FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung

PENDEKATAN MULTI-FISIS DALAM PENINGKATAN FUNGSIONALITAS INSTRUMENTASI PENCITRAAN MEDIS

Prof. Suprijanto
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
19 Agustus 2023

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PENDEKATAN MULTI-FISIS DALAM PENINGKATAN FUNGSIONALITAS INSTRUMENTASI PENCITRAAN MEDIS

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PENDEKATAN MULTI-FISIS DALAM PENINGKATAN FUNGSIONALITAS INSTRUMENTASI PENCITRAAN MEDIS

Prof. Suprijanto

Tangal 19 Agustus 2023
Aula Barat ITB

FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

ITB PRESS

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:
PENDEKATAN MULTI-FISIS DALAM PENINGKATAN FUNGSIONALITAS INSTRUMENTASI PENCITRAAN MEDIS

Penulis : Prof. Suprijanto
Reviewer : Prof. Deddy Kurniadi

Editor Bahasa : Narendra K. Putra, Ph.D. dan Ayu Gareta, S.T., M.T.
Korektor : Rina Lestari
Cetakan I : 2023
ISBN : 978-623-297-321-3

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

Dengan mengucapkan Alhamdulillahirabbilalamiin, penulis memanjatkan puji dan syukur kepada Allah Swt. atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB.

Naskah orasi ilmiah ini disusun berdasarkan hasil penelitian penulis dalam bidang sistem instrumentasi biomedis khususnya instrumentasi pencitraan medik selama sepuluh tahun terakhir. Penelitian yang dimuat pada naskah ini menekankan pada pendekatan multi-fisis yang memadukan metode eksperimental, analitikal, dan komputasional yang dilakukan secara berimbang guna mencari ruang solusi dan inovasi pada usaha peningkatan fungsionalitas pada instrumentasi pencitraan medik.

Meskipun jauh dari sempurna, semoga tulisan ini dapat sedikit menambah wawasan, memberi inspirasi, dan bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 19 Agustus 2023

Prof. Suprijanto

SINOPSIS

Instrumentasi medis memainkan peran penting dalam bidang kedokteran dan perawatan kesehatan dengan lingkup yang sangat luas dan terus berkembang hingga saat ini. Secara umum peran dari instrumentasi medis adalah untuk mendiagnosis, monitoring dan mendukung terapi dalam proses penyembuhan pasien selama menjalani tindakan medis.

Instrumentasi medis yang digunakan pada rumah sakit dan klinik di Indonesia umumnya sangat beragam. Berbagai instrumentasi medis tersebut merupakan kumpulan dari berbagai hasil penemuan yang dimulai sejak abad-18, misalkan stetoskop dan tensimeter air raksa, hingga teknologi yang paling mutakhir seperti *magnetic resonance imaging* (MRI) dengan kekuatan medan magnet tiga Tesla hingga *high speed computerized tomography(CT) scan*.

Informasi yang diperolah dari pengukuran data fisiologis pada tubuh manusia, misalkan informasi dari sinyal jantung (elektrocardiogram-ECG), sinyal otak (electroencephalogram-EEG), dan sinyal perubahan konduktansi kulit, saat ini juga dimanfaatkan untuk aplikasi di luar medis. Sebagai contohnya adalah aplikasi pada *brain computer interface, biofeedback* untuk ergonomik kognitif dan *neuromarketing*. Hal ini berperan sebagai pendorong percepatan inovasi bidang instrumentasi medis sejalan dengan kebutuhan khususnya untuk pengukuran dan kuantifikasi terkait aspek dinamika dari interaksi manusia dan sistem fisis untuk bidang medis serta nonmedis.

Perkembangan penelitian pada bidang instrumentasi medis sering kali memerlukan penelitian panjang guna meningkatkan fungsionalitas instrumentasi medis. Sebagai contoh, untuk mendukung keberhasilan prosedur intervensi medis penusukan jarum spinal dengan dimensi panjang 9-17 cm, tenaga medis memerlukan umpan balik visual selama proses penusukan berlangsung. Salah satu pencitraan medis yang aman untuk digunakan keperluan pemandu penusukan jarum spinal adalah dari perangkat pencitraan ultrasonik yang dikenal dengan ultrasonografi (USG). Akan tetapi, konsistensi dari visibilitas jarum pada citra USG masih menjadi satu tantangan sampai dengan saat ini.

Dalam buku ini, diberikan contoh kasus terkait penelitan untuk peningkatan fungsionalitas pencitraan ultrasonografi sebagai pemandu penusukan jarum spinal. Pendekatan multi-fisis melalui eksperimental, analitikal dan komputasional dibutuhkan untuk memberikan ruang solusi yang komprehensif pada masalah visibilitas jarum spinal . Pendekatan solusi untuk masalah tersebut dilakukan dengan perbaikan protokol pencitraan jarum spinal dari perangkat USG, peningkatan kemampuan pengolahan citra untuk meningkatkan visibilitas sampai dengan pendekatan aspek sains pencitraan ultrasonik terkait mekanisme interaksi gelombang ultrasonik dengan jarum spinal.

Hal lain yang disampaikan dalam buku ini adalah terkait pengembangan instrumentasi medis untuk mendukung pengembangan pada teknologi kognitif (*cognitive technology)*, khususnya terkait dengan kebutuhan pencitraan otak (*brain imaging)*. Sampai dengan 1990-an, analisis dari rekaman sinyal EEG hanyalah berdasarkan informasi yang terukur dipermukaan kepala sebagai dasar untuk menganalisis pola rekaman EEG. Dengan hadirnya digital EEG, berkembang bidang *quantititive* EEG (QEEG) yang menganalisis rekaman langsung sinyal EEG dengan pendekatan pengolahan sinyal digital dan statistik. Perkembangan lanjut pada QEEG adalah usaha untuk mendapatkan visualisasi tiga dimensi (3D) terkait aktivitas otak pada area tertentu.

C*omputational imaging* dikenalkan untuk mendapatkan estimasi pencitraan otak dalam 3D dari rekaman EEG. Untuk geometri dari otak, dalam pencitraan otak berbasis EEG digunakan informasi citra 3D dari pemindai MRI. Contoh kasus yang disampaikan pada buku ini adalah pendekatan multi-fisis pada peningkatan fungsionalitas pencitraan otak berbasis EEG untuk aktivitas motorik pada tangan. Dalam kasus ini terlihat contoh nyata rangkaian analisis dan proses rekayasa yang menunjukkan keindahan keilmuan fisika terkait fenomena elektromagnetika, pengolahan sinyal, *boundary finite element* (BEM), hingga masalah komputasi *inverse problem* dan eksperimen terkait *neurofeedback*. Dengan berbagai contoh kasus penelitian dan kasus nyata yang disajikan dalam naskah ini, penulis berharap harmonisasi berbagai metode pendekatan multi-fisis ini dapat mengajak mahasiswa dan rekan-rekan peneliti untuk ikut “bertamasya” dalam ruang pengembangan sains dan teknologi pencitraan medis serta pencitraan otak berbasis EEG, yang sedang berkembang di dunia pada saat ini.

DAFTAR ISI

PRAKATA ..... **v**
SINOPSIS ..... **vii**
DAFTAR ISI ..... **ix**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xii**

1 SEJARAH DAN PERKEMBANGAN KEILMUAN TEKNIK FISIKA DI INDONESIA . **1**

2 INSTRUMENTASI PERCITRAAN MEDIS **5**

3 PENDEKATAN MULTI-FISIS UNTUK PENINGKATAN FUNGSIONALITAS PENCITRAAN ULTRASONOGRAFI SEBAGAI PEMANDU PENUSUKAN JARUM SPINAL **12**

3.1 Pengantar 12
3.2 Pencitraan Ultrasonografi Medis 13
3.3 Permasalahan Pencitraan Ultrasonografi sebagai Pemandu Penusukan Jarum Spinal 16
3.4 Pendekatan Pemodelan dan Simulasi Berdasarkan Teori Hamburan Resonansi 19
3.5 Eksperimen Spektroskopi Modus-A 22
3.6 Manfaat dan Pengembangan Kedepan 28

4 PENDEKATAN MULTI-FISIS PADA PENINGKATAN FUNGSIONALITAS PENCITRAAN OTAK BERBASIS ELECTROENCEPHALOGRAM **30**

4.1 Pengantar Teknologi Pencitraan Otak 30
4.2 Sistem Instrumentasi EEG 31
4.3 Quantitative EEG 33
4.4 QEEG Berbasis Perekaman Langsung 35
4.4 QEEG Berbasis Estimasi Densitas Arus dengan Lokalisasi Sumber 37
4.5 Studi Kasus: QEEG untuk *Neurofeedback* pada Aktivitas Motorik Repetitif pada Tangan 40
4.6 Evaluasi QEEG Berbasis Perekaman Langsung 41
4.7 Evaluasi QEEG Berbasis Estimasi Densitas Arus dengan Lokalisasi Sumber 42
4.8 Estimasi Densitas Arus Sumber dari Area Brodmann 4 dan 6 43
4.9 Tren Aplikasi Pencitraan Otak pada QEEG 46

