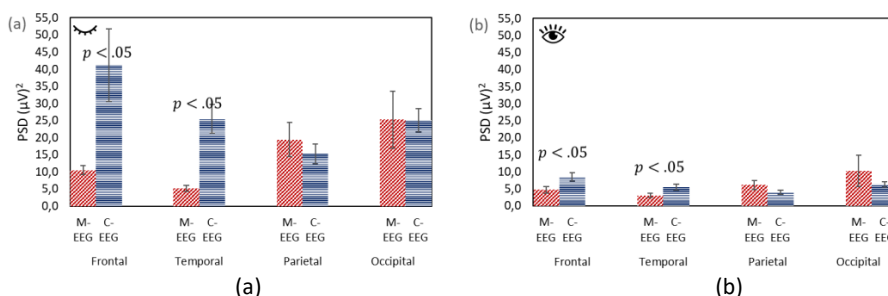
Gambar 4.5 Contoh tes memori verbal: kategori dan pertanyaannya (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)

Pada penelitian ini, gelombang otak disaring dengan BPF pada frekuensi alfa (8-13 Hz) karena subjek dikondisikan untuk rileks selama perekaman. Penyaringan ini akan menghilangkan *noise* oleh penyimpangan sinyal dan gangguan listrik (50 Hz) dan juga menghilangkan artefak mata berkedip ($\leq 0,5$ Hz). Setelah tahap *filtering* maka dilanjutkan penentuan kurva PSD pada rentang frekuensi alfa. Beberapa parameter diukur berdasarkan kurva PSD adalah nilai puncak PSD dan pergeseran dari *individual peak alpha frequency* (IPAF *shift*).

Dalam kurva PSD pada pita alfa (8-13 Hz), IPAF adalah frekuensi dengan gelombang otak yang paling dominan, yaitu pada nilai PSD maksimum atau sering diistilahkan sebagai puncak alfa. IPAF biasanya dikaitkan dengan kinerja kognitif individu, seperti perhatian dan memori (Corcoran dkk., 2018). Eksperimen Klimesch dkk. (1993) menunjukkan bahwa ketika perhatian dan tuntutan memori meningkat pada seorang individu, IPAF bergeser dari nilai ketika yang bersangkutan dalam keadaan istirahat.

Hasil PSD dari kedua nilai setiap parameter PSD dari hasil kedua alat diuji secara statistik. Untuk mengetahui signifikansi perbedaan antara pengukuran dengan C-EEG terhadap M-EEG dilakukan melalui melalui t-test (p-value), *mean absolute percentage error* (MAPE), dan *mean squared error* (MSE).

Hasil nilai puncak PSD pada pita alfa ditunjukkan pada Gambar 4.6. Uji statistik menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$) pada nilai puncak PSD antara kedua perangkat di lobus frontal dan temporal.



Gambar 4.6 Diagram batang untuk nilai puncak PSD antara M-EEG dan C-EEG untuk kondisi istirahat: (a) mata tertutup dan (b) mata terbuka (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)

Hasil p-value, MAPE dan MSE dari nilai puncak PSD disajikan pada Tabel 4.2. Perbedaan signifikan hasil puncak PSD dari kedua alat terjadi pada lobus frontal dan temporal baik ketika kondisi mata tertutup atau terbuka. Hasil

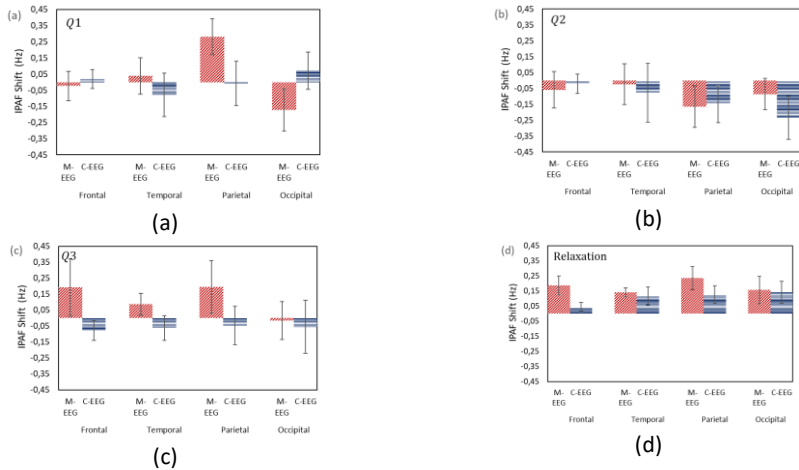
MAPE dan MSE yang besar ini secara jelas menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kedua perangkat per subjek.

Tabel 4.2 *p*-value, MAPE, dan MSE nilai puncak PSD antara M-EEG dan C-EEG (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)

Parameter	Condition	Brain Lobes			
		Frontal	Temporal	Parieta I	Occipital
<i>p</i> -value	Resting Eyes Closed	0.004	0.0001	0.47	0.99
	Resting Eyes Opened	0.02	0.04	0.15	0.40
MAPE (%)	Resting Eyes Closed	242.19	539.67	68.11	165.85
	Resting Eyes Opened	147.44	137.36	71.99	112.90
MSE	Resting Eyes Closed	1107.79	648.86	294.35	905.08
	Resting Eyes Opened	30.32	17.92	19.76	330.81

Hasil pergeseran IPAF diperlihatkan pada Gambar 4.7, pada Q1 dan Q3 terdapat perbedaan arah pergeseran IPAF antara C-EEG dan M-EEG. Sementara itu, seluruh pergeseran IPAF bernilai negatif di setiap lobus pada Q2 dan positif pada saat istirahat. Namun, hasil uji statistik menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan ($p\text{-value} \gg 0,05$) antara kedua perangkat. Hal ini menunjukkan bahwa C-EEG dapat mendeteksi pergeseran IPAF dengan baik seperti M-EEG. Hasil ini konsisten dengan temuan penelitian lain bahwa C-EEG dapat mencatat perubahan aktivitas listrik sehubungan dengan kebutuhan memori (Adewale & Panoutsos, 2021). Menurut Klimesch dkk. (1993) disebutkan bahwa IPAF cenderung menurun (negatif) atau tidak berubah ketika subjek melakukan aktivitas memori, namun ini tergantung kinerja subjek. Subjek dengan kinerja buruk cenderung mengalami penurunan IPAF saat melakukan tes memori, namun subjek dengan kinerja baik cenderung tidak mengalami perubahan IPAF. Klimesch dkk. (1993) juga menyebutkan bahwa tuntutan perhatian juga berkontribusi terhadap peningkatan IPAF. Dalam percobaan yang kami lakukan, kami tidak melakukan pemisahan subjek berdasarkan kinerja memori sehingga mungkin pergeseran IPAF bisa menurun atau meningkat.

Hasil statistik pada Tabel 4.3 menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan antara kedua perangkat, kecuali dalam relaksasi di bagian frontal mata terbuka. Hasil ini menyatakan bahwa C-EEG dapat mendeteksi pergeseran IPAF dengan baik seperti M-EEG.



Gambar 4.7 Diagram batang untuk pergeseran IPAF antara M-EEG dan C-EEG pada kondisi (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, dan (d) istirahat (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)

Tabel 4.3 p-value dan MSE untuk pergeseran IPAF antara M-EEG dan C-EEG (Suwandi, Risyad, dkk., 2023)

Parameter	Treatment	Brain lobes			
		Frontal	Temporal	Parietal	Occipital
p-value	Q1- Resting Eyes Opened	0.68	0.51	0.11	0.18
	Q2- Resting Eyes Opened	0.82	0.81	0.93	0.39
	Q3- Resting Eyes Opened	0.15	0.16	0.24	0.85
	Relaxation - Resting Eyes Opened	0.09	0.73	0.26	0.89
MSE	Q1- Resting Eyes Opened	0.27	0.23	0.48	0.49
	Q2- Resting Eyes Opened	0.15	0.66	0.31	0.56
	Q3- Resting Eyes Opened	0.57	0.18	0.76	0.68
	Relaxation - Resting Eyes Opened	0.08	0.04	0.13	0.14

Telah dilakukan penelitian untuk melihat apakah terdapat perbedaan hasil analisis sinyal pada pita alfa antara pengukuran menggunakan *consumer-grade* EEG dengan *medical-grade* EEG. Penelitian ini dilakukan secara khusus untuk subjek pria sehat. Berdasarkan pergeseran IPAF disimpulkan bahwa C-EEG dapat membaca sinyal EEG terhadap waktu dengan baik. Berdasarkan hasil PSD disimpulkan bahwa C-EEG tidak dapat membaca amplitudo sinyal EEG dengan baik dibandingkan perangkat M-EEG. Hasil penelitian ini penting

sebagai acuan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan *consumer-grade* EEG maupun *medical-grade* EEG.

4.4 Analisis qEEG karena Stimulus Musik

Dalam kehidupan kita sehari-hari, beberapa aktivitas (seperti olahraga, meditasi, dan terapi) sering kali diiringi dengan musik dengan tempo berbeda, misalnya ≈ 60 bpm (*adagio*) untuk yoga dan taichi, ≈ 180 bpm (*presto*) untuk treadmill dan 120-156 bpm (*allegro*) selama aerobik (Caplin dkk., 2010). Musik dapat memengaruhi emosi dan aktivitas otak yang dapat diukur melalui gelombang otak. Musik tergolong aktivitas otak kanan, artinya kesadaran musik berada di belahan otak kanan (Adalarasu dkk., 2011; Gomes dkk., 2018) dan amplitudo sinyal otak kanan lebih tinggi daripada sinyal otak kiri saat mendengarkan musik (Handayani dkk., 2015). Selain itu, variasi pola gelombang otak juga dipengaruhi oleh tempo dan intensitas musik. Keras/lemah bunyi adalah persepsi besaran intensitas bunyi, dapat diubah dengan mengatur tombol volume.

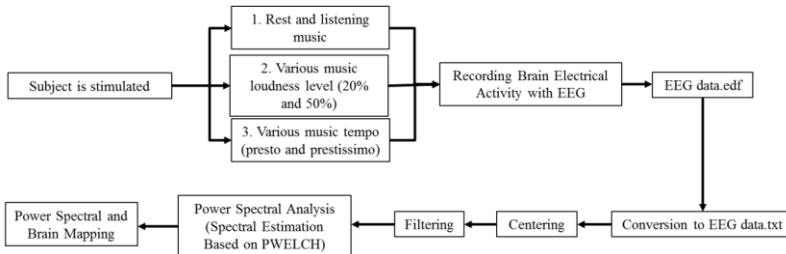
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkarakterisasi spektrum daya EEG akibat rangsangan musik sebagai gelombang bunyi, yaitu (1) mengidentifikasi belahan otak yang lebih aktif saat mendengarkan musik melalui PSD sinyal EEG, (2) mengetahui pengaruh keras/lemah bunyi terhadap kekuatan spektrum pada pita alfa dan beta, dan (3) mempelajari persepsi otak ketika tempo musik meningkat.

Musik yang digunakan dalam penelitian ini adalah musik instrumental. Keras atau lemah bunyi diatur menggunakan *software* Audacity 2.2.1 dan tempo ditentukan menggunakan *software* MixMeister BPM Analyzer seperti pada Tabel 4.4. Perekaman sinyal EEG menggunakan 14 (+2 *references*) elektroda (Tabel 4.1)

Tabel 4.4 Musik instrumental dengan variasi volume dan tempo

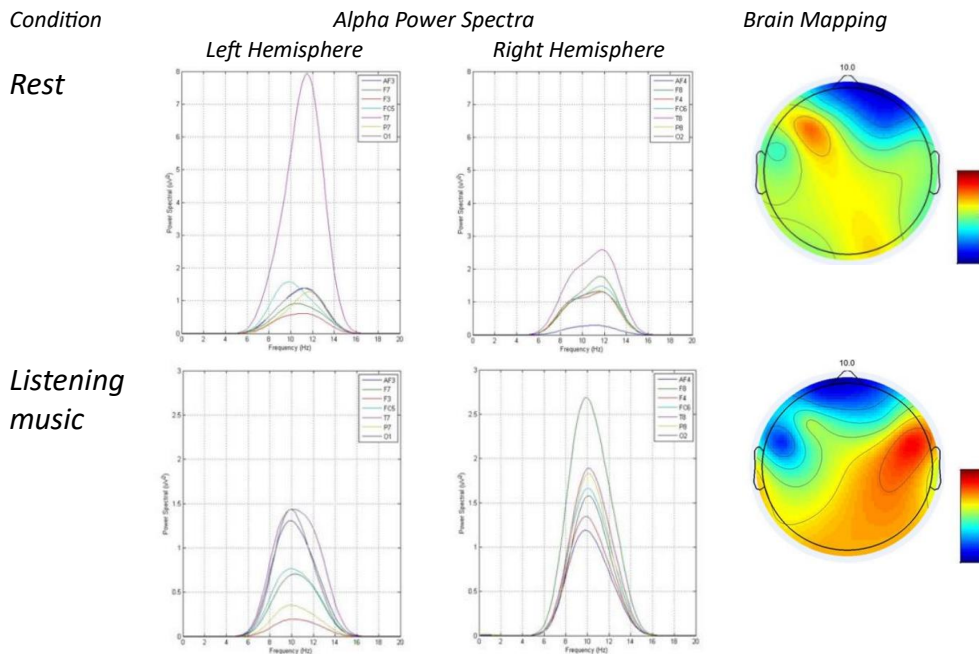
Music	Song Title	loudness	Tempo (bpm)
A	Shape of You (Ed Sheeran)	50%	90 (<i>Andante</i>)
B	Indonesia Raya (WR Soepratman)	50% and 20%	109 (<i>Moderato</i>)
C	Red Cap Assault (Ashane)	50%	162 (<i>Presto</i>) and over 200 (<i>Prestissimo</i>)

Subjeknya adalah 10-12 mahasiswa S-1 non-musisi, laki-laki, usia 21-24 tahun, memiliki pendengaran yang normal dan tidak ada masalah neurologis. Semua kondisi pengukuran dilakukan dengan mata tertutup dengan metode eksperimen disampaikan pada Gambar 4.8.



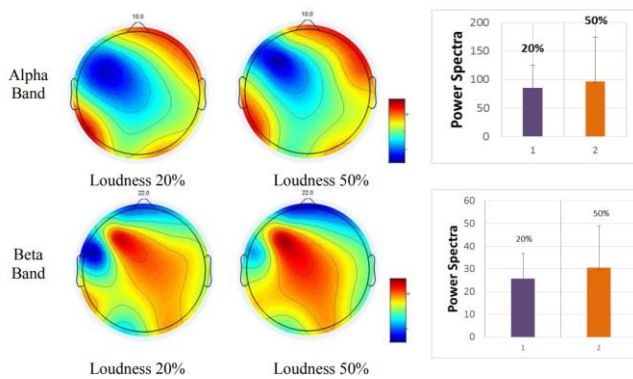
Gambar 4.8 Diagram metode eksperimen (S N Khotimah dkk., 2019)

Hasil spektrum daya pada pita frekuensi alfa dari belahan otak kanan dan kiri serta pemetaannya bagi mahasiswa S-1 non-musisi untuk kondisi istirahat (tanpa musik) dan sedang mendengarkan musik ditunjukkan pada Gambar 4.9.