5 PENUTUP **48**

6 UCAPAN TERIMA KASIH **49**

DAFTAR PUSTAKA **51**
CURRICULUM VITAE **57**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Setup eksprimen pencitraan ultrasonografi (USG) untuk pendidikan dan penelitian di Laboratorium Instumentasi Medik, Fakultas Teknologi Industri, ITB (A). Perangkat USG *portable*, (B) Tranduser *linear array* dan hasil citra mode B dan (C) Tranduser *curved array* dan hasil citra mode B. 14
Gambar 3.2 Diagram blok sistem pencitraan ultrasonik mode-B. 15
Gambar 3.3 Eksprimen dengan perangkat pencitraan ultrasonik klinik untuk pencitraan jarum spinal pada *phantom* tofu. Perbedaan sudut penusukan relatif terhadap muka gelombang ultrasonik dari tranduser menghasilkan perbedaan visibilitas pada citra jarum spinal. 16
Gambar 3.4 Konsep pencitraan ultrasonografi dari jarum dengan proses kirim-terima (*transmit-receive*) menjadi sinyal mode-A dan citra mode-B. 18
Gambar 3.5 Konsep pemodelan, asumsi geometri dan komponen sistem dalam teori hamburan resonansi untuk silinder berongga, dengan α adalah sudut datang gelombang bidang pada model jarum spinal dalam bentuk silinder berongga. 19
Gambar 3.6 Spektrum amplitudo tekanan hamburan resonansi (n = 1, 2, ...,5) 21
Gambar 3.7 Rancangan mekanik robot pemosisi jarum untuk simulasi gerakan pemosisian jarum secara presisi dengan variasi sudut dan kedalaman, robot pemosisi jarum dirancang sesuai dengan kebutuhan eksperimen. 23
Gambar 3.8 Konfigurasi eksperimen spektroskopi ultrasonik modus-A. 24
Gambar 3.9 Ilustrasi sinyal deteksi selubung (merah) dari sinyal mentah Frekuensi Radio (FR) (biru) pada sudut penusukan 25° 25
Gambar 3.10 Distribusi nilai maksimum intensitas dari parameter sinyal deteksi selubung dalam domain waktu. 26
Gambar 3.11 Densitas Spektral Daya (DSD) satu sisi untuk jarum 22 G, variasi sudut penusukan 0°–45°. 27
Gambar 3.12 Distribusi nilai Densitas Spektral Daya maksimum dalam domain frekuensi. 28
Gambar 4.1 (a). EEG Klinik, (b). Komersial Wereable EEG dan (c) *open system wereable* EEG. 32
Gambar 4.2 Metode Perakaman EEG. 34
Gambar 4.3 Pengolahan sinyal EEG untuk perekaman langsung. 36

Gambar 4.4 Tahapan pemrosesan QEEG berbasis estimasi densitas arus dengan lokalisasi sumber sebagai basis pencitraan otak berbasis EEG. 38
Gambar 4.5 Konfugurasi eksperimen untuk pecitraan otak berbasis EEG untuk analisis aktivitas motorik pada tangan..... 41
Gambar 4.6 Densitas Spektral Daya (DSD) untuk gelombang-mu berdasarkan perekaman langsung. Tren penurunan DSD dari gelombang-mu terjadi pada saat aktivitas menggenggam. 42
Gambar 4.7 Lokalisasi sumber dari hasil LORETA, untuk kondisi baseline dan tangan mengengam – tangan. Area kuning dan merah yang mewakili aktivitas otak yang lebih tinggi dalam model korteks serebral adalah menggambarkan dominasi distribusi dipol pada saat kinerja relatif terhadap bagian otak lainnya. Hasil dari aktivitas motorik tangan menunjukkan aktivasi otak kontralateral selama aktivitas motorik. 43
Gambar 4.8 Visualisasi aktivitas otak terkait motorik pada tangan (a) BA 4 kiri, (b) BA 4 kanan, (c) BA 6 kiri, dan (d) BA 6 kanan. Area kuning mewakili aktivitas otak yang lebih tinggi dibandingkan daerah lain..... 44
Gambar 4.9 Densitas arus saat baseline dan menggenggam– tangan kanan (a) BA 4 kiri dan (b) BA 6 kiri, a) BA 4 kanan dan (b) BA 6 kanan. 45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Landmark sejarah awal penemuan Instrumentasi medis 8
Tabel 4.1 Estimasi densitas arus rata-rata dari selama kondisi genggaman tangan dari kondisi *baseline*, di B.A. 4 dan 6. 46

1 SEJARAH DAN PERKEMBANGAN KEILMUAN TEKNIK FISIKA DI INDONESIA

Perjalanan pendidikan berbasis keilmuan fisika teknik di Indonesia bermula pada pendirian *Natuurkundig Ingenieur Afdeling* di *Technische Hoogeschool* (TH) di Bandung, pada tahun 1950. Pendidikan *Natuurkundig Ingenieur* di Indonesia didirikan oleh sejumlah Guru Besar bangsa Belanda, yaitu Prof. Nawijn, Prof. van der Leeden, dan Prof. Brinkman. Sekembalinya para dosen bangsa Belanda ke negerinya pada akhir tahun 50-an, Jurusan Fisika Teknik kemudian dipimpin oleh Prof. Ir. Soetedjo, Guru Besar pada Jurusan Teknik Sipil ITB yang juga adalah pejabat Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia di Bandung. Periode kepemimpinan Prof. Soetedjo ini berlangsung sangat singkat, yang kemudian segera digantikan oleh Prof. Ir. Adhiwijogo, yang juga merupakan lulusan Teknik Sipil TH Bandung. Selanjutnya, Prof. Adhiwijogo bersama sejumlah alumni yang telah dihasilkan oleh pendidikan Fisika Teknik pada waktu itu bekerja keras untuk meneruskan dan membesarkan program pendidikan Fisika Teknik Di ITB (Suyatman & Sonny Yuliar, 2004).

Sejak pertama kali diperkenalkan, pendidikan fisika teknik di Indonesia adalah program pendidikan pada jalur teknik (*engineering*) yang secara lebih khusus mengajarkan banyak aspek ilmu fisika dan teknologi secara bersama-sama sebagai bekal bagi lulusannya agar mampu mengisi kebutuhan akan "*Forefront of Engineering*" sesuai dengan zamannya, baik pada tingkat pemikiran, perancangan, sintesa, hingga pemanfaatannya.

Pada tahun 1960-an, "*Forefront of Engineering*" dalam keilmuan fisika teknik adalah Fisika Bangunan dan Teknik Kondisi Lingkungan. Oleh karena itu, Prof. Adhiwijogo berusaha menggali aspek-aspek kefisikaan dari kedua bidang ilmu tersebut, yaitu aspek akustik dan aspek pencahayaan pada dunia konstruksi bangunan, yang belum disentuh oleh bidang teknik sipil pada waktu itu. Kondisi sektor konstruksi bangunan pada waktu itu mendorong muncul bangunan-bangunan baru yang membutuhkan penanganan baik aspek akustiknya, maupun aspek-aspek lingkungan fisik lainnya, seperti aspek iluminasi, termal, dan kelembaban. Dengan ditemukannya persoalan-persoalan fisis nontradisional tersebut dalam dunia keinsinyuran untuk

konstruksi bangunan kala itu, menyediakan berbagai problem pada domain yang lebih luas bagi para insinyur teknik fisika untuk berkiprah dan mengambil peranan penting di area baru tersebut.

Pada tahun 1970-an bidang instrumentasi tampil sebagai "*Forefront of Engineering*" dalam keilmuan fisika teknik. Ir. Rachmad Mohamad, n.i menemukan tantangan-tantangan baru di dunia 'proses industrial dan dunia riset', khususnya dalam area 'instrumentasi dan pengukuran'. Di samping itu, bidang teknik fisika juga menghasilkan bidang-bidang antardisiplin lain seperti bidang bidang 'teknik sistem' melalui upaya Ir. A. Praptowidodo M.Sc, bidang 'kontrol' melalui kepeloporan Prof. Arfin Wardiman, dan bidang 'optik' melalui kepeloporan Prof. Liem Han Gie (yang kemudian ditumbuh kembangkan lebih lanjut oleh Prof. Andrianto Handojo). Sehingga saat ini bidang instrumentasi dan kontrol menjadi salah bidang yang terus berkembang sebagai komponen '*Forefront of Engineering*" di keilmuan teknik fisika, dengan berusaha selalu menjawab tantangan baru sesuai zamannya.

Bidang 'proses material' yang dipelopori Ir. Soelardjo M.Sc. MET, pada tahun 1970-an menjadi fondasi untuk tumbuhnya bidang rekayasa material pada keilmuan fisika teknik. Dalam pengembangan keilmuan di teknik fisika, bidang rekayasa material terus bertransformasi hingga mempelopori pengembangan bidang material maju multi-skala yang melingkupi studi komputasional, pemodelan dan eksperimental pemrosesan material yang menjadi komponen "*Forefront of Engineering*" di keilmuan teknik fisika di tahun 1990-an. Hadirnya bidang *nano science and technology*, makin memperkuat kepakaran bidang material fungsional maju pada keilmuan teknik fisika di Indonesia hingga saat ini.

Dengan perkembangan dunia sains dan teknologi yang semakin maju, keilmuan fisika teknik terus berusaha untuk berperan menjadi "*Forefront of Engineering*" untuk menjawab berbagai tantangan kerekayasaan pada zamannya. Pada era saat ini (Tim Kurikulum TF ITB, 2019) alumni teknik fisika diharapkan berperan sebagai ahli teknik yang generalis, peneliti di bidang teknologi yang sedang berkembang, maupun sebagai insinyur di bidang keahlian khusus, antara lain.

a. Fisika bangunan: meningkatkan kenyamanan manusia di suatu lingkungan melalui pengkondisian udara, pencahayaan, maupun penataan akustik.

b. Rekayasa material: mengembangkan material maju, melalui komputasi, pemodelan, dan pemrosesan material.
c. Rekayasa energi: mengembangkan sistem pembangkit, penyimpan, dan konversi energi, khususnya energi terbarukan; serta mengoptimalkan pemakaian energi.
d. Instrumentasi dan kontrol: mengembangkan pengukuran berbagai bidang (industri, lingkungan, medis), serta sistem kontrol dan otomasi untuk bangunan, industri, pertanian, sistem energi maupun transportasi.

Perkembangan keilmuan saat ini yang makin bergerak ke ranah multidisiplin, interdisiplin, dan transdisiplin menjadi tantangan baru bagi posisi keilmuan teknik fisika dalam memberikan "warna" dan memberikan peran penting dengan hadirnya era teknologi nano, teknologi informasi, bioteknologi, kognitif teknologi, *cybernetics* dan robotika, yang merupakan teknologi baru yang akan mengubah masa depan dunia.

Dalam ranah pendidikan, keilmuan teknik fisika dari tahap sarjana dan pascasarjana senantiasa menerapkan konsep pendekatan rekayasa multi-fisis dan multi-skala yang seimbang antara eksperimental, analitikal, maupun komputasional.

Bidang Instrumentasi Medis dalam keilmuan teknik fisika, dipelopori Dr. Farida Idealistina Muchtadi, di tahun 1990-an. Saat ini bidang instrumentasi medis berkembang pada aspek sains dan teknologi pengukuran dalam pendekatan multi-fisis dalam aspek yang lebih luas terkait interaksi interaksi manusia dan sistem fisik, sebagai bagian peta jalan penelitian di kelompok keahlian instrumentasi dan kontrol, Fakutas Teknologi Industri, ITB. Fokus bidang penelitian saat ini adalah pengembangan sistem instrumentasi medis untuk pendukung *biofeedback*. Aplikasi *biofeedback* dikembangkan untuk aplikasi antar-muka manusia dengan sistem fisik pada aplikasi medis (misalkan *brain computer interface*, *soft-robotic* untuk rehabilitasi) dan untuk bidang non-medis, misalkan aspek *psychoacoustic*, *neuromarketing* serta analisis human faktor terkait evaluasi kenyamanan suatu produk. Bidang lain yang dikembangkan adalah instrumentasi pencitraan medis. Fokus penelitan yang berjalan saat ini antara lain pada bidang pencitraan ultrasonografi, pencitraan otak dan pengolahan citra medis. Kajian lain yang juga dikembangkan adalah bidang modeling dan simulasi

multi-fisis multi-skala pada biomedis, khususnya terkait sistem kardiovascular.

Dalam naskah ini akan disampaikan beberapa studi kasus dari hasil penelitian, khususnya terkait pengembangan instrumentasi pencitraan medis sebagai salah satu gambaran kontribusi keilmuan teknik fisika di bidang teknologi instrumentasi medis yang dikembangkan saat ini.

2 INSTRUMENTASI PERCITRAAN MEDIS

Selama kurun waktu lima puluh tahun terakhir, terjadi peningkatan yang luar biasa dalam penggunaan instrumentasi di bidang medis untuk keperluan klinis dan penelitian. Instrumentasi medis memainkan peran penting dalam bidang kedokteran dan perawatan kesehatan.

Sumber sinyal biomedis adalah berasal dari fenomena fisis dari aktivitas organ tubuh yang diukur dengan instrumen medis. Analisis sinyal biomedis tersebut baik berdasarkan pengamatan langsung dari keluaran instrumen maupun menggunakan pendekatan pemrosesan sinyal digital sering kali digunakan sebagai dasar untuk diagnosis kesehatan dari fungsi kerja organ pada tubuh. Fenomena fisis utama yang seringkali dijadikan sumber sinyal biomedis antara lain bioelektrik, bio-akustik, bio-mekanik , bio-optikal, dan bio-impedance.

Sinyal bio-elektrik dihasilkan dari aktivitas biopotensial listrik pada sel-sel neuron. Rangsangan yang berasal dari ekternal maupun internal tubuh dapat menyebabkan terjadinya potensial aksi pada bagian sel neuron, yang menyebabkan terjadinya beda potensial antara bagian inti dan membran sel. Jenis instrumen untuk evaluasi sinyal bioelektrik disesuaikan dari organ yang akan dimonitor, dimana perbedaan utama adalah protokol pengukuran untuk penentuan posisi elektroda sebagai sensor utama untuk perekaman sinyal bio-elektrik.

Sinyal bio-akustik dihasilkan dari fenomena gerakan berulang pada bagian organ yang membangkitkan gelombang akustik misalkan gerakan katup jantung, kontraksi dinding otot jantung. Fenomena fisis lain yang membangkitkan gelombang akustik adalah terkait aliran darah pada jantung maupun pembuluh darah serta aliran udara pada saluran pernafasan. Jenis instrumen yang memanfaatkan sinyal bioakustik antara lain stetoskop, penentuan tekanan darah berdasarkan suara aliran darah pada kondisi turbulen atau dikenal dengan *Korotkoff-sound* (*K-sound*).

Sinyal bio-mekanik yang dihasilkan dari fungsi mekanik dari organ tubuh, misalkan sinyal terkait rentang dari pergerakan dari dinding rongga dada, kemampuan jangkuan maksimal pada anggota tubuh bagian atas dan bawah. Fungsi mekanik lain adalah terkait besaran fisis tekanan dan fluida. Sinyal biomekanik terkait besaran fisis tersebut memerlukan berbagai

instrumentasi medis sesuai dengan fokus evaluasi terkait fungsi organ. Misalkan sphygmomanometer yang digunakan untuk pengukur tekanan darah secara non-invasive, spirometer digunakan untuk mengukur kemampuan kapasitas volume udara pada saat inspirasi maupun ekspirasi dari fungsi organ paru-paru dalam proses pernafasan.

Sinyal bio-optikal dapat diukur dari interaksi panjang gelombang cahaya tampak pada bagian organ tertentu. Sebagai contoh perubahan warna pada bagian lidah, kulit, dan mata adalah contoh sinyal bio-optikal yang digunakan dalam proses diagnosis suatu gejala kelainan tubuh. Sinyal bio-optikal juga dapat diperoleh dengan memberikan eksitasi cahaya dengan panjang gelombang pada daerah Near Infra-red (NIR) untuk *monitoring* oksigenasi pada darah pada organ tertentu berdasarkan fenomena transmisi dan hamburan NIR yang dideteksi oleh elektro-optik sensor.

Sinyal bio-impedance adalah evaluasi jaringan berdasarkan rasio dari tegangan eksitasi dibandingkan arus yang terukur. Impedansi jaringan lunak adalah informasi penting untuk komposisi lemak pada tubuh, distribusi darah. Bio-impedance juga digunakan untuk mengukur laju dari dinamika dari rongga dada dalam proses pernafasan.

Berdasarkan sinyal biomedis tersebut, berkembang berbagai jenis instrumen medis, dengan peran utama antara lain digunakan untuk:

a. **Diagnosis:** Instrumen medis membantu dalam deteksi dan diagnosis penyakit dan kondisi medis. Dari termometer, stetoskop sampai dengan instrumentasi pecitraan sinar-X, pemindai ultrasonografi, pemindai MRI, dan *laboratory analyzers* yang membantu dokter dalam memvisualisasikan struktur internal organ tubuh, mengidentifikasi kelainan, dan menentukan rencana perawatan yang sesuai.
b. ***Monitoring***: Instrumen medis digunakan untuk terus memantau tanda-tanda vital dan parameter kesehatan pasien. Perangkat seperti monitor tekanan darah, elektrokardiogram (ECG), oksimeter, dan ventilator, memungkinkan untuk deteksi dini setiap perubahan dan intervensi cepat bila diperlukan pada pasien.
c. **Perawatan**: Instrumentasi medis memainkan peran aktif dalam berbagai intervensi medis. Misalnya, instrumen bedah digunakan oleh ahli bedah selama prosedur untuk pembedahan pasien dan pompa infus yang

digunakan untuk membantu dalam memberikan obat dan cairan kepada pasien secara akurat dan tepat.

d. **Pendukung terapi** : Instrumen medis dapat berperan dalam aspek perawatan pendukung kepada pasien dengan kondisi kronis atau mereka yang pulih dari suatu prosedur terapi. Perangkat seperti *prostesis, orthosis*, alat bantu dengar, dan alat pacu jantung juga amat diperlukan untuk meningkatkan kualitas hidup dan mendukung kesehatan pasien.
e. **Pengendalian infeksi**: Instrumen medis juga berperan dalam pencegahan dan pengendalian infeksi. Instrumen yang disterilkan dan dirawat dengan benar membantu mengurangi risiko penularan infeksi dari satu pasien ke pasien lainnya selama prosedur medis.
f. **Pengumpulan dan analisis data**: instrumen medis dewasa ini sebagian besar dilengkapi dengan antarmuka digital yang memudahkan proses pengumpulan dan menyimpan data pasien. Data tersebut juga dapat dianalisis untuk mendapatkan informasi tentang perkembangan kesehatan pasien selama perawatan dan hasil pengobatan.

Perkembangan instrumentasi medis berdasarkan informasi citra, pada awalnya adalah berbasis interaksi cahaya tampak dengan permukaan organ tubuh yang dapat dilihat secara langsung secara visual oleh mata. Untuk meningkatan resolusi spasial dan perbesaran visual dari permukaan objek yang diamati, berkembanglah pencitraan medik dengan penggunaan instrumentasi optik, misalkan kaca-pembesar, mikroskop atau *color camera*.