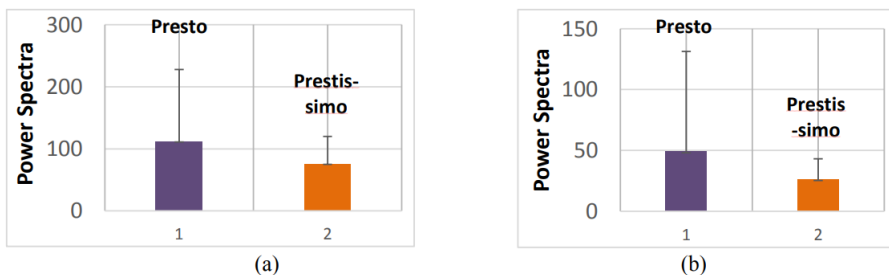
Gambar 4.9 Spektrum daya pita alfa dan pemetaannya ketika subjek dalam keadaan istirahat (tanpa musik) dan sedang mendengarkan musik (S N Khotimah dkk., 2019).

Ketika mendengarkan musik, didapatkan bahwa belahan otak kanan lebih aktif dibandingkan belahan otak kiri karena belahan kanan memiliki kekuatan spektrum yang jauh lebih tinggi secara signifikan ($p < 0,05$). Hal ini juga diperkuat dengan pemeriksaan visual pemetaan otak bahwa belahan kanan memiliki lebih banyak wilayah dengan warna merah. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Handayani dkk., 2015) bahwa kesadaran musik ada di belahan otak kanan. Semua subjek juga terbiasa menggunakan telinga kanan saat bertelepon. Oleh karena itu, tampaknya ada hubungan antara dominasi otak dan telinga yang biasa digunakan untuk mendengarkan telepon seluler.



Gambar 4.10 Pengaruh *loudness* pada *spectral* daya pita alfa dan beta (S N Khotimah dkk., 2019)

Peningkatan intensitas bunyi dari 20% menjadi 50% sedikit meningkatkan nilai rata-rata *spectral* daya pita alfa ($p\ value = 0,45$) dan pita beta ($p\ value = 0,35$) seperti terlihat pada Gambar 4.10. Dari pemetaan otak, dapat dilihat bahwa *spectral* daya meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas bunyi. Nilai spektrum daya pita alfa lebih tinggi dari pita beta yang bersesuaian dengan kondisi subjek dalam keadaan rileks bukan dalam keadaan waspada.



Gambar 4.11 Kenaikan tempo sebuah lagu pada *spectral* daya: (a) pita alfa dan (b) pita beta (S N Khotimah dkk., 2019)

Peningkatan tempo dari nilai aslinya suatu lagu nampaknya sedikit menurunkan spektrum daya pita alfa ($p \text{ value} = 0,25$) seperti terlihat pada Gambar 4.11 (a) . Indikasi bahwa spektrum kekuatan pita alfa menurun dari tempo aslinya juga dilaporkan oleh penelitian lain (Yuan dkk., 2009). Gambar 4.11 (b) menunjukkan bahwa spektrum kekuatan pita beta menurun dengan tingkat signifikansi 0,30 jika tempo musik ditingkatkan. Hasil ini berbeda dengan penelitian lainnya (Gentry dkk., 2013). Mengubah tempo musik suatu lagu akan membuat lagu tersebut menjadi kurang natural sehingga mengurangi minat untuk mendengarkan lagu tersebut.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa belahan otak kanan lebih aktif ketika sedang mendengarkan musik. Rata-rata spektrum daya dari semua subjek sedikit meningkat ketika *loudness* atau intensitas musik ditingkatkan dari 20% menjadi 50% ($p \text{ value} = 0,35-0,45$). Peningkatan *loudness* musik dapat menghasilkan perbedaan respons individu. Spektrum kekuatan pita alfa dan beta menurun dari tempo asli ke tempo yang lebih tinggi ($p \text{ value} = 0,25-0,30$).

4.5 Analisis qEEG pada Gangguan Jiwa: Skizofrenia

Skizofrenia adalah gangguan mental berat yang dapat memengaruhi tingkah laku, emosi, dan komunikasi dengan gejala seperti halusinasi (mendengarkan bisikan yang tidak ada atau tidak nyata), delusi (meyakini sesuatu yang sebenarnya tidak nyata), gangguan kognitif dan perubahan perilaku (Tandon dkk., 2013). Ilustrasi gejala yang dialami penderita skizofrenia diperlihatkan pada Gambar 4.12.

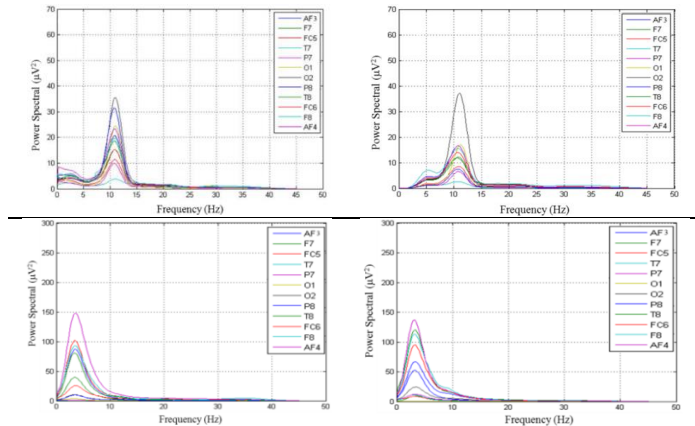


Gambar 4.12 Ilustrasi gejala pada penderita skizofrenia

Penelitian kami ini bertujuan untuk membandingkan distribusi rapat spektrum daya (PSD) dari rekaman sinyal EEG pada rentang frekuensi delta, theta, alfa, beta, dan gamma antara 4 pasien skizofrenia dan 4 subjek sehat

dalam keadaan istirahat dengan mata tertutup. Pasien skizofrenia dipilihkan secara klinis oleh dokter di Rumah Sakit Jiwa Provinsi Jawa Barat.

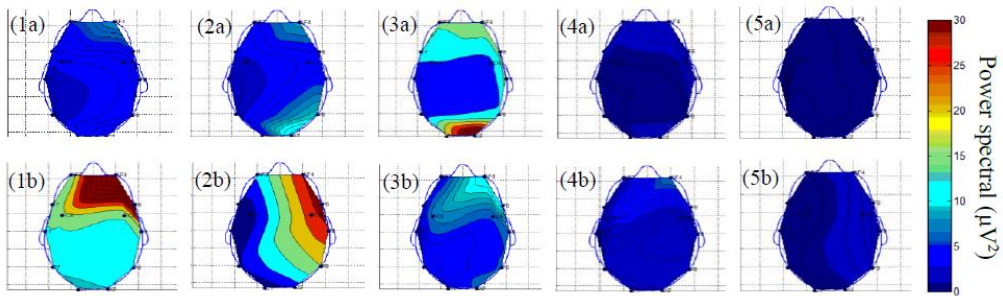
Hasil penelitian memperlihatkan nilai PSD tertinggi pada pasien skizofrenia berada pada pita delta, sedangkan pada subjek sehat berada pada pita alfa (Gambar 4.13). Penggeseran frekuensi ke nilai lebih rendah secara signifikan ini bersesuaian dengan defisit kognitif sebagai aspek utama psikopatologi skizofrenia.



Gambar 4.13 Kurva PSD: (atas) subjek sehat dan (bawah) pasien skizofrenia (Akbar dkk., 2016)

Analisis pada PSD gelombang otak menunjukkan adanya peningkatan spektrum daya dalam rentang frekuensi gelombang delta (2-4 Hz) pada pasien skizofrenia meningkat sepuluh kali lipat dibandingkan subjek sehat. Spektrum daya dalam rentang frekuensi gelombang theta (4-8 Hz) pada pasien skizofrenia meningkat tiga kali lipat dibandingkan subjek sehat. Nilai terbesar gelombang delta pada posisi elektroda AF4 (area frontal) yang dikaitkan dengan rendahnya tingkat pemikiran dan respons emosional pada pasien skizofrenia. Temuan ini didukung oleh Schellenberg dkk. (1990). Selain itu, spektrum daya dari gelombang alfa (8-12 Hz) pada pasien skizofrenia sangat rendah dibandingkan dengan subjek sehat.

Hasil *brain mapping* (Gambar 4.14) menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan pada aktivitas gelombang delta dan gelombang theta pada lobus frontal dari pasien skizofrenia, sedangkan gelombang alfa menunjukkan penurunan lobus oksipital pada semua pasien skizofrenia.



Gambar 4.14 *brain mapping* pada rentang frekuensi (1) delta, (2) theta, (3) alpha, (4) beta, (5) gamma untuk (a) subjek sehat, (b) pasien skizofrenia (Akbar dkk., 2016)

Spektrum daya pada gelombang beta dan gamma tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antara penderita skizofrenia dan normal. Hal ini bisa saja terjadi karena subjek sedang tidak dalam keadaan kesadaran penuh dan tidak mengalami aktivitas mental yang tinggi.

4.6 Analisis qEEG pada Gangguan Jiwa: Bipolar

Gangguan bipolar adalah kondisi kesehatan mental yang ditandai dengan perubahan suasana hati yang ekstrem antara mania dan depresi. Episode mania terjadi ketika suasana hati yang dominan adalah sangat bahagia atau mudah tersinggung. Episode depresi terjadi ketika ada suasana hati yang sangat sedih atau hilangnya kemampuan untuk mengalami kegembiraan atau kesenangan. Orang dengan gangguan bipolar umumnya juga memiliki periode suasana hati yang netral (Preda, 2024). Penelitian gangguan bipolar dengan EEG menunjukkan peningkatan daya gelombang otak pada frekuensi beta dan gamma serta terdapat perbedaan tingkat koherensi dibandingkan dengan subjek sehat (Kam dkk., 2013).



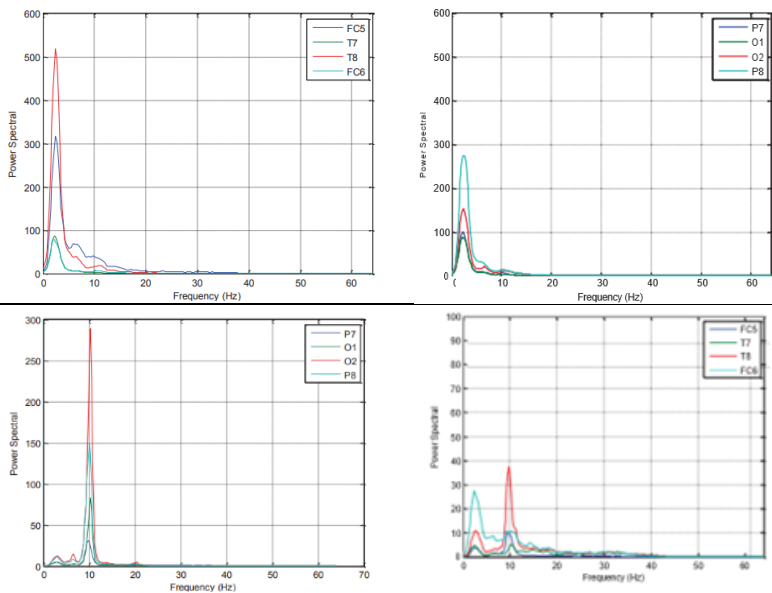
Gambar 4.15 Ilustrasi gejala gangguan bipolar (flaticon.com)

Strakowski dkk. (2000) meneliti bahwa area korteks prefrontal pada otak pasien dewasa dengan gangguan bipolar cenderung lebih kecil dan tidak

berfungsi dengan baik dibandingkan dengan orang dewasa muda yang sehat. Korteks prefrontal adalah bagian depan lobus frontal yang mempunyai fungsi neuropsikiatri (perencanaan, pengorganisasian, pemecahan masalah, perhatian selektif, kepribadian), fungsi motorik, emosi dan perilaku (Breedlove & Watson, 2013).

Penelitian kami ini bertujuan untuk membandingkan distribusi rapat spektrum daya (PSD) dan koherensi dari rekaman sinyal EEG pada rentang frekuensi delta, theta, alfa, dan beta antara pasien *bipolar disorder* (BD) dan *healthy subjek* (HS) dalam keadaan istirahat dengan mata tertutup selama 3 menit.

Subjek terdiri atas 4 pasien bipolar dan 6 subjek sehat. Empat pasien gangguan bipolar (3 laki-laki dan 1 perempuan) yang terdiagnosis DSM-IV (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorder Edition IV*). Pasien gangguan bipolar dipilih secara klinis oleh dokter di Rumah Sakit Jiwa Provinsi Jawa Barat. Subjek sehat berusia 30-40 tahun. Subjek sehat dipilih dengan beberapa kriteria seperti tidak pernah mengalami kelainan otak, cedera otak, dan tidak memiliki riwayat penyakit yang berhubungan dengan neurologis.



Gambar 4.16 spektrum daya dalam keadaan istirahat: (atas) gangguan bipolar dan (bawah) subjek sehat (Handayani dkk., 2017)

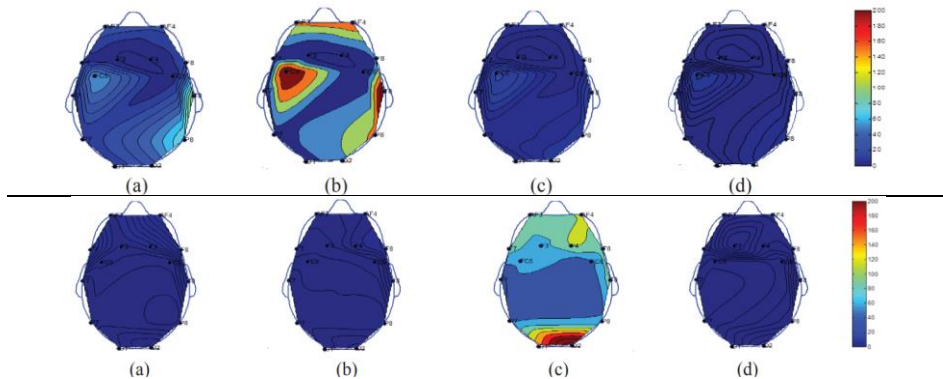
Hasil penelitian grafik spektrum daya pada area frontal dalam keadaan istirahat diperlihatkan pada Gambar 4.16. Pada gangguan bipolar, spektrum daya bergeser menuju frekuensi yang lebih rendah (delta dan theta) dan terjadi penurunan pada frekuensi alpha. Sedangkan pada pada subjek sehat, spektrum daya dominan pada frekuensi alfa.

Aktivitas elektrofisiologi dalam keadaan *resting* secara teoretis berbeda antara subjek sehat dan orang dengan gangguan jiwa, termasuk pada pasien bipolar (Thibodeau dkk., 2006). Beberapa penelitian sebelumnya melaporkan adanya peningkatan daya pada semua pita frekuensi pada pasien bipolar dibandingkan dengan subjek sehat (El-Badri dkk., 2001). Başar dkk. (2012) melaporkan penurunan daya pada pita alpha untuk pada pasien gangguan bipolar eutimik. Tabel 4.5 menunjukkan hasil daya rata-rata untuk pita frekuensi delta, theta, alfa, dan beta pada pasien dengan gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS). Data diuji statistik dengan *t-test* dan selanjutnya diperoleh p-value. Secara umum, daya pada pita frekuensi delta, theta, dan beta dari penderita gangguan bipolar lebih tinggi dibandingkan subjek sehat. Sedangkan daya pada pita alfa dari penderita gangguan bipolar mengalami penurunan dibandingkan subjek sehat.

Tabel 4.5 Nilai rata-rata daya sinyal EEG untuk pita frekuensi delta, theta, alfa dan beta pada gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS) (Handayani dkk., 2017).

electrode	Delta Power			Theta Power		
	BD	HS	p-value	BD	HS	p-value
AF3	2713.68	75.90	0.055	493.88	32.36	0.029
AF4	2605.12	106.24	0.061	191.91	43.29	0.071
FC5	3736.28	69.20	0.039	699.62	22.17	0.022
FC6	874.43	67.14	0.013	122.81	32.01	0.043
F7	876.71	100.54	0.025	133.53	31.78	0.032
F8	1638.18	122.44	0.022	268.98	44.99	0.085
electrode	Alpha Power			Beta Power		
	BD	HS	p-value	BD	HS	p-value
AF3	376.81	246.23	0.049	232.68	70.38	0.062
AF4	180.62	285.65	0.091	115.68	94.48	0.014
FC5	541.79	135.67	0.039	330.41	58.44	0.025
FC6	151.13	184.43	0.033	119.35	75.88	0.039
F7	134.39	188.09	0.064	111.96	58.01	0.055
F8	229.89	236.34	0.081	165.26	89.58	0.019

Hasil *brain mapping* diperlihatkan pada Gambar 4.17. Pada gangguan bipolar, spektrum daya paling dominan pada pita frekuensi teta dan delta dengan aktivitas otak tertinggi di area FC5, T8, AF3 dan AF4. Sedangkan pada pada subjek sehat, spektrum daya dominan pada frekuensi alfa di lobus oksipital di area O1 dan O2. Aktivitas pada frekuensi delta dan theta rendah.



Gambar 4.17 *brain mapping* pada rentang frekuensi (a) delta, (b) theta, (c) alpha dan (d) beta untuk (atas) gangguan bipolar dan (bawah) subjek sehat (Handayani dkk., 2017)

Koherensi adalah ukuran yang digunakan untuk membandingkan hubungan antara dua sinyal. Koherensi mengukur korelasi yang dinormalisasi antara dua spektrum daya. Hasil koherensi *intra-hemisphere* untuk frekuensi delta, theta, alfa dan beta pada gangguan bipolar dan subjek sehat disajikan pada Tabel 4.6. Dapat disimpulkan bahwa koherensi pada semua pasangan elektroda untuk seluruh pita frekuensi pada gangguan bipolar lebih kecil dibandingkan pada subjek sehat. Koherensi tertinggi terdapat pada pasangan elektroda F8-FC6 (wilayah depan kanan). Koherensi *intra-hemisphere* sisi kanan (pasangan elektroda bernomor genap) lebih besar dibandingkan dengan hemisfer sisi kiri (pasangan elektroda bernomor ganjil). Hal ini mengarahkan bahwa pada gangguan bipolar terjadi ‘kurang sinkronisasi’.

Koherensi *inter-hemisphere* menyatakan derajat koherensi antara belahan otak kiri dan kanan untuk posisi elektroda yang sama. Seperti terlihat pada Tabel 4.7, koherensi pada semua pita frekuensi pada subjek sehat lebih besar dibandingkan koherensi pada gangguan bipolar. Koherensi tertinggi baik pada gangguan bipolar maupun subjek sehat terjadi pada pasangan elektroda AF3-AF4, karena mempunyai jarak terpendek dibandingkan dengan pasangan elektroda lainnya. Uji koherensi interhemisphere menunjukkan bahwa

sinkronisasi fungsional antara hemisfer otak kiri dan kanan pada penderita gangguan bipolar lemah jika dibandingkan dengan subjek sehat.

Tabel 4.6 Koherensi *intra-hemisphere* untuk pita frekuensi delta, theta, alfa dan beta pada gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS) (Handayani dkk., 2017).

Delta Coherence				Theta Coherence		
electrode	BD	HS	p-value	BD	HS	p-value
AF3-F7	0.07 (0.05)	0.30 (0.09)	0.059	0.06 (0.03)	0.43 (0.04)	0.019
AF3-FC5	0.05 (0.04)	0.16 (0.04)	0.022	0.03 (0.01)	0.34 (0.08)	0.032
F7-FC5	0.08 (0.01)	0.11 (0.05)	0.034	0.03 (0.01)	0.27 (0.08)	0.034
AF4-F8	0.29 (0.17)	0.62 (0.04)	0.031	0.34 (0.12)	0.70 (0.03)	0.045
AF4-FC6	0.28 (0.17)	0.57 (0.05)	0.014	0.36 (0.12)	0.72 (0.02)	0.019
F8-FC6	0.32 (0.27)	0.68 (0.06)	0.021	0.40 (0.18)	0.82 (0.02)	0.051

Alpha Coherence				Beta Coherence		
electrode	BD	HS	p-value	BD	HS	p-value
AF3-F7	0.18 (0.10)	0.76 (0.18)	0.022	0.19 (0.08)	0.67 (0.08)	0.069
AF3-FC5	0.08 (0.05)	0.76 (0.17)	0.042	0.11 (0.08)	0.58 (0.11)	0.028
F7-FC5	0.04 (0.03)	0.75 (0.18)	0.004	0.08 (0.03)	0.61 (0.11)	0.039
AF4-F8	0.48 (0.12)	0.87 (0.07)	0.038	0.41 (0.16)	0.77 (0.08)	0.081
AF4-FC6	0.61 (0.13)	0.85 (0.05)	0.049	0.51 (0.14)	0.73 (0.09)	0.015
F8-FC6	0.56 (0.13)	0.91 (0.03)	0.051	0.48 (0.16)	0.81 (0.08)	0.024

Tabel 4.7 Koherensi *inter-hemisphere* untuk pita frekuensi delta, theta, alfa, dan beta pada gangguan bipolar (BD) dan subjek sehat (HS) (Handayani dkk., 2017).

Delta Coherence				Theta Coherence		
electrode	BD	HS	p-value	BD	HS	p-value
AF3-AF4	0.43 (0.23)	0.62 (0.05)	0.102	0.47 (0.23)	0.72 (0.05)	0.023
FC5-FC6	0.08 (0.01)	0.09 (0.03)	0.044	0.04 (0.03)	0.23 (0.09)	0.204
F7-F8	0.07 (0.01)	0.12 (0.06)	0.051	0.03 (0.01)	0.35 (0.07)	0.181

Alpha Coherence				Beta Coherence		
electrode	BD	HS	p-value	BD	HS	p-value
AF3-AF4	0.44 (0.25)	0.89 (0.06)	0.038	0.32 (0.21)	0.65 (0.14)	0.017
FC5-FC6	0.11 (0.07)	0.55 (0.16)	0.219	0.10 (0.06)	0.32 (0.10)	0.048
F7-F8	0.13 (0.10)	0.64 (0.19)	0.452	0.12 (0.07)	0.36 (0.13)	0.338

Dari hasil analisis yang telah dilakukan pada *spectral* daya dan koherensi maka disimpulkan bahwa terdapat pergeseran spektrum daya ke arah pita frekuensi rendah, yaitu delta dan theta. Tingkat koherensi intra-hemisfer dan antar-hemisfer lebih rendah dibandingkan subjek sehat. Hasil uji koherensi ini dapat dijadikan acuan dalam identifikasi pasien gangguan bipolar karena koherensi EEG merupakan indeks konektivitas fungsional.

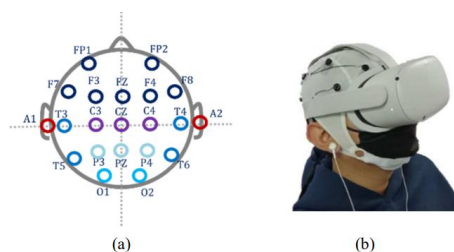
4.7 Analisis qEEG untuk Deteksi *Virtual Reality Sickness*

Pandemi COVID-19 telah menjadi peristiwa global dan telah mengubah banyak aspek kehidupan manusia. Salah satunya adalah aktivitas yang umumnya dilakukan secara *offline* berubah menjadi secara *online* atau melalui teknologi dan perangkat elektronik. Ketika pembatasan sosial dan *lockdown* menjadi hal biasa untuk mengekang penyebaran virus, industri dan individu beralih ke pemanfaatan teknologi realitas virtual (*virtual reality*, VR). VR merupakan simulasi lingkungan virtual pada komputer yang menempatkan pengguna di dalam ruang simulasi 3-dimensi sehingga dapat berinteraksi dalam lingkungan tersebut. Cakupan penggunaan VR sangat luas, mulai dari hiburan hingga pendidikan. Di bidang hiburan, VR dapat digunakan untuk bermain *game*, menonton film, teater 3D, dan lainnya (Cheng dkk., 2022; Gegung, 2021). Sedangkan dalam dunia pendidikan, VR banyak digunakan untuk pendidikan kedokteran, seperti membantu proses operasi, virtual lab, dan pekerjaan laboratorium (Mehrfard dkk., 2021).

Penggunaan teknologi VR diperkirakan akan terus meningkat dan berkembang pasca pandemi COVID-19 seiring kemudahan akses VR dan pribadi oleh masyarakat. Di balik kepopuleran penggunaannya, terdapat keluhan ketidaknyamanan yang dirasakan para pengguna VR. Pada umumnya, pengguna teknologi VR mengalami beberapa jenis mual (*nausea*), mata tegang (*eye strain*), berkeringat (*sweating*), dan pusing (*dizziness*) sampai batas tertentu. Gejala ini mirip seperti mabuk yang dialami seseorang ketika menaiki kendaraan, baik di darat, laut, maupun udara. Gejala mirip mabuk ini dinamakan sebagai *virtual reality sickness* (Chang dkk., 2020; Laessoe dkk., 2023). Penamaan gejala mabuk diberikan sesuai dengan kegiatan yang dilakukan saat terjadi, misal *gaming sickness*, *cinerama sickness* atau *simulator sickness*.

Gejala *virtual reality sickness* (VRS) sering diukur menggunakan metode *simulator sickness questionnaire* (SSQ) (Kennedy dkk., 1993). SSQ secara subjektif digunakan untuk melihat apakah gejala VRS dialami seseorang setelah menggunakan VR. SSQ diberikan sesaat sebelum dan sesudah seseorang menggunakan VR. Ini merupakan kelemahan tersendiri dari SSQ karena tidak bisa menggambarkan munculnya gejala VRS secara *real time* (Liu dkk., 2020). Untuk mengatasi keterbatasan dari penggunaan SSQ, metode yang berbasis parameter sinyal fisiologis dikembangkan seperti elektrogastrografi (EGG), elektrokardiografi (EKG), *salivary cortisol level*, kadar oksigen, pengukuran tekanan darah, denyut nadi, elektrookulografi (EOG) dan elektroensefalografi (EEG). Pada penelitian ini, kami menggunakan EEG yang mengukur gejala VRS secara obyektif.

Ada dua jenis VR berdasarkan kompleksitasnya, yaitu statis dan dinamis. Jenis-jenis VR berdasarkan perangkatnya mulai dari simulator mengemudi dan video di layar (2D dan 3D) dan media tayang *head-mounted display* (HMD). HMD adalah perangkat tampilan yang dipakai di kepala pengguna dan dirancang untuk menyajikan pengalaman visual yang imersif. Perangkat ini terdiri atas dua layar, satu untuk setiap mata, yang menampilkan gambar atau video secara terpisah untuk menciptakan efek tiga dimensi. HMD juga dilengkapi dengan sensor dan pelacak untuk mendeteksi gerakan kepala pengguna, memungkinkan tampilan berubah sesuai dengan pergerakan kepala untuk memberikan pengalaman yang lebih nyata. Agar EEG hanya merekam gejala dari VRS saja maka digunakan VR statis dengan media penayangan VR berbasis layar dan berbasis HMD yang diukur dengan *medical-grade* EEG (Gambar 4.18 (a))

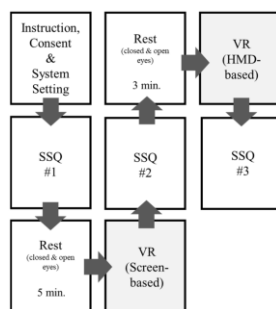


Gambar 4.18 Konfigurasi penempatan elektroda EEG (a) Montase referensial (b) Peserta mengenakan topi dengan elektroda EEG dan HMD (Suwandi dkk., 2023a)

Sinyal fisiologis dari gelombang otak pada frekuensi alfa (8-13Hz) dan beta rendah (13-21 Hz) menarik untuk dianalisis. Gelombang otak dengan

frekuensi alfa terjadi pada subjek dalam keadaan sadar dan santai. Namun, jika seseorang mengalami aktivitas mental, terjaga penuh atau dalam keadaan berpikir maka terjadi gelombang otak dengan frekuensi beta (Abhang dkk., 2016). Analisis sinyal EEG pada penelitian ini akan fokus pada pita frekuensi alfa dan beta rendah.

Sebanyak 22 laki-laki berusia 20-24 tahun berpartisipasi menjadi relawan dalam penelitian ini. Seluruh calon subjek mengikuti proses skrining melalui pengisian *motion sickness susceptibility questionnaire* (MSSQ). Selain itu, pengalaman menggunakan perangkat VR menjadi salah satu faktor dalam merekrut peserta. Peserta yang terbiasa menggunakan perangkat VR atau pernah menggunakan perangkat VR dalam tiga bulan terakhir tidak akan dipilih. Berdasarkan kuesioner, dipilih partisipan yang tidak memiliki riwayat gangguan saraf dan vestibular. Mereka juga tidak sedang dalam pengobatan atau dalam pengaruh obat-obatan. Seluruh peserta juga dipastikan tidak pernah atau jarang menggunakan perangkat VR, khususnya dalam enam bulan terakhir. Berdasarkan hasil MSSQ, lima orang mendapat nilai tinggi sehingga dikategorikan memiliki riwayat mabuk perjalanan berat dari 22 peserta terpilih. Desain protokol eksperimen untuk akuisisi data disajikan pada Gambar 4.19.