Kebutuhan untuk mendapatkan informasi citra pada organ bagian dalam tubuh tanpa pembedahan terbuka, mendorong pengembangan instrumentasi pencitraan medis, dengan kemampuan pemindaian organ dalam tubuh yang lebih nyaman dan cepat, dengan memanfaatkan fenomena interaksi gelombang akustik dan elektromagnetik pada tubuh. Informasi dalam bentuk citra dari pencitraan medis, memberikan informasi yang komprehensif bagi tenaga medis untuk melakukan diagnosis dan perencanaan terapi menjadi lebih baik.

Perkembangan instrumentasi medis untuk penanganan pasien yang memerlukan pembedahan, saat ini berkembang dari metode pembedaaan terbuka (*open surgery*) ke operasi invasif minimal (*minimally invasive surgery*) sehingga pasien memerlukan waktu rawat inap lebih singkat di rumah sakit. Integrasi teknologi instrumentasi medis dan *tele-health* juga telah

memfasilitasi *robotic surgery* dan monitoring fungsi vital sinyal fisiologis dengan memanfaatkan *wereable device* berbasis *internet of thing* (IoT) (Khandpur, 2003).

Instrumentasi medis yang digunakan di rumah sakit dan klinik di Indonesia, adalah kombinasi dari hasil berbagai penemuan yang dimulai sejak mulai abad-18 dan sampai teknologi yang paling mutakhir yang berkembang saat ini. Contoh dari beberapa *mailstones* penting dalam sejarah perkembangan awal penemuan berbagai instrumentasi medis ditunjukkan pada Tabel 2.1:

Tabel 2.1 Landmark sejarah awal penemuan Instrumentasi medis

Stetoskop (1816)	***Pencitraan projeksi X-ray (Rontgen) 1895***
Pengukuran tekanan darah dengan Hg (1896)	*Electrocardiograph (ECG) 1901*
Electroencephalogram (EEG) (1924)	*Pencitraan Ultrasonik (1955)*
Computed tomography(CT) scan 1973	*magnetic resonance imaging (MRI) (1977)*

Stetoskop adalah instrumentasi medis untuk mengukur sinyal bio-akustik. Fungsi dari stetoskop adalah untuk mendengarkan suara organ di dalam tubuh, seperti denyut jantung, nadi, organ pencernaan, dan paru-paru. Sampai dengan saat ini stetoskop dapat bekerja tanpa bantuan perangkat elektronik masih banyak digunakan untuk keperluan diaplikasi klinis.

Electrocardiograph (ECG) adalah instrumen medis merekam sinyal bio-elektrik pada bagian organ jantung. Pola sinyal ECG menggambarkan dinamika dari fungsi kerja otot jantung dalam memompa darah baik jaringan tubuh maupun ke paru-paru. Electroencephalogram (EEG) adalah instrumen medis yang merekam sinyal bio-elektrik dari dinamika fungsi kerja otak terhadap kondisi rangsangan internal maupun eksternal.

Penemuan Wilhelm Rontgen terkait pencitraan sinar-X, memberikan dasar penting dalam pengembangan dengan teknologi pencitraan medis. Pencitraan medis adalah proses rekonstruksi citra interior tubuh manusia tanpa pembedahan. Untuk pendapatkan rekonstruksi citra interior tubuh manusia tanpa pembedahan, instrumentasi pencitraan medis akan mengirimkan gelombang ke objek yang menjadi target. Fenomena gelombang antara sumber energi dan objek menjadi basis dari tipe pencitraan medis. Pencitraan X-ray adalah berdasarkan transmisi gelombang. Untuk fenomena refleksi gelombang, adalah basis pencitraan optik dan ultrasonik. Untuk

pencitraan MRI adalah berbasis dari emisi gelombang elektromagnetik (Hendee, 1994).

Citra yang direkonstruksi dari teknologi pencitraan medis, pada awal perkembangnya digunakan untuk memberikan informasi terkait visualisasi dari anatomi organ untuk membantu diagnosis yang lebih akurat. Sejalan dengan perkembangan bidang pengolahan dan analisis citra medis digital, berbagai metode untuk peningkatan visualisasi organ dari hanya citra 2D menjadi 3D atau dalam bentuk 4D, menjadi fitur dari sistem instrumentasi pecitraan medis dewasa ini. Pengembangan dari pencitraan projeksi X-ray ke CT-scan, adalah era awal pemanfaatkan teknik komputasi tomografi yang memanfaatkan pengolahan sinyal dan strategi rekonstruksi balik untuk penghasilkan citra 2D dan 3D. Masalah dari pencitraan CT-scan adalah memilik kontras citra yang superior untuk jaringan keras. Usaha untuk mendapatkan kontras citra yang baik untuk jaringan lunak, misalkan pada organ otak, menjadi salah satu motivasi dari perkembangan teknologi MRI. Nilai kontras untuk tiap piksel pada citra MRI adalah proses interaksi multi-fisis terkait rekayasa perilaku spin proton hidrogen pada jaringan tubuh yang terpapar medan magnet statis ekternal yang kuat (antara 0,5 Tesla – 3 Tesla untuk aplikasi medis). Pengaruh dari medan magnet statik eksternal, akan menyebabkan presesi spin hidrogren akan serempak pada frekuensi Larmor. Dalam kondisi tersebut, akvitasi gelombang Radio Frekuensi(RF) dengan pada frekuensi Larmor menyebabkan spin hidrogen akan tereksitasi pada kondisi resonansi untuk berpresisi pada orientasi lain. Nilai kontras pada tiap piksel citra MRI adalah proporsial dengan energi emisi spin hidrogren pada saat eksitasi gelombang RF dihentikan. Hasil dari pemindaian MRI memberikan kontras jaringan lunak yang lebih superior dibandingkan dengan citra CT-scan.

Untuk memaksimalkan informasi dari keunggulan citra CT-scan dan keunggulan citra MRI, mendorong perkembangnya pendekatan integrasi hasil citra secara multi-modal, misalkan integrasi citra antara CT-scan dan MR (Mohamed Y. Abdallah & Alqahtani, 2019; Y. Zhang & Dong, 2023).

Pencitraan medis yang berbasis interaksi antara gelombang akustik pada frekuensi diatas 20 KHz dengan bagian organ yang akan dipindai dikenal dengan pencitraan ultrasonik atau ultrasonografi (USG). Sejak awal dikenalkan untuk aplikasi medis, citra USG sangat membantu dalam bidang

Obstetri dan Ginekologi (Obgyn). Perkembangan teknologi elektronika, material untuk tranduser ultrasonik dan teknik pemrosesan sinyal digital, mendorong perkembangan USG yang mampu merekam perubahan dinamik organ dalam citra dalam fungsi waktu baik dalam 2D maupun 3D.

Teknologi pencitraan medis saat ini juga diperlukan untuk mendukung perencanaan terapi, serta sebagai umpan balik visual untuk memandu pada intervensi medis dan operasi invasif minimal. Sebagai contoh kebutuhan pada intervensi medis adalah sistem pencitraan untuk pemandu penusukan jarum spinal, sebagai usaha untuk menghindari risiko kesalahan penusukan, mengurangi waktu total pelaksanaan, sekaligus mengurangi rasa sakit dan tidak nyaman pada pasien (Furlow, 2019; Hungr et al., 2011; von Groote-Bidlingmaier & Koegelenberg, 2012; X. Zhang et al., 2023).

Penelitian yang terus berkembang terkait aspek interaksi dengan pendekatan multi-fisis antara gelombang dan target objek yang akan dicitrakan, mendorong perkembangan teknologi pencitraan medis untuk mendapatkan informasi fungsional dari organ lebih dari sekedar visualisasi pada bagian organ. Misalkan untuk keperluan evaluasi aliran darah, yang dikenal dengan *angiography imaging, Doppler imaging* yang merupakan pengembangan dari pencitraan ultrasonik untuk kebutuhan diagnosis dinamika jantung, serta *fungsional magnetic resonance imaging (fMRI)* yang dikembangkan pencitraan otak untuk keperluan evaluasi aktivitas pada jaringan syaraf pada korteks (Hendee, 1994)

Perkembangan kecepatan pemrosesan data digital yang cepat dan kuat untuk mendukung pengolahan sinyal untuk data besar, komputasi kompleks untuk memecahkan solusi secara *inverse problem* dan proses visualisasi hasil yang mengintegrasikan multi-modal data dari output pencitraan medis, mendorong tumbuhnya bidang *computational imaging*. Satu pendekatan yang merupakan keseimbangan antara kemampuan hasil pencitraan dari keunggulan resolusi temporal dan spasial serta biaya pengembangan yang lebih rendah, mendorong tumbuhnya bidang *computational imaging* khususnya untuk evaluasi fungsi kerja dari otak, atau yang dikenal dengan pencitraan otak (*brain imaging)*. Pemanfaatan informasi dari perekaman bio-potensial otak dengan Electroencephalogram (EEG) yang dipadukan dengan informasi geometri dan citra anatomi otak secara 2D yang diperoleh dari pemindahan kepala dengan MRI, menjadi ide perkembangnya penelitian

pada bidang pencitraan otak berbasis EEG (Glomb et al., 2022).(Michel et al., 2004)

Kontribusi dalam pengembangan sistem instrumentasi pencitraan medis khususnya di perguruan tinggi di Indonesia, harus dimulai dari aspek pendidikan dan penelitian secara sinergis dengan pendekatan multidisplin. Studi kasus terkait hasil penelitian dengan pendekatan multi-fisis dalam peningkatan fungsionalitas pencitraan ultrasonik untuk sebagai pemandu penusukan jarum medis spinal akan disampaikan. Kemudian kontribusi dalam pengembangan *computational imaging*, akan disampaikan dengan pendekatan multi-fisis dalam peningkatan fungsionalitas pencitraan otak berbasis EEG juga akan di sampaikan di buku ini.