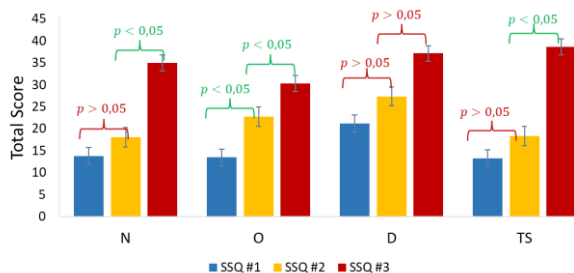


Gambar 4.19 Desain protokol eksperimen untuk akuisisi data (Suwandi, dkk., 2023a)

Hasil rata-rata skor SSQ dari seluruh peserta disajikan pada Gambar 4.20. Skor SSQ diolah untuk setiap kategori gejala: mual (N), okulomotor (O), dan disorientasi (D) serta total skor (TS). Secara umum terjadi peningkatan skor, baik pada tiap kategori gejala maupun total dari SSQ#1 ke SSQ#2 dan SSQ#2 ke SSQ#3. Tidak ada perbedaan signifikan antara SSQ#1 ke SSQ#2 ($p > 0.05$), kecuali pada gejala okulomotor. Okulomotor ini dikaitkan dengan beberapa gejala, seperti ketidaknyamanan umum, kelelahan, sakit kepala, ketegangan

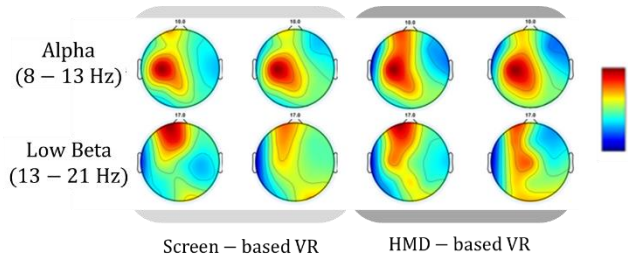
mata, kesulitan fokus dan berkonsentrasi, serta penglihatan kabur (Kennedy dkk., 1993).

Pengaruh penggunaan media tayang HMD pada VRS dianalisis dari data SSQ#2 ke SSQ#3 yang terjadi peningkatan skor secara signifikan ($p < 0,05$) pada kategori mual, okulomotor, dan total skor. Sedangkan pada kategori disorientasi peningkatannya tidak signifikan ($p > 0,05$). Peningkatan skor total pada SSQ#2 (18,28) menjadi SSQ#3 (38,65) menunjukkan bahwa ketika pemutaran VR melalui HMD, subjek mengalami peningkatan keparahan VRS selama dan setelah pemutaran VR (Naqvi dkk., 2015). Skor SSQ meningkat dari VR berbasis layar ke VR berbasis HMD. Hal ini menunjukkan bahwa VR berbasis HMD sangat memengaruhi munculnya VRS.



Gambar 4.20 Skor rata-rata SSQ untuk tiga tahap: awal, setelah VR berbasis layar, dan setelah VR berbasis HMD (Suwandi, dkk., 2023a)

Aktivitas kelistrikan pada otak seseorang dapat dilihat melalui *brain maps* yang memiliki warna biru untuk menunjukkan PSD rendah hingga warna merah untuk menunjukkan PSD tinggi. Berdasarkan Gambar 4.21, pada rentang frekuensi gelombang alfa, area otak yang teraktivasi saat subjek melihat VR berbasis layar berada di lobus parietal. Ketika tayangan menjadi VR berbasis HMD, area otak yang teraktivasi menjadi semakin ke bagian frontal. Begitu pula pada rentang frekuensi beta rendah, terlihat adanya perubahan sebaran area otak yang teraktivasi, meski tidak seluas rentang alfa. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa nilai PSD hanya meningkat pada daerah lobus tertentu, khususnya pada daerah frontal dan parietal.



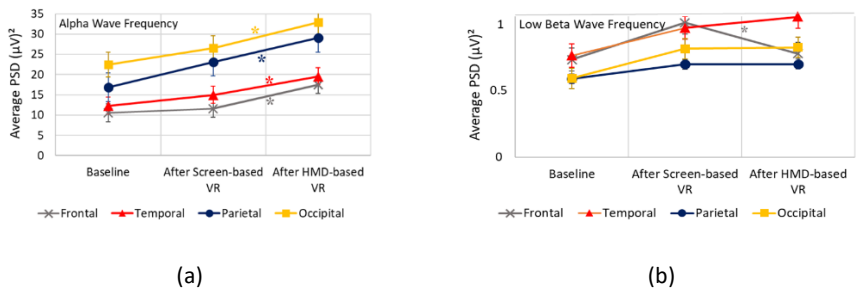
Gambar 4.21 Brain maps dari seorang subjek saat melihat VR (Suwandi, dkk., 2023a)

Hasil nilai puncak PSD yang diperoleh dari seluruh peserta pada setiap elektroda yang sama dirata-ratakan. Kemudian, rata-rata puncak PSD dari elektroda-elektroda dikelompokkan berdasarkan lobus otak (frotal, parietal, temporal dan oksipital) dan dirata-ratakan kembali untuk memperoleh nilai rata-rata tiap lobus. Hanya nilai rata-rata puncak PSD pada rentang gelombang alfa dan beta rendah yang dianalisis sesuai dengan tujuan penelitian. Hasil nilai rata-rata puncak PSD pada tiap lobus diperlihatkan pada untuk frekuensi alfa (Gambar 4.22). Pada penelitian ini, subjek dalam kondisi awal rileks. Hal ini berkorelasi dengan nilai rata-rata PSD (antara 10.56 dan 32.92 $(\mu V)^2$) untuk frekuensi alfa yang jauh lebih tinggi dibandingkan nilai rata-rata PSD (antara 0.56 dan 0.99 $(\mu V)^2$) untuk frekuensi beta rendah.

Gambar 4.22 (a) memperlihatkan bahwa untuk rentang frekuensi gelombang alfa (8-13 Hz), rata-rata nilai puncak PSD di seluruh area otak meningkat ketika peserta diberi stimulus VR berbasis layar. Begitu pula ketika VR yang diberikan diubah melalui HMD, terlihat rata-rata nilai puncak PSD semakin meningkat. Namun jika dibandingkan antara penyediaan VR melalui layar dan HMD, terlihat bahwa peningkatan rata-rata nilai puncak PSD hanya signifikan pada kasus VR berbasis HMD ($p < 0,05$). Peningkatan signifikan ini terjadi di seluruh area otak.

Gambar 4.22 (b) memperlihatkan bahwa untuk rentang frekuensi gelombang beta rendah (13-21 Hz), rata-rata nilai puncak PSD meningkat di daerah temporal, parietal, dan oksipital. Perubahan VR dari layar ke HMD menyebabkan terjadinya perubahan PSD yang tidak signifikan di area temporal, parietal, dan oksipital dan hal ini juga diamati oleh Nürnbergger dkk. (2021). Sebaliknya perubahan nilai PSD terjadi signifikan pada area frontal ketika terjadi perubahan media tayang VR dari layar ke HMD. Hal ini berkaitan dengan fungsi lobus frontal yang mengontrol fungsi-fungsi utama

yang berkaitan dengan kesadaran dan komunikasi, memori, perhatian, dan peran lainnya (Abhang dkk., 2016; Klimesch dkk., 1993).

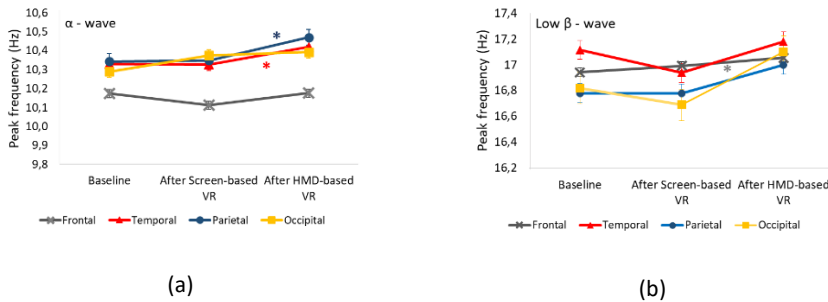


Gambar 4.22 Perubahan nilai rata-rata PSD dari kondisi dasar - setelah VR berbasis layar - setelah VR berbasis HMD pada rentang frekuensi: (a) alfa (8-13Hz) dan (b) beta rendah (13-21 Hz). * tanda menunjukkan bahwa $p < 0,05$ (Suwandi, dkk., 2023a)

Pergeseran nilai frekuensi puncak kurva PSD dapat mengindikasikan adanya perubahan keadaan mental seseorang. Pergeseran kondisi mental ini merupakan salah satu hal yang dapat mengindikasikan munculnya gejala VRS pada subjek. Pergeseran nilai frekuensi puncak ditunjukkan pada Gambar 23 untuk rentang alfa dan beta rendah. Frekuensi puncak alfa bergeser ke nilai yang lebih kecil untuk area frontal (10,17 – 10,11 Hz) dan temporal (10,33 – 10,32 Hz). Sedangkan pada parietal (10,34 – 10,35 Hz) dan oksipital (10,29 – 10,37 Hz) pergeseran ke arah frekuensi yang lebih tinggi. Meskipun ada perubahan, nilainya tidak signifikan $p > 0,05$. Hal ini berkaitan dengan kebiasaan subjek menonton suatu siaran dari layar. Kondisi ini menyebabkan kondisi mental subjek tidak banyak berubah, kecuali pada lobus oksipital yang berfungsi memproses rangsangan visual dari layar.

Frekuensi puncak alfa bergeser ke nilai yang lebih tinggi terjadi ketika media tayang VR berubah dari berbasis layar ke HMD (Gambar 4.23 (a)) untuk semua lobus dengan perubahan signifikan terjadi pada lobus temporal dan parietal. Sesuai dengan penelitian sebelumnya, efek VR pada HMD lebih dirasakan oleh subjek, sehingga kondisi mentalnya berubah menjadi lebih fokus (Caserman dkk., 2021). Menariknya, area oksipital hanya bergeser sedikit frekuensinya. Hal ini berkaitan dengan proses penerimaan rangsangan VR dari awal sehingga tidak ada pengalaman baru yang diterima pada area tersebut.

Pergeseran rentang frekuensi gelombang beta rendah memiliki pola yang berbeda dari gelombang alfa, seperti terlihat pada Gambar 4.23 (b). Dari *baseline* ke VR berbasis layar, daerah temporal, parietal, dan oksipital mengalami pergeseran serupa, yaitu ke nilai frekuensi yang lebih kecil. Kemudian dari VR berbasis layar ke HMD, terjadi pergeseran frekuensi ke nilai yang lebih tinggi, dengan area frontal mengalami perubahan secara signifikan ($p < 0,05$).



Gambar 4.23 Pergeseran nilai rata-rata frekuensi puncak dari: (a) pita alfa dan (b) pita beta rendah dari kondisi dasar - setelah VR berbasis layar - setelah VR berbasis HMD. * tanda menunjukkan bahwa $p < 0,05$ (Suwandi, dkk., 2023a)

Penelitian ini untuk menyelidiki bagaimana gejala *virtual reality sickness* (VRS) muncul berdasarkan parameter fisik sinyal EEG pada dua media tayang, yaitu layar dan HMD. Parameter fisik sinyal EEG yang digunakan adalah PSD (yang berkaitan dengan aktivitas otak) dan pergeseran puncak alfa dan beta rendah (yang menunjukkan perubahan kondisi mental). Gejala VRS juga diukur menggunakan metode kuesioner SSQ.

4.8 Rencana Penelitian Lanjutan

Kolaborasi

Oleh karena banyak pemanfaatan EEG untuk diagnosis kasus-kasus di bidang lainnya maka diperlukan kolaborasi dengan bidang kelimuan yang terkait, seperti psikologi, biologi, teknik biomedika, desain komunikasi visual, kedokteran, dan lain-lain. Hal ini terkait dengan penelitian EEG yang bersifat multidisiplin sehingga hasilnya dapat menjadi lebih komprehensif dan bermanfaat.

EEG masa depan: *Brain Computer Interfaces*

Brain-Computer Interface (BCI) mewakili teknologi transformatif yang memungkinkan komunikasi langsung antara otak dan perangkat eksternal, memfasilitasi kontrol dan komunikasi bagi individu dengan gangguan neuromuskular parah. BCI sangat penting untuk memajukan teknologi ini. Dalam sistem BCI, sinyal EEG membantu memulihkan fungsi sensorik dan motorik pada pasien yang memiliki disabilitas motorik parah (Siuly dkk., 2016). BCI mempunyai aplikasi potensial dalam rehabilitasi medis, alat bantu komunikasi, dan bahkan meningkatkan kemampuan manusia.

5 PENUTUP

Pembahasan elektrofisiologi memerlukan prinsip biofisika untuk memahami dan menafsirkan aktivitas listrik di dalam organ atau jaringan yang diteliti. Dengan demikian, hasil elektrogram yang direpresentasikan dalam beda potensial terhadap waktu dapat dianalisis untuk bisa membantu diagnosis medis. Penelitian tentang elektrofisiologi di Kelompok Keahlian Fisika Nuklir dan Biofisika ITB mengarah ke eletrokardiografi dan elektroensefalografi yang mempunyai visibilitas tinggi dalam medis dan masyarakat.

Penggunaan *wearable* ECG atau *mobile* EKG menjadi semakin lumrah karena dapat berpotensi sebagai sebuah perangkat kesehatan pribadi. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk menguji akurasi sinyal dari Kardiamobile dalam menentukan *heart rate* (HR). Penelitian telah dilanjutkan untuk mendeteksi aritmia dengan penentuan parameter domain waktu dari *Heart Rate Variability* dan analisis entropi secara visual terhadap *Symbolic Recurrence Plot* (SRP). Hasil visual SRP ini menghasilkan prospek menarik untuk dieksplorasi lebih lanjut dengan memanfaatkan *Artificial Intelligence* untuk membedakan gambar SRP dengan lebih akurat untuk tujuan klasifikasi.

Pada EEG, peningkatan nilai *power spectral density* (PSD) berkaitan dengan kenaikan aktivitas otak, pergeseran nilai frekuensi berkaitan dengan perubahan kondisi mental dan koherensi antara dua sinyal berkaitan dengan indeks konektivitas fungsional. *Consumer-grade* EEG banyak dijumpai dan digunakan untuk penelitian. Oleh karena itu telah dilakukan pengujian kualitas rekaman dari perangkat *consumer-grade* EEG (Emotiv Epor X) terhadap rekaman dari perangkat *medical-grade* EEG (Neurosoft Neuron-Spectrum-63). Penelitian dilanjutkan untuk analisis hasil pengolahan data EEG pada sejumlah kasus seperti pada subjek dengan gangguan jiwa skizfrenia dan bipolar, pengaruh pemberian stimulus musik, dan pengaruh *virtual reality* dalam menyebabkan gejala *virtual reality* sickness dengan media tayang berupa layar dan head-mounted display. Oleh karena banyak pemanfaatan EEG untuk diagnosis kasus-kasus di bidang lainnya maka kolaborasi penelitian lanjutan antar bidang-bidang tersebut diperlukan agar hasilnya lebih terintegrasi dan komprehensif.

6 UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segala puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat serta karunia-Nya. Suatu keberhasilan bukanlah hasil upaya sendiri, tetapi juga hasil kontribusi dari lingkungan yang mendukungnya. Perkenankan penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

- Rektor ITB dan jajarannya, pimpinan dan anggota Senat Akademik ITB serta Pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB untuk dukungan dalam proses pengusulan Guru Besar.
- Dekan FMIPA ITB (Prof. Wahyu Srigutomo), Wakil Dekan Sumberdaya (Dr. Hanni Garminia Y, S.Si., M.Si.) dan Wakil Dekan Akademik (Prof. Rukman Hertadi) atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.
- Ketua KK Fisika Nuklir dan Biofisika (Prof. Zaki Su'ud, Prof. Abdul Waris, dan Prof. Sidik Permana) dan juga kepada segenap anggota KK (Prof. Idam Arif, Prof. Widayani, Dr.rer.nat. Sparisoma Viridi, Dr.rer.nat. Freddy Haryanto, Galih R.F. Suwandi, M.Si., Dr. Novitrian, Dr. Khairul Basar, Prof. Rizal Kurniadi, Dr. Dwi Irwanto, Dr. Rena Widita, Dr. Asril Pramutadi, Dr. Syeileindra Pramuditya, Dr. Triati D.K. Wungu, Dr. Nur Asiah Aprianti, dan Fauiza P Lestari, M.Si.) atas dukungan dan kerja sama dalam kegiatan penelitian, tugas pengajaran, pengembangan institusi, dan pengabdian kepada masyarakat.
- Dosen Pembimbing penulis pada program sarjana Fisika ITB (Prof. Ir. Lilik Hendrajaya, Ph.D.), *supervisor* program master di Department of Physics University of Tasmania (Dr. Bruce Scott dan Dr. Ian Newman), dan tim pembimbing program doktor Fisika ITB (Prof. The Houw Liong, Prof. Idam Arif, dan Prof. Cynthia Linaya Radiman) yang telah mengarahkan, membimbing dan mendukung penelitian serta memberikan motivasi untuk terus maju.
- Para Guru Besar yang telah merekomendasikan usulan jabatan Guru Besar saya, yaitu: Prof. Dr. Zaki Suud, Prof. Idam Arif, Ph.D., Prof. Dr.rer.nat. Umar Fauzi, Prof. Drs. Freddy Permana Zen, MS., M.Sc., D.Sc., Prof. Dr.Eng. Mikrajuddin Abdullah, M.Si., Prof. Djulia Onggo, Ph.D., Prof. Dr. Sukrasno, Prof. Dr. Wahyu Setia Budi, MS. (Fisika FSM UNDIP), Dr. Ian A.

Newman (School of Mathematics and Physics, University of Tasmania), Prof. Hidetaka Arimura (Faculty of Medical Sciences, Kyushu University).

- Prof. Idam Arif atas bantuan dalam menelaah buku orasi ini, dan rekan Dr. Freddy Haryanto dan mahasiswa bimbingan yang membantu dalam penyusunan buku ini Galih RF Suwandi, M.Si. dan Auvi W Utami.
- Rekan-rekan dosen Fisika ITB atas kebersamaan, kekeluargaan, dan dukungannya selama ini.
- Para mantan mahasiswa bimbingan S-1, S2P, S-2, dan S-3 Fisika yang telah banyak mewarnai kegiatan penelitian penulis.
- Seluruh staf tenaga kependidikan di lingkungan Prodi Fisika dan FMIPA ITB atas bantuannya dalam urusan administrasi dan teknis peralatan.
- Suami tercinta Suharno, S.H. yang sabar, setia, dan penuh pengertian dalam menjalani dinamika kehidupan.
- Anak-anak tersayang: Noviana Khairunisa Suharno, S.T., M.T., dr. Kania Devi Suharno, dan Aditya Harnawan Suharno, S. Ked., serta anak mantu: Rizki Pramono, S.T., M.Eng., dan Prihadi Prasetyo, S.T. atas kesabaran dan dukungan yang memberikan kekuatan kepada penulis untuk berusaha menjadi lebih baik.
- Orang tua terkasih, almarhum Nursjamsi dan almarhumah Siti Maryam yang telah merawat, membesarkan dan mendidik penulis. Sejak masih kecil, penulis sangat mengagumi daya juang luar biasa dari Ibu yang ditinggal wafat Ayah sebulan sebelum penulis lahir.
- Alumni Fisika ITB 81, Alumni T04 81, Espero 77, Smansa81 guyub, dan Smansa Jabbat atas doa dan perhatiannya.

Akhir kata, penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas semua perhatian, bantuan, doa dan kerja samanya dalam pencapaian akademik ini. Semoga Allah Swt. membalas kebaikan Bapak/Ibu/Saudara dengan sebaik-baik balasan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhang, P. A., Gawali, B. W., dan Mehrotra, S. C. (2016): Technological Basics of EEG Recording and Operation of Apparatus, 19–50 *dalam Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804490-2.00002-6>
- Acharya, J. N., dan Acharya, V. J. (2019): Overview of EEG Montages and Principles of Localization, *Journal of Clinical Neurophysiology*, **36**(5), 325–329. <https://doi.org/10.1097/WNP.0000000000000538>
- Acharya, U. R., Oh, S. L., Hagiwara, Y., Tan, J. H., Adam, M., Gertych, A., dan Tan, R. S. (2017): A deep convolutional neural network model to classify heartbeats., *Computers in biology and medicine*, **89**, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2017.08.022>
- Adalarasu, K., Jagannath, M., Ramesh, S., dan Geethanjali, B. (2011): A review on influence of music on brain activity using signal processing and imaging system, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, **3**(4), 3276.
- Adeli, H., Zhou, Z., dan Dadmehr, N. (2003): Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform, *Journal of Neuroscience Methods*, **123**(1), 69–87. [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(02\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(02)00340-0)
- Adewale, Q., dan Panoutsos, G. (2021): Mental Workload Estimation using Wireless EEG Signals, *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 200–207. <https://doi.org/10.5220/0010251300002865>
- Akbar, Y., Khotimah, S. N., dan Haryanto, F. (2016): Spectral and brain mapping analysis of EEG based on Pwelch in schizophrenic patients, *Journal of Physics: Conference Series*, **694**, 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/694/1/012070>
- AliveCor, Inc. (20 Mei 2024): KardiaMobile 6L, .
- Amzica, F., dan Lopes da Silva, F. H. (2017): *Cellular Substrates of Brain Rhythms* (D. L. Schomer dan F. H. Lopes da Silva, Ed.), Oxford University Press, **1**. <https://doi.org/10.1093/med/9780190228484.003.0002>

- apple.com (20 Mei 2024): Take an ECG with the ECG app on Apple Watch, .
- Başar, E., Güntekin, B., Atagün, İ., Turp Gölbaşı, B., Tülay, E., dan Özerdem, A. (2012): Brain's alpha activity is highly reduced in euthymic bipolar disorder patients, *Cognitive Neurodynamics*, **6**(1), 11–20. <https://doi.org/10.1007/s11571-011-9172-y>
- Boudoulas, K. D., Triposkiadis, F., Parissis, J., Butler, J., dan Boudoulas, H. (2017): The Cardio-Renal Interrelationship., *Progress in cardiovascular diseases*, **59**(6), 636–648. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2016.12.003>
- Breedlove, S. M., dan Watson, N. V. (2013): *Biological Psychology An Introduction to Behavioral, Cognitive, and Clinical Neuroscience* (7 ed.), Sinauer Associates Inc.
- Bun, S.-S., Latcu, D. G., Marchlinski, F., dan Saoudi, N. (2015): Atrial flutter: more than just one of a kind., *European heart journal*, **36**(35), 2356–63. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehv118>
- Caplin, W. E., Hepokosi, J., dan Webster, J. (2010): *Musical Form, Forms & Formenlehre: Three Methodological Reflections*, Leuven University Press, Leuven.
- Caserman, P., Garcia-Agundez, A., Gámez Zerban, A., dan Göbel, S. (2021): Cybersickness in current-generation virtual reality head-mounted displays: systematic review and outlook, *Virtual Reality*, **25**(4), 1153–1170. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00513-6>
- Chang, E., Kim, H. T., dan Yoo, B. (2020): Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements, *International Journal of Human–Computer Interaction*, **36**(17), 1658–1682. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351>
- Chen, C., Bai, X., Ding, Y., dan Lee, I.-S. (2019): Electrical stimulation as a novel tool for regulating cell behavior in tissue engineering., *Biomaterials research*, **23**, 25. <https://doi.org/10.1186/s40824-019-0176-8>
- Cheng, Y., Wang, Y., dan Zhao, W. (2022): Shared Virtual Reality Experiences during the COVID-19 Pandemic: Exploring the Gratifications and Effects of Engagement with Immersive Videos, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**(9), 5056. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095056>

- Corcoran, A. W., Alday, P. M., Schlesewsky, M., dan Bornkessel-Schlesewsky, I. (2018): Toward a reliable, automated method of individual alpha frequency (IAF) quantification, *Psychophysiology*, **55**(7), e13064. <https://doi.org/10.1111/psyp.13064>
- Cross, T. J., Kim, C.-H., Johnson, B. D., dan Lalande, S. (2020): The interactions between respiratory and cardiovascular systems in systolic heart failure., *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, **128**(1), 214–224. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00113.2019>
- DeGiorgio, C. M., Miller, P., Meymandi, S., Chin, A., Epps, J., Gordon, S., Gornbein, J., dan Harper, R. M. (2010): RMSSD, a measure of vagus-mediated heart rate variability, is associated with risk factors for SUDEP: The SUDEP-7 Inventory, *Epilepsy & Behavior*, **19**(1), 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2010.06.011>
- Dissanayaka, T., Zoghi, M., Hill, A. T., Farrell, M., Egan, G., dan Jaberzadeh, S. (2020): The Effect of Transcranial Pulsed Current Stimulation at 4 and 75 Hz on Electroencephalography Theta and High Gamma Band Power: A Pilot Study., *Brain connectivity*, **10**(9), 520–531. <https://doi.org/10.1089/brain.2020.0756>
- Eberhart, R. C., dan Dobbins, R. W. (Ed.) (1990): *Neural Network PC Tools*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21624-2>
- El-Badri, S. M., Ashton, C. H., Moore, P. B., Marsh, V. R., dan Ferrier, I. N. (2001): Electrophysiological and cognitive function in young euthymic patients with bipolar affective disorder., *Bipolar disorders*, **3**(2), 79–87. <https://doi.org/10.1034/j.1399-5618.2001.030206.x>
- Elite HRV (20 Mei 2024): HRV Metrics: PNN50, .
- Emotiv (2024): EPOC X - 14 Channel Wireless EEG Headset, .
- Fetz, E. E. (2007): Volitional control of neural activity: implications for brain-computer interfaces, *The Journal of Physiology*, **579**(3), 571–579. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.127142>
- Gegung, E. M. (2021): International Tourism and The COVID-19 Pandemic: The Use of Virtual Reality to Increase Tourism Destination Sustainability and How Users Perceive The Authenticity of VR Experiences, *Jurnal Kepariwisata Indonesia: Jurnal Penelitian dan Pengembangan Kepariwisata Indonesia*, **15**(1), 9–15. <https://doi.org/10.47608/jki.v15i12021.9-15>

- Gentry, H., Humphries, E., Peña, S., Mekic, A., Hurless, N., dan Nichols, D. F. (2013): Music genre preference and tempo alter alpha and beta waves in human non-musicians, diperoleh melalui situs internet: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11299922>.
- Georgiadi, I., Georgoudas, I. G., Trunfio, G. A., dan Sirakoulis, G. Ch. (2022): An Interactive *Cellular automata* Based Application to Foster Sustainable Forms of Movement in the Urban Fabric, *J. Cell. Autom.*, diperoleh melalui situs internet: <https://www.oldcitypublishing.com/journals/jca-home/jca-issue-contents/jca-volume-16-number-5-6-2022/jca-16-5-6-p-491-512/>, **16**(5-6), 491-512.
- Gomes, P., Pereira, T., dan onde, J. (2018): Musical emotions in the brain-a neurophysiological study, *Neurophysiol Res*, **1**(1), 12-20.
- Guyton, A. C., dan Hall, J. E. (2011): *Buku Ajar Fisiologi Kedokteran (Textbook of Medical Physiology)* (11 ed.), Elsevier, Philadelphia.
- Handayani, N., Khotimah, S. N., Haryanto, F., Arif, I., Ayu, N. S., Syarif, H. S., Akbar, Y., Edison, R. E., dan Taruno, WarsitoP. (2015): Investigation of the Music's Effect on Human Brain Activity Using Electrical Capacitance Volume Tomography Brain Scanner and Electroencephalo-Graphy, *Advanced Science, Engineering and Medicine*, **7**(10), 882-887. <https://doi.org/10.1166/ase.m.2015.1784>
- Handayani, N., Khotimah, S. N., Haryanto, F., Arif, I., dan Taruno, W. P. (2017): Resting state EEG power, intra-hemisphere and inter-hemisphere coherence in bipolar disorder, 040012. <https://doi.org/10.1063/1.4976797>
- Hobbie, R. K., dan Roth, B. J. (2015): *Intermediate Physics for Medicine and Biology* (5 ed.), Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12682-1>
- Johnson, B. R., Wyttenbach, R. A., Wayne, R., dan Hoy, R. R. (2002): Action potentials in a giant algal cell: a comparative approach to mechanisms and evolution of excitability., *Journal of undergraduate neuroscience education: JUNE: a publication of FUN, Faculty for Undergraduate Neuroscience*, **1**(1), A23-7.
- Kachuee, M., Fazeli, S., dan Sarrafzadeh, M. (2018): ECG Heartbeat Classification: A Deep Transferable Representation, *2018 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*, IEEE, 443-444. <https://doi.org/10.1109/ICHI.2018.00092>