3 PENDEKATAN MULTI–FISIS UNTUK PENINGKATAN FUNGSIONALITAS PENCITRAAN ULTRASONOGRAFI SEBAGAI PEMANDU PENUSUKAN JARUM SPINAL

3.1 Pengantar

Di dalam dunia medis dikenal suatu prosedur penanganan atau diagnostik yang melibatkan proses pengirisan, penusukan, atau proses memasukkan alat ke dalam tubuh dengan menekankan kepada upaya-upaya meminimalkan luka. Prosedur ini dikenal pula sebagai prosedur intervensional invasif minimal (*minimally invasive interventional procedure*) yang dikembangkan dengan tujuan untuk mempercepat pemulihan pasien.

Prosedur intervensional invasif minimal biasanya melibatkan penggunaan jarum dalam pelaksanaannya, antara lain pada prosedur anestesi, biopsi, ablasi, *brachytherapy* dan operasi janin. Salah satu prosedur intervensional invasif minimal yang paling sering dilakukan adalah prosedur penusukan jarum spinal untuk keperluan anestesi spinal dan epidural pada tulang belakang, seperti pada operasi *caesar,* ortopedi, vaskular, ginekologi, dan urologi (Katircioglu et al., 2008).

Keberhasilan prosedur penusukan jarum spinal ini sangat bergantung dari ketepatan penempatan ujung jarum di sekitar jaringan saraf yang akan diblok tanpa melukai jaringan saraf atau jaringan lain yang bukan menjadi target penusukan. Kompleksitas prosedur penusukan jarum spinal ini dipengaruhi pula oleh variasi anatomi tulang belakang pasien yang berbeda-beda. Kesalahan penusukan dapat menimbulkan risiko medis dari yang ringan hingga fatal(Huang & Gao, 2016).

Berdasarkan fakta-fakta tersebut, informasi yang dipresentasikan dalam visualisasi akan memberikan informasi umpan balik dalam memandu prosedur intervensional invasif minimal secara *real-time* sangat dibutuhkan dokter dalam prosedur penusukan jarum spinal untuk menghindari kesalahan penusukan. Metode pemandu penusukan jarum spinal yang berkembang saat ini adalah dengan pendekatan pecitraan medis (*medical imaging*)(Solomon & Silverman, 2010).

Teknologi pencitraan medis yang dapat digunakan untuk memandu prosedur intervensional invasif minimal antara lain sinar-X, *Computerized Tomography (CT)-Scan*, dan *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) dan Ultrasonografi (USG)(Abdelaziz et al., 2021; Culp et al., 2000). Pendekatan USG menjadi salah satu pilihan dalam pemandu karena secara umum memiliki beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh mode-mode pencitraan lainnya, antara lain tidak memiliki risiko radiasi atau ionisasi, memiliki resolusi temporal yang tinggi, ukuran perangkat dan transduser yang relatif kecil, relatif lebih rendah biaya investasi peralatan, serta memungkinkan pendekatan yang bervariasi dari segi bidang pencitraan.

3.2 Pencitraan Ultrasonografi Medis

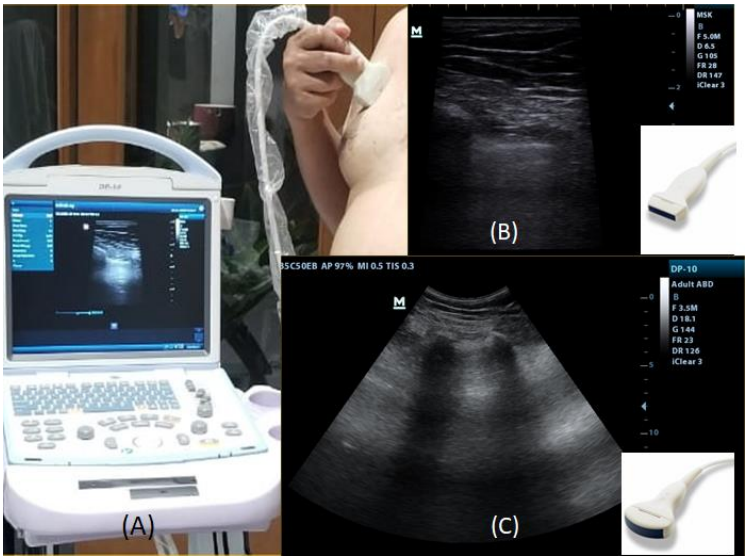
Gelombang ultrasonik adalah gelombang akustik yang mempunyai frekuensi melebihi ambang batas pendengaran manusia, yaitu di atas 20 kHz. Dalam pencitraan medis, rentang frekuensi gelombang ultrasonik berkisar antara 2–10 MHz. Gelombang ultrasonik merupakan suatu bentuk energi akustik yang dihasilkan oleh kristal-kristal *piezoelectric* yang terdapat di dalam transduser. Pembangkitan energi ini didasarkan pada fenomena efek *piezoelectric* balik, yaitu ketika material kristal *piezoelectric* dikenai tegangan elektrik, maka kristal tersebut akan bergetar dengan frekuensi tinggi dan membangkitkan energi akustik dalam bentuk gelombang ultrasonik (Hoskins et al., 2019; Suprijanto & Hesty Susanti, 2020).

Gelombang ultrasonik dari transduser kemudian ditransmisikan ke tubuh pasien, merambat secara longitudinal sebagai rangkaian rapatan atau tekanan tinggi, dan renggangan atau tekanan rendah. Gelombang ultrasonik dibedakan berdasarkan panjang gelombang, yaitu jarak antarpuncak gelombang, dan frekuensi, yaitu jumlah puncak gelombang per detik. Kecepatan rambat gelombang ultrasonik di dalam tubuh manusia adalah sekitar 1540 m/detik

Untuk menghasilkan citra mode-B, gelombang ultrasonik harus dipantulkan kembali oleh jaringan tubuh yang dijadikan objek pencitraan untuk diterima kembali oleh transduser. Pada tahap ini, transduser yang tadinya berada dalam mode kirim akan berganti menjadi mode terima. Selanjutnya akan terjadi fenomena efek *piezoelectric*. Pada proses ini, energi akustik berupa pantulan gelombang ultrasonik dari jaringan tubuh

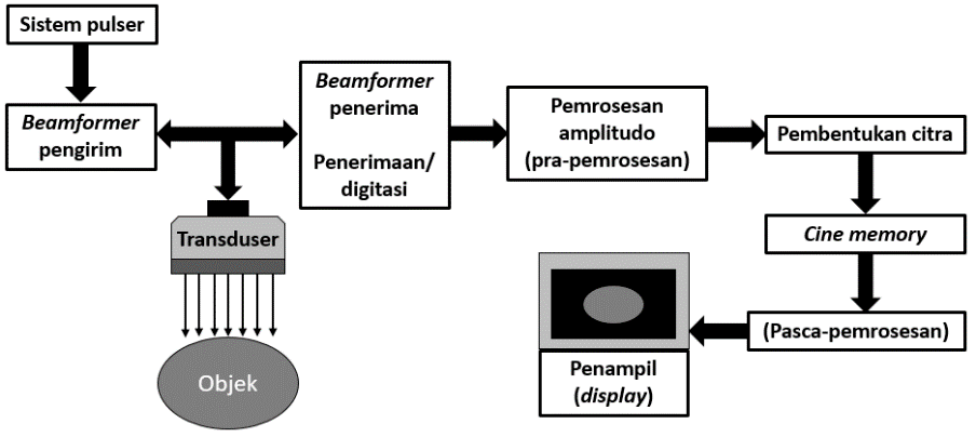
menyebabkan perubahan bentuk pada kristal *piezoelectric* di dalam transduser sehingga membangkitkan energi elektrik yang selanjutnya akan diproses oleh perangkat ultrasonik untuk diterjemahkan menjadi citra mode-B. Proses kirim-terima ini dapat diulangi lebih dari 7000 kali/detik, dan jika digabungkan dengan proses komputasi maka mampu menghasilkan citra dua dimensi waktu nyata (*real time*) yang dapat dimanfaatkan secara klinis.

Dalam aplikasi klinis, transduser yang digunakan merupakan transduser *array* multi-elemen yang merupakan gabungan dari sejumlah elemen tunggal kristal *piezoelectric*. Jenis transduser ultrasonografi dibedakan berdasarkan bentuk dan rentang frekuensi, serta jumlah elemen. Berdasarkan bentuk dan rentang frekuensi, jenis konfigurasi elemen tranduser antara lain *linear array*, *curved array,* dan *phase array*. Semakin banyak elemen pada transduser akan meningkat resolusi dan kualitas dari citra mode-B dan menujukkan kelas dari suatu perangkat pencitraan ultrasonografi. Ilustrasi dari citra mode-B dengan tranduser dua jenis tranduser diberikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Setup eksprimen pencitraan ultrasonografi (USG) untuk pendidikan dan penelitian di Laboratorium Instumentasi Medik, Fakultas Teknologi Industri, ITB (A). Perangkat USG *portable*, (B) Tranduser *linear array* dan hasil citra mode B dan (C) Tranduser *curved array* dan hasil citra mode B.

Secara umum, diagram blok untuk sistem pencitraan ultrasonik mode-B ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Diagram blok sistem pencitraan ultrasonik mode-B.