- Kam, J. W. Y., Bolbecker, A. R., O'Donnell, B. F., Hetrick, W. P., dan Brenner, C. A. (2013): Resting state EEG power and coherence abnormalities in bipolar disorder and schizophrenia., *Journal of psychiatric research*, **47**(12), 1893–901. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2013.09.009>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., dan Lilienthal, M. G. (1993): Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, *The International Journal of Aviation Psychology*, **3**(3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Khotimah, S N, Suwandi, G. R. F., Handayani, N., Pratama, S. H., Putri, S. S. M. I., Haryanto, F., dan Arif, I. (2019): Characterization of the changes in electroencephalogram power spectra due to sound stimulation, *Journal of Physics: Conference Series*, **1248**(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1248/1/012022>
- Khotimah, Siti Nurul, dan Liong, T. H. (2002): Pengembangan metode komputasi dan simulasi,, *Kontribusi Fisika Indonesia*, **13**(2), 108–113.
- Klimesch, W., Schimke, H., dan Pfurtscheller, G. (1993): Alpha frequency, cognitive load and memory performance, *Brain Topography*, **5**(3), 241–251. <https://doi.org/10.1007/BF01128991>
- Kopańska, M., Ochojska, D., Dejniewicz-Velitchkov, A., dan Banaś-Ząbczyk, A. (2022): Quantitative Electroencephalography (QEEG) as an Innovative Diagnostic Tool in Mental Disorders, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**(4), 2465. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042465>
- Laessoe, U., Abrahamsen, S., Zepernick, S., Raunsbaek, A., dan Stensen, C. (2023): Motion sickness and cybersickness – Sensory mismatch, *Physiology & Behavior*, **258**, 114015. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2022.114015>
- Lee, S., dan Kruse, J. (2008): Biopotential electrode sensors in ECG/EEG/EMG systems, *Analog Devices*.
- Liu, R., Xu, M., Zhang, Y., Peli, E., dan Hwang, A. D. (2020): A Pilot Study on Electroencephalogram-based Evaluation of Visually Induced Motion Sickness, *Journal of Imaging Science and Technology*, **64**(2), 20501-1-20501–10. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2020.64.2.020501>
- Lüttge, U., dan Higinbotham, N. (1979): *Transport in Plants* (1 ed.), Springer New York, NY.

- Markus, M., Czajka, A., Böhm, D., Hahn, T., Schulte, T., dan Ribeiro, A. (1999): Phenomenology of Cellular Automata Simulations of Natural Processes, 55–105. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9223-9_4
- Mehrfard, A., Fotouhi, J., Taylor, G., Forster, T., Armand, M., Navab, N., dan Fuerst, B. (2021): Virtual reality technologies for clinical education: evaluation metrics and comparative analysis, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, **9**(3), 233–242. <https://doi.org/10.1080/21681163.2020.1835559>
- Mierke, C. T. (2020): The Definition of Biophysics: What Exactly is Biophysics?, 3–34 dalam *Biology Dictionary*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58532-7_1
- Naqvi, S. A. A., Badruddin, N., Jatoi, M. A., Malik, A. S., Hazabbah, W., dan Abdullah, B. (2015): EEG based time and frequency dynamics analysis of visually induced motion sickness (VIMS), *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, **38**(4), 721–729. <https://doi.org/10.1007/s13246-015-0379-9>
- National Academies of Sciences, E. and M. (2022): *Physics of Life*, National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/26403>
- Neurosoft (2024): Neuron-Spectrum-63, .
- Nürnbergger, M., Klingner, C., Witte, O. W., dan Brodoehl, S. (2021): Mismatch of Visual-Vestibular Information in Virtual Reality: Is Motion Sickness Part of the Brains Attempt to Reduce the Prediction Error?, *Frontiers in Human Neuroscience*, **15**. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.757735>
- OpenStax College (2013): *Anatomy and Physiology*, OpenStax. <http://cnx.org/content/col11496/latest/>.
- Pérez-Valero, J., Garcia-Sanchez, A.-J., Ruiz Marín, M., dan Garcia-Haro, J. (2020): A Prototype Framework Design for Assisting the Detection of Atrial Fibrillation Using a Generic Low-Cost Biomedical Sensor, *Sensors*, **20**(3), 896. <https://doi.org/10.3390/s20030896>
- Preda, A. (2024): What Are Bipolar Disorders? , .
- Rahmansyah, P. R., Khotimah, S. N., Haryanto, F., dan Sofyansyah, R. (2024): Accuracy and Characteristic of Electrocardiographic Signal from Mobile Biomedical Sensor, *Journal of Physics: Conference Series*, **2734**(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2734/1/012003>

- Rajpurkar, P., Hannun, A. Y., Haghpanahi, M., Bourn, C., dan Ng, A. Y. (2017): Cardiologist-Level Arrhythmia Detection with Convolutional Neural Networks.
- samsung.com (20 Mei 2024): Measure your ECG with the Galaxy Watch series, .
- Santos, M. A. A., Sousa, A. C. S., Reis, F. P., Santos, T. R., Lima, S. O., dan Barreto-Filho, J. A. (2013): Does the aging process significantly modify the Mean Heart Rate?, *Arquivos brasileiros de cardiologia*, **101**(5), 388–98. <https://doi.org/10.5935/abc.20130188>
- Schellenberg, R., Knorr, W., Schindler, M., Kropf, S., dan Beyer, H. (1990): EEG-power spectral components of schizoaffective disorders., *Schizophrenia research*, **3**(5–6), 357–9. [https://doi.org/10.1016/0920-9964\(90\)90023-z](https://doi.org/10.1016/0920-9964(90)90023-z)
- Siloam Hospital Medical Team (26 Oktober 2023): Apa itu Neurologi? Ini Jenis Pemeriksaan & Gangguannya , .
- Siuly, S., Li, Y., dan Zhang, Y. (2016): *EEG Signal Analysis and Classification*, Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47653-7>
- Strakowski, S. M., DelBello, M. P., Adler, C., Cecil, D. M., dan Sax, K. W. (2000): Neuroimaging in bipolar disorder., *Bipolar disorders*, **2**(3 Pt 1), 148–64. <https://doi.org/10.1034/j.1399-5618.2000.020302.x>
- Suwandi, G. R. F., Khotimah, S. N., Haryanto, F., dan Suprijadi, - (2023): Electroencephalography Signal Analysis for Virtual Reality Sickness: Head-mounted Display and Screen-based, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, **13**(4), 1449–1455. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.13.4.18165>
- Suwandi, G. R. F., Risyad, S. A., Khotimah, S. N., Haryanto, F., dan -, S. (2023): A Comparative Study of Alpha Frequency Analysis between Medical and Consumer-grade Electroencephalography Devices on the Measurement of Male Healthy Subjects, *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, **19**(6), 1042–1051. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v19n6.3156>
- Tandon, R., Gaebel, W., Barch, D. M., Bustillo, J., Gur, R. E., Heckers, S., Malaspina, D., Owen, M. J., Schultz, S., Tsuang, M., Van Os, J., dan Carpenter, W. (2013): Definition and description of schizophrenia in the DSM-5., *Schizophrenia research*, **150**(1), 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2013.05.028>

- Thakor, N. V. (2015): Biopotentials and Electrophysiology Measurements (1st ed.) dalam H. Eren dan J. G. Webster, ed., *Telehealth and Mobile Health*, CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/b15664-72>
- Thaler, M. S. (2019): *The only EKG book you'll ever need* (9 ed.), Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- Thibodeau, R., Jorgensen, R. S., dan Kim, S. (2006): Depression, anxiety, and resting frontal EEG asymmetry: a meta-analytic review., *Journal of abnormal psychology*, **115**(4), 715–29. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.115.4.715>
- Valentine, D. (2020): Learning EEG: a self guided course and atlas.
- Wang, R., Wang, J., Yu, H., Wei, X., Yang, C., dan Deng, B. (2015): Power spectral density and coherence analysis of Alzheimer's EEG, *Cognitive Neurodynamics*, **9**(3), 291–304. <https://doi.org/10.1007/s11571-014-9325-x>
- Weinberg, J. L. (2023): What is Heart Rate Variability?, *Rupa Health*.
- Weisbuch, G. (2019): *Complex Systems Dynamics (volume II)*, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429032851>
- Welch, P. (1967): The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, **15**(2), 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>
- WHO (2019): Global health estimates: Cause-specific mortality, 2000–2019, .
- Yuan, Y., Lai, Y.-X., Wu, D., dan Yao, D.-Z. (2009): A Study on Melody Tempo with EEG, *Journal of Electronic Science and Technology*, diperoleh melalui situs internet: <https://www.journal.uestc.edu.cn/en/article/id/1837>, **7**(1), 88–91.
- Zhang, J. (2007): Effect of Age and Sex on Heart Rate Variability in Healthy Subjects, *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, **30**(5), 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2007.04.001>
- Zoni-Berisso, M., Lercari, F., Carazza, T., dan Domenicucci, S. (2014): Epidemiology of atrial fibrillation: European perspective., *Clinical epidemiology*, **6**, 213–20. <https://doi.org/10.2147/CLEP.S47385>

CURRICULUM VITAE



Nama : Siti Nurul Khotimah
Tempat/tgl lahir : Klaten, 22 September 1962
Kel. Keahlian : Fisika Nuklir dan Biofisika
Alamat Kantor : Jl. Ganesha No. 10 Bandung
Nama Suami : Suharno
Nama Anak : 1. Noviana Khairunisa Suharno
2. Kania Devi Suharno
3. Aditya Harnawan Suharno

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- SD Negeri Tonggalan I, Klaten, 1974
- SMP Negeri II, Klaten, 1977
- SMA Negeri I, Klaten, 1981
- Sarjana Fisika (Dra), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1985
- Master of Science (M.Sc.), bidang Fisika (Biofisika), University of Tasmania, 1992
- Doktor (Dr.), bidang Fisika, Institut Teknologi Bandung (ITB), 2005

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Staf Pengajar Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 1986–sekarang
- Bendahara Departemen Fisika, 2003-2005
- Tim Keuangan FMIPA ITB, 2006-2010
- Ketua Program Studi Magister Pengajaran Fisika, 2012-2013
- Ketua Program Studi Magister Pengajaran Fisika, 2014-2015
- Ketua Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika, 2018-2021
- Sekretaris Senat FMIPA, 2018-2023
- Anggota Senat Akademik ITB, 2019-2024

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/a, 1 Maret 1986
- PNS, Penata Muda, III/a, 1 Mei 1987
- Penata Muda Tk.I, III/b, 1 April 1994

- Penata, III/c, 1 April 1996
- Penata Tk.I, III/d, 1 Oktober 1999
- Pembina, IV/a, 1 April 2005

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Mei 1987
- Asisten Ahli, 1 Desember 1993
- Lektor Muda, 1 Desember 1995
- Lektor Madya, 1 April 1999
- Lektor, 1 Januari 2001
- Lektor Kepala, 1 Desember 2004
- Profesor (Guru Besar), 1 Agustus 2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Peneliti Utama, “Analisis Heart Rate Variability dan Symbolic Recurrence Plots untuk Deteksi Aritmia menggunakan Biomedical Sensor”, PPMI ITB, 2024.
- Anggota Peneliti, “Evaluasi Gejala Virtual Reality (VR) Sickness Berbasis Spektral Daya Gelombang Otak: Studi Pengaruh Variasi Parameter Gerak dalam Video VR”, PPMI Fakultas 2024
- Peneliti Utama, “Studi Kelistrikan Akibat Kontraksi Otot Bisep dan Pergerakan Otot Mata”, PPMI ITB, 2023.
- Peneliti Utama, “Analisis Sinyal Elektroensefalografi pada Kasus Visually Induced Motion Sickness Akibat Tayangan Virtual Reality”, PPMI ITB, 2023.
- Anggota Peneliti, “Study of Visually Induced Motion Sickness from Virtual Reality using Electroencephalography: Head-mounted Display-based”, PPMI ITB, 2022.
- Peneliti Utama, “Assessing the Accuracy of Kardiamobile Personal with Clinical EEG for the Screening of Normal Human Heart”, PPMI ITB, 2022.
- Peneliti Anggota, “Study of Visually Induced Motion Sickness from Virtual Reality using Electroencephalograph”, PPMI ITB, 2021
- Peneliti Utama, “Deteksi Autism Spectrum Disorder (ASD) Berbasis Parameter Fisis Sinyal Elektroensefalografi (EEG) dan Analisis Fitur dengan Metode Deep Learning”, Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2020.

- Peneliti Utama, "Pengaruh Pengurangan Noise pada Sinyal Dihasilkan pada Pengukuran EEG di Dalam Ruang Sangkar Faraday", P3MI ITB, 2020.
- Peneliti Utama, "Benchmark Uji Audio-Kognisi Menggunakan EEG dengan dua Tipe Elektroda (Basah dan Kering) pada Durasi Pengukuran yang Panjang", P3MI ITB, 2019.
- Peneliti Utama, "Karakterisasi Perubahan Pola Electroencephalogram (EEG) Akibat Stimulasi Bunyi", P3MI ITB, 2018.
- Peneliti Utama, "Studi Pencitraan Fungsional Otak Berbasis Teknologi ECVT (Electrical Capacitance Volume Tomography) dan EEG (Electroencephalography) untuk Pendeteksian Dini Alzheimer's Disease", Program Riset Inovasi Kelompok Keahlian ITB, 2016.
- Peneliti Utama, "Aplikasi Teknologi ECVT (Electrical Capacitance Volume Tomography) Brain Scanner untuk Diagnosa Disfungsi Otak pada Pasien Penderita Gangguan Jiwa (Mental Disorders) di Kota Bandung", PPM ITB, 2014.
- Peneliti Utama, "Studi Aktivitas Otak Manusia terhadap Respon Audio dengan Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT)", Program Riset Inovasi Kelompok Keahlian ITB, 2014.
- Peneliti Utama, "Metode Dinamika Molekular berdasarkan Interaksi antara Eritrosit dan Trombosit: Studi Kasus Mekanisme Penyumbatan Pembuluh Kapiler Serebral Malaria", Program Riset dan Inovasi ITB, 2013.
- Peneliti Utama, "Penentuan Temperatur Vibrasi pada berbagai Jenis Gas Diatomik 1-dimensi Menggunakan Model Material Butiran", Riset Peningkatan Kapasitas ITB, 2010.

VI. PUBLIKASI

- Fina Nahdiyya, **Siti Nurul Khotimah**, "Study the Effects of Age, Gender, and Body Mass Index on Heart Rate", Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences (accepting, 2024).
- Praditya Rizky Rahmansyah, **Siti Nurul Khotimah**, Freddy Haryanto, Ridwan Sofyansyah, "Accuracy and Characteristic of Electrocardiographic Signal from Mobile Biomedical Sensor", J. Phys.: Conf. Ser. 2734 (2024) 012003.
- Fitri Azizah, **Siti Nurul Khotimah**, "Development of Photovoltaic Power Plant Prototype as a Learning Media on The Subject of Renewable Energy", Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 10(3), 2024, pp 1111–1120.

- Herawati, **Siti Nurul Khotimah**, Muhammad Miftahul Munir, “Analysis and Determination of Self-Inductance through Direct and Indirect Measurements Methods”, *Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika*, Vol 9, No 1, 2024, pp 36-45.
- Galih Restu Fardian Suwandi, Syaukha Risyad Ahmad, **Siti Nurul Khotimah**, Freddy Haryanto, Suprijadi, “A Comparative Study of Alpha Frequency Analysis between Medical and Consumer grade Electroencephalography Devices on the Measurement of Male Healthy Subjects”, *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, Vol. 19 (2023) 1042-1051.
- Galih Restu Fardian Suwandi, **Siti Nurul Khotimah**, Freddy Haryanto, Suprijadi, “Electroencephalography Signal Analysis for Virtual Reality Sickness: Head-mounted Display and Screen-based”, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(4), 2023, 1448-1455.
- Irka, F.H., Su'ud, Z., Irwanto, D., **Khotimah, S.N.** Sekimoto, H. “Design study of small modular gas-cooled fast reactor employing modified CANDLE burnup with radial direction shuffling scheme”, *Kerntechnik*, <https://doi.org/10.1515/kern-2023-0017>, 2023, 1-11.
- Resfyanti Nur Azizah, Karine Ravienna, Lyra Puspa, Yudiansyah Akbar, Lula Kania Valenza, Galih Restu Fardian Suwandi, **Siti Nurul Khotimah**, and Mohammad Haekal, “The Statistical Characteristics of P3a and P3b Subcomponents in Electroencephalography Signals”, *Lecture Notes in Computer Science*, 2023, 14260 LNCS, pp. 210–220
- Auvi Winandri Utami, **Siti Nurul Khotimah**, “Identification of Students' Misconceptions using Six Tier Diagnostic Test with CRI (Certainty of Response Index) on Wave”, *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 9(7), 2023, 5205-5213.
- Nurhasanah, Freddy Haryanto, dan **Siti Nurul Khotimah**, “Karakterisasi sinyal elektrokardiogram dari perangkat portabel 6-lead sebagai alternatif alat kontrol kesehatan jantung”, *Journal of Medical Physics and Biophysics* 10 (1), 2023, 84-92.
- Feriska Handayani Irka, Zaki Su'ud, Dwi Irwanto, **Siti Nurul Khotimah**, Hiroshi Sekimoto, “Analisis Kekritisian dan Rasio Konversi Reaktor Cepat Berpendingin Gas dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar UN-PuN

Menggunakan Skema Burn-up Modified CANDLE Arah Radial”, *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 4(1), 2023,7-14,

- **Khotimah S.N.**, Wahyuni F.S., Haryanto F. “Statistical analysis of quantitative electrocardiographic signals with standard limb leads: Influences of gel use, subject positions, and electrodes configurations” *Journal of Physics: Conference Series*. 9th Asian Physics Symposium, Volume 2243 No.1, 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012004
- Suwandi G.R.F., **Khotimah S.N.**, Suprijadi.” Electroencephalography Signal Power Spectral Density from Measurements in Room with and without Faraday Cage: A Comparative Study”, *Journal of Physics: Conference Series*, 9th Asian Physics Symposium, Volume 2243 No.1, 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012002.
- Trimayanti E., **Khotimah S.N.**, Wibowo I., Viridi S. “Determination of Motility and Charge Type of Mencil Sperm (*Mus musculus*) through Study of Exposure Electrical Fields”, *Journal of Physics: Conference Series*. 8th Asian Physics Symposium, Volume 1949 No.1, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1949/1/012021.
- Suwandi, G.R.F., **Khotimah, S.N.**, Haryanto, F., Suprijadi. “Study of The Effect of Magnetic Fields on Electroencephalography Measurement in Faraday’s Cage”, *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Volume 6 No.2, 2021. DOI: 10.21009/SPEKTRA
- Suwandi G.R.F., Haekal M, Bayuadi I., Craig L.A., Fahmi A., **Khotimah S.N.**, Prawiro S.A., Haryanto F. “Post-disaster effect on radiation safety in multihospital radiological unit: A one-year post-earthquake observation report in Lombok”, *Journal of Physics: Conference Series*. 8th Asian Physics Symposium, Volume 1949 No.1, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1949/1/012009.
- Irka F.H., Suud Z., Irwanto D., **Khotimah S.N.**, Sekimoto H., “Neutronics performances of gas-cooled fast reactor for 300-600 MWt Output Power with Modified CANDLE burn-up scheme in radial direction”, *Journal of Physics: Conference Series*. 2nd International Conference on Computation in Science and Engineering, Volume 2072 No.1, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/2072/1/012013
- Suwandi G.R.F., Mustajab M.A., Haekal M., **Khotimah S.N.**, Haryanto F. “An Acoustic Analysis of Formants between Frequently Smoking Subjects and Non-smoking Subjects”, *Journal of Physics: Conference Series*. 3rd

Annual Scientific Meeting on Medical Physics and Biophysics in conjunction with the 17th South-East Asia Congress of Medical Physics, Volume 1505 No.1, 2020, DOI: 10.1088/1742-6596/1505/1/012053

- Fitriani, M.C., **Khotimah, S.N.**, Haryanto, F., Suprijadi. “Study of Electroencephalogram Pattern from Eye Response to Flickering Light”, Journal of Physics: Conference Series. 7th Asian Physics Symposium, Volume 1204 No.1, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1204/1/012064
- Viridi, **S.**, **Khotimah, S.N.**, Kurniadi, R., Novitrian, Basar, K., Purqon, A. “Preliminary study of bamboo-like tree structure based on granular particle-spring model: Relaxation and tortuosity”, Journal of Physics: Conference Series. 6th International Conference on Mathematics and Natural Sciences, Volume 1127 No.1, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1127/1/012019
- Handayani, N., Hidayanti, K.F., Baidillah, M.R., i. Arif, **S N Khotimah**, Haryanto, F., Taruno, W.P., “Simulation of Neural Network-Multicriterion Optimization Image Reconstruction Technique (NN-MOIRT) for imaging using a 32-channel Brain ECVT sensor, Journal of Physics: Conference Series, 6th International Conference on Mathematics and Natural Sciences, Volume 1127 No.1, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1127/1/012008
- **Khotimah, S.N.**, Suwandi, G.R.F., Handayani, N. Pratama, S.H. Putri, S.S.M.I., Haryanto, F. Arif, I “Characterization of the changes in electroencephalogram power spectra due to sound stimulation”, Journal of Physics: Conference Series. 18th Asia-Oceania Congress of Medical Physics & 16th South-East Asia Congress of Medical Physics. Volume 1248 No.1, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1248/1/012022
- Pratama, S.H., Rahmadhani, A., Bramana, A., Suprijadi, **Khotimah, S.N.** “The development of Arduino-based low-cost wireless modular device for brainwave”, Journal of Physics: Conference Series. 18th Asia-Oceania Congress of Medical Physics & 16th South-East Asia Congress of Medical Physics, Volume 1248 No.1, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1248/1/012035
- Monalisa, P., **Khotimah, S.N.**, Haryanto, F., Viridi, S. Investigation of Pulse Rate and ABPI (Ankle-Brachial Pressure Index) in Relax Condition and after Exercise, Journal of Physics: Conference Series. 7th Asian Physics Symposium, Volume 1204 No.1, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1204/1/012065

- **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi, Widayani, Khairurrijal. “Influence of initial velocity on trajectories of a charged particle in uniform parallel electric and magnetic fields”, *The Online Journal of Science and Technology*. Volume 8 No.2, 2018, 89-95.
- Nita Handayani, Freddy Haryanto, **Siti Nurul khotimah**, Idam Arif, Warsito Purwo Taruno. “Coherence and phase synchrony analyses of EEG signals in Mild Cognitive Impairment (MCI): A study of functional brain connectivity”, *Polish Journal of Medical Physics and Engineering*. Volume 24 No.1, 2018, 1-9. DOI: 10.2478/pjmpe-2018-0001
- **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi and Widayani, “Influence of initial velocity on trajectories of a charged particle in uniform crossed electric and magnetic fields”, *European Journal of Physics*. 38 (2017) 025204 (9pp)
- Chong W Lup, **Siti N Khotimah** and Freddy Haryanto, “the study of active brain hemisphere corresponding with human physical movements using a wireless electroencephalography”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 12, No. 17, 2017.
- S Viridi, FDE Latief, **SN Khotimah**. “Construction of Maximum Tortuosity of Single Fluid Path in Grid-based 2-d System (5×20) and 3-d system (5×20×3) for Certain Value of Porosity”, *Journal of Physics: Conference Series*. 1st International Conference on Energy Sciences, ICES 2016. Volume 877 No.1, 2017. DOI: 10.1088/1742-6596/877/1/012044
- Nuning Nuraini, Sparisoma Viridi, Freddy Haryanto and **Siti Nurul Khotimah**. “Molecular dynamics simulation of microorganism motion in fluid based on granular model in the case of multiple simple push-pull filaments”, *AIP conference proceedings*. Symposium on Biomathematics, Universitas Hasanuddin, Makasar, Indonesia. Volume 1825, 2017. DOI: 10.1063/1.4978985
- Nita handayani, **Siti Nurul Khotimah**, Freddy Haryanto, Idam Arif, Warsito, P. Taruno.” Resting state EEG power, intra-hemisphere and inter-hemisphere coherence in bipolar disorder”, *AIP Conference Proceedings*. 1st International Symposium of Biomedical Engineering: Biomedical Engineering's Recent Progress in Biomaterials, Drugs Development, and Medical Devices, Universitas Indonesia, Volume 1817, 2017. DOI: 10.1063/1.4976797
- **Siti N. Khotimah**, Dzikri R. Romadhon and Sparisoma Viridi, “The effects of static electric field on germination and growth of mungbean seeds

(*Vigna radiata* L.) in vegetative phase”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* VOL. 11, NO. 23, 2016.

- **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi, Widayani, Trise Nurul Ain, and Hari Anggit Cahyo Wibowo. “Predicting the Motion of an Intruder in a Vertically Vibrated 2D-Granular-Bed using Contact Points Approximation”, *International Conference on Instrumentation, Environment and Renewable Energy Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.18502/keg.v1i1.525
- Widayani, Sparisoma Viridi, and **Siti Nurul Khotimah**, “Binary Composite Fiber Elasticity Using Spring-Mass and Non-Interacting Parallel Sub-Fiber Model”, *International Conference on Instrumentation, Environment and Renewable Energy Conference Proceedings*, 2016. DOI: 10.18502/keg.v1i1.519
- Widayani, Sparisoma Viridi, **Siti Nurul Khotimah**, Damar R. Adhika, "Calculation of Acoustic Transmission Intensity of 1-D Composite Models for Sound Absorber Wall Application: Case Study on Wood-Epoxy Composite", *International Journal of Composite Materials* 2016, 6(4) DOI: 10.5923/J.Materials.20160604.07 pp.140 – 143.
- G.R.F. Suwandi, **Siti Nurul Khotimah**, Freddy Haryanto, “Zero-Field Nuclear magnetic resonance for study of antiferromagnetic properties of FeF₃ Materials", *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* 12 (1) (2016) 90-97; DOI: 10 15294
- Aprianti, D., **Khotimah S.N.**, Viridi S., “Budding yeast colony growth study based on circular granular cell”, *Journal of Physics: Conference Series*, 6th Asian Physics Symposium 19–20 August 2015, Bandung, Volume 739 No.1, 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012026
- Y. Akbar, **S.N. Khotimah**, F. Haryanto, "Spectral and mapping analysis of EEG based on Pwelch in schizophrenic patients", 13 th South-East Congress of Medical Physics 2015 (SEACOMP), *Journal of Physics: Conference Series* 694 (2016) Volume 694 No.1, 2016. DOI:10.1088/1742-6596/694/1/012070
- D. Aprianti, F. Haryanto, A. Purqon, **S.N. Khotimah**, S. Viridi. “Study of Budding yeast colony formation and its characterizations by using circular granular cell”, 13 th South-East Congress of Medical Physics, *Journal of Physics: Conference Series*. Volume 694 No.1, 2016. ISSN 1742-6588, E-ISSN 1742-6596, pp. 1-4.

- Fajar D.M, **Khotimah S.N.**, Khairurrijal.” Thermodynamic and Mechanical Analysis of a Thermomagnetic Rotary Engine”, Journal of Physics: Conference Series, 6th Asian Physics Symposium, Volume 739 No. 1, 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012028
- S.H. Sirait, W.P. Taruno, **S.N. Khotimah**, F. Haryanto, "Two-Dimensional finite element method simulation to determine the brain capacitance based on ECVT neasurement ", 13 th South-East Congress of Medical Physics, Journal of Physics: Conference Series 694 (2016) 012069 DOI: 10.1088/1742-6596/694/1/012069
- Handayani N., Akbar Y., **Khotimah S.N.**, Haryanto F., Arif I., Taruno W.P. Preliminary study of Alzheimer's Disease diagnosis based on brain electrical signals using wireless EEG”, 13th South-East Asian Congress of Medical Physics, Journal of Physics: Conference Series. Volume 694 No.1, 2016. DOI:10.1088/1742-6596/694/1/012068
- Novita, Sari Sami., **Khotimah, Siti Nurul.**, Hidayat, Wahyu.” Interactive Learning Media for Lenses and Their Applications Using Macro Visual Basic in Microsoft PowerPoint, 6th Asian Physics Symposium: Journal of Physics: Conference Series. Volume 739 No.1, 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012114
- Ain T.N., Wibowo H.A.C., **Khotimah S.N.**, Viridi S. “The evolution of potential energy and contactopy two-dimension granular materials in the case of compaction inhibited Brazil-nut effect”, 6th Asian Physics Symposium Journal of Physics: Conference Series, Volume 739 No.1, 2016, DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012135.
- **S.N. Khotimah**, Luman Haris, Sparisoma Viridi, Widayani, Khairurrijal, "Simple Harmonic Motion Experiment Using Force Sensor: Low Cost and Single Set Up”, The Online Journal of Science and Technology, 2015 Vol 5, Issue 1, pp 55-62.
- Sparisoma Viridi, **Siti Nurul Khotimah**, Widayani, Novitrian; “Competition between potential energy minimization and number of contact points in two-dimension granular materials exhibiting Brazil-nut effect”, The 5th International Conference on Mathematics and Natural Science, AIP Conference Proceeding, 1677, 070001 (2015); doi; 10.1063/1,4930705,
- Irfan Dwi Aditya, Widayani, Sparisoma Viridi, **Siti Nurul Khotimah**, “Simulation of bond strength matrix and filler of aligned continous fiber

compositee in term of coefficient”, The 5th International Conference on Mathematics and Natural Science, AIP Conference Proceeding, 1677, 2015, DOI: 10.1063/1.4930709.