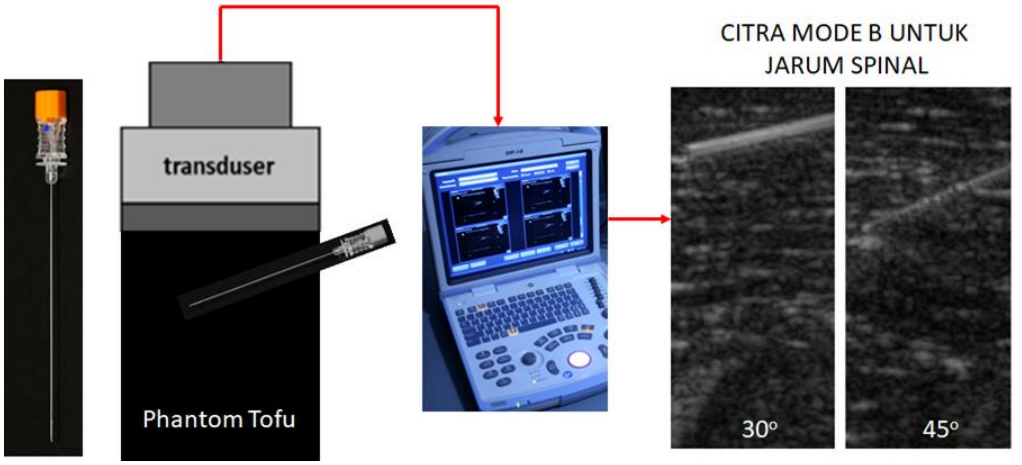
Informasi amplitudo sinyal diproses dalam berbagai cara sebelum disimpan dalam memori citra, di mana citra akan ditampilkan. Pemrosesan amplitudo diterapkan pada garis-garis citra mode-B setelah proses *beamforming*. Akan tetapi, dalam berbagai aplikasi lainnya, pemrosesan amplitudo dilakukan pada tahap sebelumnya. Selain itu, pemrosesan amplitudo juga dapat dilakukan kembali pada tahap setelah memori citra untuk meningkatkan kualitas citra akhir atau mengoptimalkan karakteristik-karaketeristik tertentu dari citra pada aplikasi klinis tertentu. Teknik *beamforming* digunakan untuk mengumpulkan informasi pantulan akustik dari beberapa bagian berbeda dari penampang melintang citra dengan menyeleksi elemen-elemen transduser dan memanipulasi waktu relatif dari sinyalnya pada mode kirim-terima. Mekanisme ini menghasilkan urutan sekuen pantulan akustik yang merepresentasikan garis-garis pada citra mode-B dan mendefinisikan sifat-sifat spasial dari citra(Suprijanto & Hesty Susanti, 2020).

Jumlah gelombang ultrasonik yang dipantulkan oleh objek dan diterima kembali oleh transduser akan terukur dalam intensitas sinyal yang direpresentasikan oleh skala keabuan dari citra mode B yang dihasilkan. Objek dengan daya pantul kuat akan menghasilkan sinyal dengan intensitas yang lebih besar dan tampak lebih putih (*hyperechoic*). Sebaliknya, objek-objek yang mempunyai daya pantul lemah (*hypoechoic*) akan tampak lebih gelap atau kehitaman.

3.3 Permasalahan Pencitraan Ultrasonografi sebagai Pemandu Penusukan Jarum Spinal

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, pencitraan ultrasonografi sebagai pemandu penusukan jarum spinal juga memiliki kekurangan dalam hal kualitas visibilitas jarum. Visibilitas jarum ini merupakan salah satu faktor krusial yang menentukan keberhasilan prosedur penusukan. Visibilitas jarum yang optimal dapat meningkatkan performansi prosedur penusukan, di antaranya menghindari risiko kesalahan penusukan, mengurangi waktu total pelaksanaan, sekaligus mengurangi rasa sakit dan tidak nyaman pada pasien.

Eksperimen awal yang telah dilakukan untuk menguji permasalahan visibilitas jarum pada citra ultrasonik mode-B pada objek "penganti" jaringan lunak (*phantom*) dengan karakteristik medium yang homogen dengan objek tofu ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Eksprimen dengan perangkat pencitraan ultrasonik klinik untuk pencitraan jarum spinal pada *phantom* tofu. Perbedaan sudut penusukan relatif terhadap muka gelombang ultrasonik dari tranduser menghasilkan perbedaan visibilitas pada citra jarum spinal.

Permasalahan konsistensi visibilitas pada citra jarum pada mode B tidak cukup diselesaikan dengan pendekatan pengolahan citra digital. Pendekatan multi-fisis untuk peningkatkan fungsionalitas dari pencitraan ultrasonik untuk meningkatan visibilitas jarum, dikategorikan ke dalam tiga aspek, yaitu:

a. **Aspek sumber**, yang berhubungan dengan rekayasa strategi pencitraan dari sumber gelombang ultrasonik.
b. **Aspek objek**, yang berhubungan dengan rekayasa pada karakteristik material dan strukur permukaan jarum sebagai objek pencitraan.

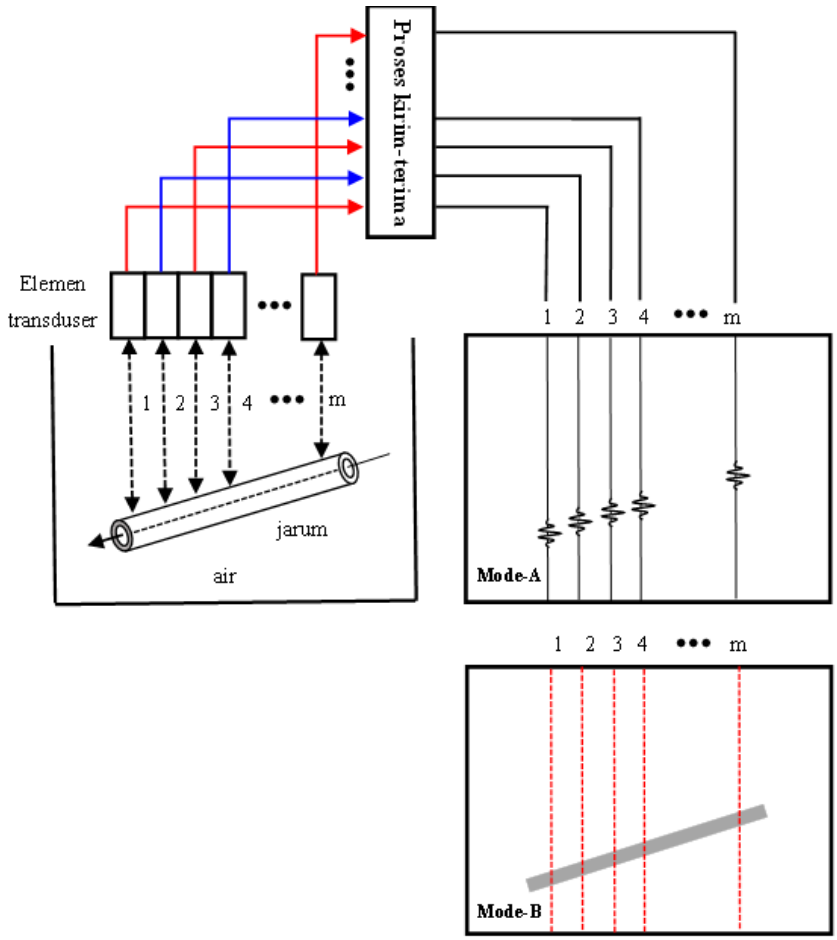
c. **Aspek interaksi**, berhubungan dengan rekayasa pada parameter interaksi antara sumber dan objek, yaitu posisi relatif jarum terhadap berkas gelombang ultrasonik, yaitu sudut datang berkas gelombang ultrasonik terhadap permukaan jarum serta kedalaman penusukan.

Dalam penelitian ini, jarum yang digunakan adalah jarum spinal. Jarum spinal merupakan jarum yang dipakai pada aplikasi penyuntikan (injeksi) atau biopsi pada area tulang belakang. Jarum spinal hampir serupa dengan jarum epidural. Namun, pada aplikasinya jarum epidural dibiarkan menancap pada bagian tulang belakang selama prosedur berlangsung untuk mengalirkan obat anestesi selama operasi. Sedangkan jarum spinal dipakai dengan pencabutan langsung segera setelah penusukan.

Pembuatan jarum spinal mengacu kepada standar internasional yang dikeluarkan oleh ISO, yaitu ISO 7864 – 2016 tentang *Sterile hypodermic needles for single use-Requirements and test methods* dan ISO 6009 – 2016 tentang *Hypodermic needles for single use-Colour coding for identification.*

Terkait **aspek objek,** jarum spinal pada umumnya terbuat dari bahan logam baja *stainless* tipe 304, 304L, 316, atau 316L. Ukuran diameter jarum spinal sering dinyatakan dalam satuan *Gauge* (G), yang teridentifikasi dalam kode warna tertentu. Untuk aplikasi spinal, jarum biasanya berukuran 18G-29G. Nilai G yang besar menunjukkan ukuran diameter luar yang semakin kecil. Berdasarkan standar ISO yang dinyatakan dalam Birmingham *Gauge*, berikut ukuran diameter dalam dan luar untuk jarum 18G–29G. Panjang jarum spinal bervariasi dari ukuran 2,54–17,78 mm .