- Irawan, Dani., Viridi, Sparisoma., **Khotimah, Siti Nurul.**, Latief, Fourier Dzar Eljabbar., Novitrian.” Modeling and characterization of charged particle trajectories in an oscillating magnetic field”, 5th Asian Physics Symposium, Volume 1656, 2015. ISSN 0094-243X, DOI: 10.1063/1.4917140
- Sriwayu, Wa Ode., Haryanto, Freddy., **Khotimah, Siti Nurul.**, “Beam hardening and smoothing correction effects on performance of micro-ct SkyScan 1173 for imaging low contrast density materials”, 5th Asian Physics Symposium, AIP Conference Proceedings. Volume 1656, 2015. DOI: 10.1063/1.4917145
- Widayani, Sparisoma Viridi, **Siti Nurul Khotimah**, “Theoretical Study on Mechanical Properties of 2-D Composite Models Containing Circular Fillers under Compression Load”, International Journal of Composite Materials, Vol.5, No.3, 2015, 47-51.
- Sparisoma Viridi, **Siti Nurul Khotimah**, Novitrian, and Widayani. “Fluctuation Theorem Application on 2-D Granular Materials Configurations”, Advanced Materials Research/Trans Tech Publication. Volume 1123, 2015. pp.12-15. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1123.12
- Mohamad Rendi Astono Sentosa, **Siti Nurul Khotimah** dan Sparisoma Viridi, “Kajian Aliran Fluida Kental di Antara Pelat Sejajar, Pelat Tidak Sejajar, dan Percabangannya Menggunakan Piranti Lunak Comsol Multiphysics”, Prosiding SKF 2015, pp 262-269
- Nurmasyitah dan **Siti Nurul Khotimah**, “Penentuan Konstanta Dielektrik Larutan NaCl”, Prosiding SKF 2015, pp 301-307
- Irfan Dwi Aditya, Widayani, Sparisoma Viridi, and Siti Nurul Khotimah; "Study of Internal Response of Epoxy Due To Compressive Load Via Experiment And Simulation Using Abaqus FEA Software, Advanced Materials Research Vol. 896 (2014) pp 549-552 @ (2014) Trans Tech Publications, Switzerland DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.896AMR.896.549
- Haris L., **Khotimah S.N.**, Haryanto F., Viridi S.” Molecular dynamics simulation of soft grains: Malaria-infected red blood cells motion within obstructed 2-D capillary vessel”, AIP Conference Proceedings/Symposium

on Biomathematics, Symomath 2013. Matematika ITB, 27–29 October 2013, Bandung, Indonesia. Volume 1587 tahun 2014. ISSN 0094-243X, E-ISSN 1551-7616, Pp.43-46. DOI: 10.1063/1.4866530

- **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi, and Idam Arif; “Lattice Gas Cellular Automata for determination of Volumetric Fluxes Through Porous Media with Various Thicknes and Pore Structure”, 4th International Conference on Advance in Nuclear Science and Engineering (ICANSE 2013), Denpasar, Bali 16-19 September 2013, Volume 1615, pp. 194198.
- Muhammad Abdul Hakim Shibghatallah, **Siti Nurul Khotimah**, Sony Suhandono, Sparisoma Viridi, Teja Kesuma; “Measuring Leaf Chlorophyll Concentration from Its Color: A Way in Monitoring Environment Change to Plantations”, Padjajaran International Physics Symposium 2013 (PIPS-2013) 7-9 May 2013, Vol. 1554, pp. 210-213 DOI: 10.1063/1.4820322
- L. Haris, S. Suhandono, **S.N. Khotimah**, F. Haryanto, and S. Viridi; “Study-Virus Interaction Using Moleculer Dynamics: Two-Dimensional Simulation on Immunoglobulin Reaction Against Human Papillomavirus”, 13th Asia-Oceania Congress of Medical Physics & 11th South-East Asian Congress of Medical Physics, 12-14 Desember 2013, Singapore, pp. 89-92.
- Sparisoma Viridi, dan **Siti Nurul Khotimah**; “Sistem Gas Granular sebagai Suatu Devais Pencacah”, Prosiding Seminar Nasional Material 2013, 16 Februari 2013 ISBN 978-602-19915-1-0
- Saumi Zikriani Ramdhani, **Siti Nurul Khotimah**, dan Freddy Haryanto; “Studi Penggunaan Micro-CT Skyscan 1173 untuk Mengetahui struktur Tulang kaki Ayam”, Prosiding simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains 2013 (SNIPS 2013) 3-4 Juli 2013, Bandung, Indonesia, pp. 239-242
- Islamiani Safitri, dan **Siti Nurul Khotimah**; “Pembelajaran Tekanan Hidrostatik, Kapilaritas, dan Debit Zat Cair Melalui Power Point, dan Modul Eksperimen”, Prosiding simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains 2013 (SNIPS 2013) 3-4 Juli 2013, Bandung, Indonesia, pp. 338-342
- **Siti Nurul Khotimah**, Bergas Bimo Branarto, Sparisoma Viridi, and Idam Arif; “Permeability and Porosity of Two-Dimensional Porous Media Microchannels using Lattice Gas Cellular Automata”, IJP vol. 23, No. 1, Juli 2012

- S. Putri, I. Arif, **S.N. Khotimah**. “Effect of Increase in Intraperitoneal Pressure on Fluid Distribution in Tissue Using Finite Difference Method”, The 5th Asian Physics Symposium (APS 2012), July 22-23, 2012. DOI: 10.1063/1.4917146
- **S.N. Khotimah**, S. Viridi, and Widayani; “Transition parameter in One-Dimensional Elastic Diatomic Granular Gas: Theory and Molecular Dynamics Simulation”, The 3rd International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering, AIP Conf. Proc. 1448, 177-184 (2012) DOI: 10.1063/I.4725453 @ 2012 American Institute of Physics 978-0-7354-1047-3.
- L. Haris, S. Viridi, **S. N. Khotimah**, and F. Haryanto, “Two-Dimensional Coulomb Model of Capillary Vessel in the Case of Cerebral Malaria Using Molecular Dynamics”, Proceedings 12th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 10th South-East Asian Congress of Medical Physics, 11-14 December 2012, Chiang Mai, Thailand pp. 170-172.
- **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi, Widayani and Khairurrijal. “The Dependence of Spring Constant in the Linear Range on Spring Parameters”, Physics Education, Vol. 46 November 5 September 2011 pp. 540-543.
- Sparisoma Viridi, Widayani, and **Siti Nurul Khotimah**, “2-D Granular Model of Composite Elasticity Using Molecular Dynamics Simulation”, AIP Publishing/FMIPA ITB, HFI, IJP, International Conference on Physics and Its Applications (ICPAP 2011), Volume 1454 No.1 Tahun 2011. pp. 219-222. DOI: 10.1063/1.4730725
- Widayani, Yati Susanah, Linda Sekar Utami, **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi. “Compressive Elastic Modulus of Natural Fiber Based Binary Composites”, AIP Conference Proceeding/AIP Publishing/ITB, HFI, IJP International Conference on Physics and Its Applications. ICPAP 2011, Volume 1454 No.1 Tahun 2011. Pp. 286-289. DOI: 10.1063/1.4730742
- Helmi Rachma Fandia, Yeti Rusmiati, dan **Siti Nurul Khotimah**, “Penentuan Kecepatan Sudut Benda Berotasi dengan Menggunakan Prinsip Listrik Magnet”, Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2011 (SKF 2011) 1-2 Desember 2011, Bandung, Indonesia, ISBN 978-602-19655-1-1, hal. 107-216
- Saumi Ramdhani, **Siti Nurul Khotimah**, Susila Wardaya, dan Freddy Haryanto, “Perhitungan Laju Dosis Serap untuk Simulasi Terapi Kanker

Serviks dengan Metode High Dose Rate Berdasarkan TG-43U1”, Jurnal Himpunan Fisika Indonesia, Vol. 11 Nomor 1, Juni 2011 pp. 6-11 (2011), No. Akreditasi 242/Akred-LIPI/P2MBI/05/2010

- Euis Sustini, **Siti Nurul Khotimah**, Ferry Iskandar, and Sparisoma Viridi, “Molecular Dynamics Simulation of Smaller Granular Particles Deposition on Larger One Due to Velocity Sequence Dependent Electrical Charge Distribution”, The 4th Nanoscience and Nanotechnology Symposium (NNS 2011) Bali, Indonesia, 23-25 September 2011, ISBN 978-0-7354-0992-7, pp. 209-213. 10.1063/1.3667258
- **Siti Nurul Khotimah**, Sparisoma Viridi, Widayani and Abdul Waris. “Energy of One-Dimensional Diatomic Elastic Granular Gas: Theory and Molecular Dynamics Simulation”, Indonesian Journal of Physics, Vol. 22 No. 3 Juli 2011, ISSN 0854-6878, pp. 101-104
- Khusnul Khotimah, Sparisoma Viridi, dan **Siti Nurul Khotimah**, “Ayunan Sederhana: Pengaruh Panjang Tali, Sudut Awal, dan Massa Bandul terhadap Periode serta Menentukan Konstanta Redaman”, Prosiding Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains 2011 (SNIPS 2011) Bandung, 22-23 Juni 2011, ISBN: 978-602-19655-0-4, pp. 74-77.
- Dani Irawan, **Siti Nurul Khotimah**, dan Sparisoma Viridi, “Pemodelan Gerak Elektron dalam Pengaruh Medan Magnet Konstan Menggunakan Metode Euler dengan Korektor Normalisasi Laju”, Prosiding Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains 2011 (SNIPS 2011) Bandung, 22-23 Juni 2011, ISBN: 978-602-19655-0-4, pp. 425-427.
- Y. Yulianti, Z. Su'ud, A. Waris and **S.N. Khotimah**, “Iterative Methods for Solving Space-time One-Dimensional Multigroup Diffusion Equations”, International Journal Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 5, No. 2, 2010.
- Y. Yulianti, Zaki Su'ud, A. Waris and **S.N. Khotimah**, “Solving Two-Dimensional Space-Time Dependent Multi-Group Diffusion Equations with SOR Method”, International Journal Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 5, No. 4, 2010, pp. 310-320
- Idam Arif, Octolia Tobigasa Tambunan, Poppy Intan Tjahaja, and **Siti Nurul Khotimah**, “Study on Annual Internal Radiation Dose from Consumption of Sweet Potatoes Contaminated by ^{134}Cs ”, Indonesian Journal of Physics, Vol 21 No. 1, January 2010 pp. 19-22

- Y. Yulianti, Z. Su'ud, A. Waris, **S.N. Khotimah**, and M.A. Shafii, "Fast Transient and Spatially Non-Homogenous Accident Analysis of Two-Dimensional Cylindrical Nuclear Reactor", The 4th Asian Physics Symposium, Bandung, West Java, Indonesia 12-13 October 2010 Volume 1325, pp. 245-248. DOI: 10.1063/1.3537908
- Leni Indah Sri Fitri Yani, **Siti Nurul Khotimah**, dan Sparisoma Viridi. "Merumuskan Gaya Sentripetal pada Gerak Melingkar Beraturan Menggunakan Hukum Kedua Newton dan Gaya Magnetik", Prosiding Seminar Nasional Fisika 2010, ISBN 978-979-98010-6-7, pp. 453-461
- Y. Yulianti, Z. Su'ud, A. Waris, and **S.N. Khotimah**, "Two-Dimensional Space-Time Dependent Multi-Group Diffusion Equation with SLOR Method", The 2nd International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering 2009-ICANSE 2009, Bandung, Indonesia 3-4 November 2009 ISBN 978-0-7354-0790-9. DOI:10.1063/1.4757155
- Tugiyo Aminoto, **Siti Nurul Khotimah**. "Immiscible Lattice Gas (ILG) With Long-Range Interaction (LRI) and its Parameters to Control Phase Separation Patterns", Proceedings of The 3rd Asian Physics Symposium (APS 2009), ISBN: 978-979-98010-5-0, pp. 449-452.
- Prasandhya A. Yusuf, **Siti Nurul Khotimah**, Ratna A. Agustin, "Self-Created Software for Air Conduction Pure Tone Audiometer and Its Test at Dr. Hasan Sadikin Hospital (RSHS)", Proceedings International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), 29-30 November 2006, Bandung-Indonesia, ISSN 979-3507-91-8, pp. 1033-1036
- **S.N. Khotimah**, I. Arif, The H. Liong, "Lattice-Gas Automata for the Problem of Kinetic Theory of Gas During Free Expansion", International Journal of Modern Physics C, Vol. 13 No.8, 2002, 1033-1046
- **S.N. Khotimah**, I. Arif, The H. Liong, "Lattice-Gas Cellular Automata Approach for Fluid Flow in Porous Media, Proceedings of Sixth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (KES'2002)", IOS Press and Ohmsha, Damiani E. et.al., Editor, Amsterdam, the Netherlands, 2002, 1512-1517.
- **S.N. Khotimah** dan The Houw Liong, "Pengembangan Metode Komputasi dan Simulasi, Kontribusi Fisika Indonesia", Vol.13 No.2, 2002, 108-113.
- **S.N. Khotimah**, I. Arif, The H. Liong, "Lattice-Gas Automata for Numerical Experimental Verification of Maxwell-Boltzmann Distribution", Kontribusi Fisika Indonesia, Vol. 12 No.3, 2001, 68-74.

- The H. Liong., **S.N. Khotimah**, E. Supriyatno, “Cellular-automaton fluids: a model for sediment transport”, Proceedings Institut Teknologi Bandung, Vol.32, No.3, 2000. 37-43.

VII. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya X, 5 Februari 2003
- Satyalancana Karya Satya XX, 6 Agustus 2013
- Satyalancana Karya Satya XXX, 10 April 2018
- Pengabdian 25 Tahun ITB, 11 Agustus 2011
- Pengabdian 35 Tahun ITB, 16 Agustus 2021

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, Departemen Pendidikan Nasional (25 Oktober 2008)
- Sertifikat Rekognisi, Program Rekognisi Dosen Perguruan Tinggi Anggota AIPFMI (27 November 2020)
- Sertifikasi Asesor Beban Kerja Dosen, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (16 Agustus 2022)

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id 📘 FgbItb 🐦 FGB_ITB
📱 @fgbitb_1920 📺 Forum Guru Besar ITB

ISBN 978-623-297-479-1