Kajian terkait interaksi gelombang ultrasonik dengan jarum spinal menjadi tantangan tersendiri untuk dijadikan kajian penelitian, mengingat daya dukung fasilitas yang terbatas di Indonesia. Model terkait aspek fundamental dalam percitraan jarum spinal dengan ultrasonik mode A dan mode B, ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Konsep pencitraan ultrasonografi dari jarum dengan proses kirim-terima (*transmit-receive*) menjadi sinyal mode-A dan citra mode-B.

Pendekatan multi-fisis yang dilakukan secara pemodelan dan simulasi, serta pendekatan eksperimental. Permasalahan yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

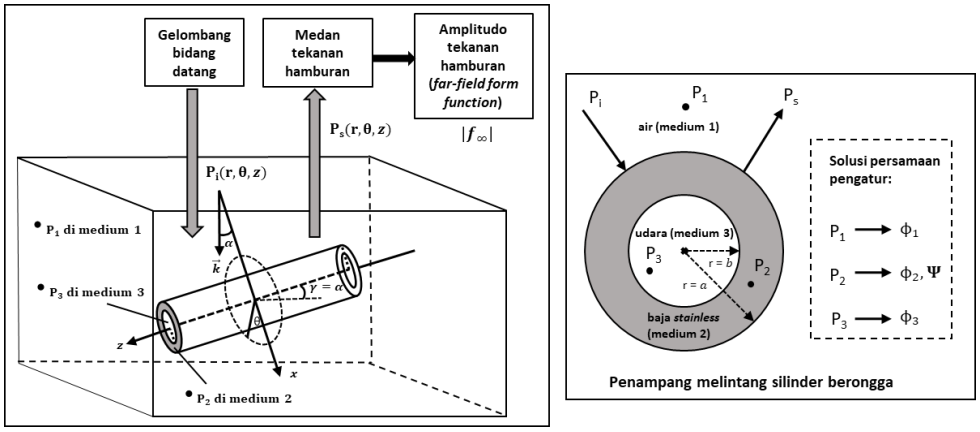
a. Fenomena fisis apa yang mendasari visibilitas jarum yang berkaitan dengan mekanisme perambatan gelombang?
b. Parameter-parameter fisis apa saja yang paling dominan memengaruhi visibilitas jarum?
c. Bagaimana parameter-parameter fisis tersebut memengaruhi visibilitas jarum?

Citra mode-B diperoleh dari hasil rekonstruksi informasi sinyal mode-A dari tiap elemen transduser. Berdasarkan konsep pencitraan ini,

inkonsistensi visibilitas jarum pada citra mode-B berhubungan erat dengan amplitudo tekanan hamburan (*scattered pressure*) akustik dari propagasi balik total jarum yang diterima oleh setiap elemen transduser. Di sisi lain amplitudo tekanan hamburan akustik itu sendiri dipengaruhi secara simultan oleh semua parameter fisis yang termasuk ke dalam ketiga aspek di atas, yaitu frekuensi gelombang ultrasonik (sumber), karakteristik material dan dimensi jarum (objek), serta sudut datang berkas gelombang terhadap permukaan jarum (interaksi) .

3.4 Pendekatan Pemodelan dan Simulasi Berdasarkan Teori Hamburan Resonansi

Untuk memahami fenomena fisis fundamental yang mendasari visibilitas jarum, maka ditinjau fenomena perambatan dan interaksi gelombang akustik pada medium yang dalam penelitian ini diasumsikan sebagai silinder isotropik elastik berongga dengan panjang tak terhingga. Dalam pemodelan, sumber gelombang diasumsikan sebagai gelombang bidang yang menginsonifikasi objek jarum dengan medium latar belakang berupa air yang bersifat homogen dan *anechoic*, sedangkan rongga jarum diasumsikan berisi udara. Parameter sumber, interaksi, dan objek dilibatkan dalam model analitik perambatan gelombang ultrasonik dengan persamaan pengatur yang diselesaikan dalam tiga domain sistem, yaitu air (medium-1), baja *stainless* dengan silinder berongga (medium-2), dan udara (medium-3) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Konsep pemodelan, asumsi geometri dan komponen sistem dalam teori hamburan resonansi untuk silinder berongga, dengan α adalah sudut datang gelombang bidang pada model jarum spinal dalam bentuk silinder berongga.

Pada medium-1 (air), resultan dari medan tekanan pada suatu titik $P_1(r,\theta,z)$ pada koordinat silindris, merupakan penjumlahan dari gelombang bidang datang (P_i) dan gelombang bidang hamburan (P_s).

$$P_i = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n \, i^n J_n(k_\perp r) \cos(n\theta) \exp\left[i(k_z z - \omega t)\right] \tag{3.1}$$

$$P_s = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n \, i^n g_n H_n^{(1)}(k_\perp r) \cos(n\theta) \exp\left[i(k_z z - \omega t)\right] \tag{3.2}$$

Dalam hal ini, $k_\perp = k_1 \cos\alpha$; $k_z = k_1 \sin\alpha$; $\epsilon_n = 1\ (n = 0)$ atau $\epsilon_n = 2\ (n \neq 0)$; k_1 merupakan modulus dari vektor gelombang di dalam air (medium-1), $H_n^{(1)}$ adalah fungsi Hankel tipe pertama dengan orde n, dan P_0 adalah sebuah konstanta dengan dimensi tekanan.

Besar amplitudo tekanan hamburan dari P_S untuk evaluasi asumsi pada medan jauh (*far-field*), adalah model dari amplitudo sinyal mode-A.

Terkait dengan parameter dari silinder berongga sebagai model jarum spinal, parameter densitas jarum (ρ), modulus Young(E) , modulus Geser (μ) dan cepat rambat gelombang akustik pada air (c_{air}) secara teoretis akan memengaruhi parameter sudut kritis α yang akan mempunyai potensi untuk menghasilkan resonansi gelombang, yang berdampak pada amplitudo tekanan hamburan (Lon et al., 1992), yaitu:

Mode pertama dikaitkan dengan gelombang spiral *whispering gallery* yang dapat tereksitasi hingga sudut kritis α_L.

$$\alpha_L = sin^{-1}\left(c_{air} \Big/ \sqrt{E/\rho} \right) \tag{3.3}$$

Mode resonansi kedua disebabkan oleh gelombang-gelombang *helical guided* yang dapat tereksitasi hingga sudut kritis α_T.

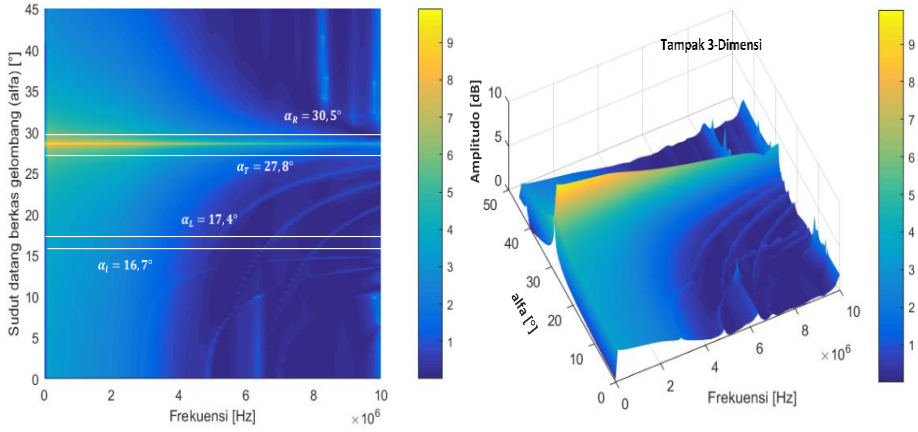
$$\alpha_T = sin^{-1}\left(c_{air} \Big/ \sqrt{\mu/\rho} \right) \tag{3.4}$$

Mode resonansi ini dikaitkan dengan mode *flexural guided* pada silinder yang merambat dengan kecepatan fase yang lebih rendah daripada kecepatan gelombang Rayleigh.

$$\alpha_R \approx sin^{-1}\left({c_{air}} \Big/ {(0{,}92\sqrt{\mu/\rho})} \right) \tag{3.5}$$

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6, spektrum amplitudo tekanan hamburan resonansi yang teramati dari hasil simulasi pada jarum menunjukkan pola-pola resonansi yang dapat dihubungkan dengan tiga jenis gelombang. Puncak-puncak yang berhubungan dengan modus resonansi gelombang *whispering gallery* cenderung meningkat ketika $\alpha \approx \alpha_L$. α_L merupakan sudut dari gelombang longitudinal pada batang ramping, yang dalam hal ini bernilai 16,7°. Sedangkan, untuk gelombang *helical guided*, puncak-puncak resonansi cenderung meningkat ketika $\alpha \approx \alpha_T$ yaitu 27,8°. Gelombang spiral Scholte-Stoneley merupakan transisi antara gelombang *whispering gallery* dan gelombang *guided*.

Modus resonansi untuk gelombang ini akan semakin mengecil pada daerah-daerah frekuensi rendah. Pada $\alpha > \alpha_L$ gelombang Scholte-Stoneley dan pemanndu gelombang yang akan muncul, sedangkan gelombang *whispering gallery* akan menghilang. Pada $\alpha > \alpha_T$, gelombang *guided* akan menghilang dan hanya tersisa gelombang Scholte-Stoneley. Modus resonansi yang berhubungan dengan gelombang Rayleigh akan muncul pada daerah $\alpha > \alpha_R$ yaitu 30,5°.



Gambar 3.6 Spektrum amplitudo tekanan hamburan resonansi (n = 1, 2, ...,5).

Jika dikaitkan dengan hal tersebut, kemungkinan untuk memperoleh visibilitas jarum yang baik pada citra ultrasonografi, dalam rentang

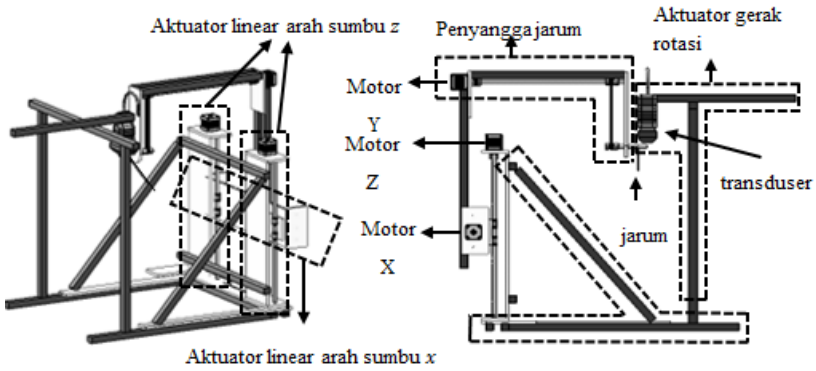
operasional penusukan (rentang $f - \alpha$) untuk kasus spesifik ukuran jarum yang disimulasikan dapat dijabarkan sebagai berikut:

a. Pada α = 28,6° yang nilainya mendekati sudut kritis kedua (α_T = 27,8°); terdapat puncak-puncak resonansi yang sangat dominan dalam seluruh rentang f hingga 10 MHz. Puncak-puncak resonansi ini dapat dikategorikan sebagai modus gelombang *helical guided*.
b. Pada $0 \leq f \leq 3$ MHz, di seluruh rentang α, puncak-puncak resonansi yang lebih rendah berangsur-angsur melandai seiring dengan kenaikan frekuensi.
c. Pada $f \approx 8{,}5$ MHz dan $f \approx 10$ MHz, terdapat puncak-puncak resonansi dalam rentang α yang tinggi, yaitu $\alpha \geq \alpha_R$.
d. Puncak-puncak resonansi lainnya, bervariasi dalam rentang f pada α rendah hingga mendekati sudut kritis kedua (α_T).

Secara sederhana, potensi pada citra ultrasonografi, jarum memiliki visibilitas yang baik dapat dilihat dengan jelas pada area di mana puncak-puncak resonansi terjadi, terkait frekuensi dan sudut α, untuk material dari jarum spinal yang spesifik.

3.5 Eksperimen Spektroskopi Modus-A

Pendekatan pemodelan dan simulasi, memberikan konfirmasi awal terkait aspek objek, aspek sumber dan aspek interaksi objek dan gelombang. Beberapa asumsi pada pemodelan secara analitik adalah pajang jarum tak hingga dan gelombang akustik yang berinteraksi dengan jarum spinal adalah gelombang bidang datar. Untuk mendapatkan evaluasi dari kondisi yang mendekati nyata, pendekatan eksperimen perlu untuk dilakukan. Untuk melakukan eksperimen secara ideal, diperlukan instrumentasi *research ultrasonography*, yang memungkinkan untuk mendapatkan sinyal dari A-mode dari setiap elemen transduser sebelum direkonstruksi B-Mode. Dengan keterbatasan sarana yang tersedia, dilakukan eksperimen dengan pendekatan evaluasi dari A-mode.

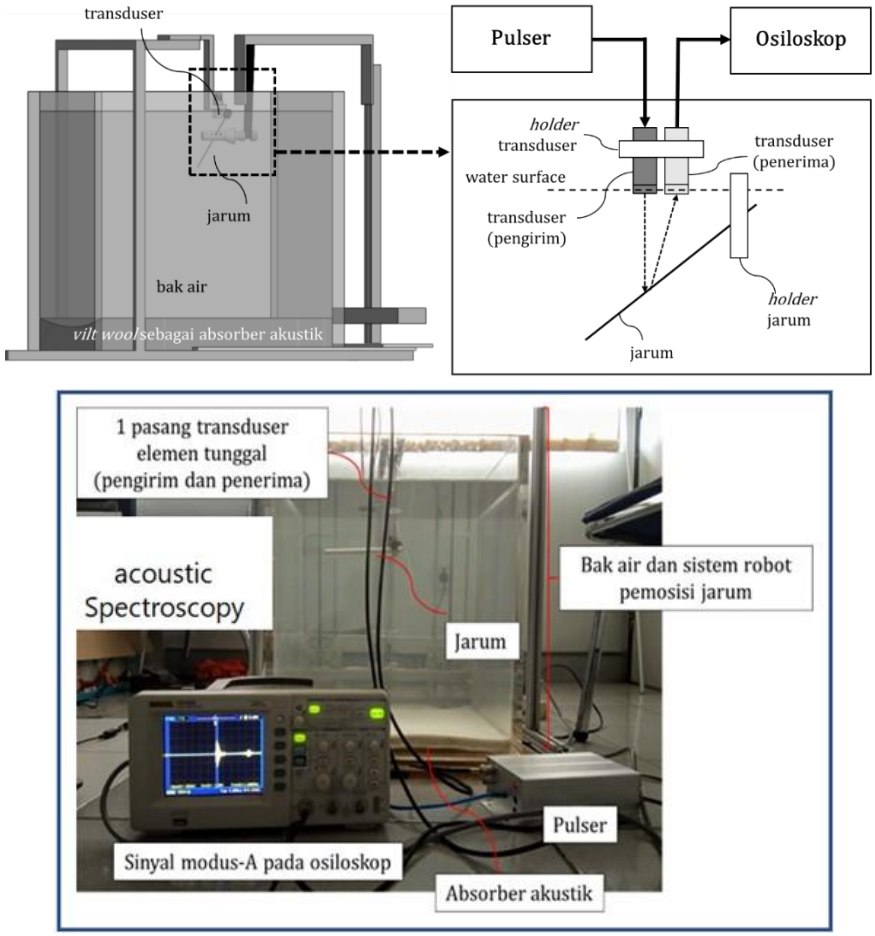


Gambar 3.7 Rancangan mekanik robot pemosisi jarum untuk simulasi gerakan pemosisian jarum secara presisi dengan variasi sudut dan kedalaman, robot pemosisi jarum dirancang sesuai dengan kebutuhan eksperimen.

Untuk mendukung eksperimen, dikembangkan medium uji untuk simulasi jaringan lunak dengan air bebas gelembung. Untuk simulasi pergerakan sudut α, dibuat sistem robot yang mampu memutar posisi jarum relatif terhadap posisi transduser sesuai dengan perintah yang diberikan. Rancangan mekanik robot pemosisi jarum ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Eksperimen dibangun untuk menguji interaksi dari jarum terhadap gelombang ultrasonik untuk satu elemen transduser. Kondisi ini juga untuk memodelkan pemindaian pada modus A.

Eksperimen spektroskopi ultrasonik dilakukan melalui pencuplikan data mentah Frekuensi Radio untuk setiap garis pindai modus-A yang merepresentasikan medan tekanan hamburan akustik murni dari jarum, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8. Amplitudo hamburan tekanan jarum spinal terhadap gelombang ultrasonik, akan dideteksi sebagai sinyal RF mode-A. Evaluasi hubungan antara sudut α dan pola sinyal RF mode-A dievaluasi dalam domain waktu dan domain frekuensi.



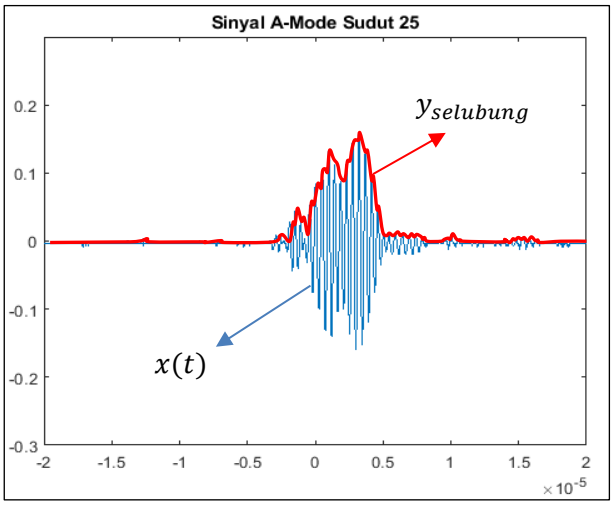
Gambar 3.8 Konfigurasi eksperimen spektroskopi ultrasonik modus-A.

3.5.1 Parameter Sinyal RF Mode-A dalam Domain Waktu

Dalam proses akuisisi sinyal, data mentah sinyal RF mode-A pada setiap garis pindai direpresentasikan sebagai $x(t)$ (lihat persamaan 3.3)

$$x(t) = A(t).\cos[2\pi f_C t + \varphi(t)] \tag{3.3}$$

Dalam hal ini, $A(t)$ merupakan superposisi dari semua fase dan amplitudo refleksi hamburan dari jarum, f_C merupakan frekuensi pusat dari pulsa eksitasi pad tranduser pengirim, serta $\varphi(t)$ merupakan fungsi fase. Parameter sinyal dalam domain waktu berupa nilai intensitas maksimum dari sinyal deteksi selubung $y_{selubung}$ diplot sebagai fungsi sudut penusukan yang sekaligus merepresentasikan sudut datang berkas gelombang (α). Contoh sinyal RF mode-A untuk sudut α=25° diilustrasikan pada Gambar 3.9.



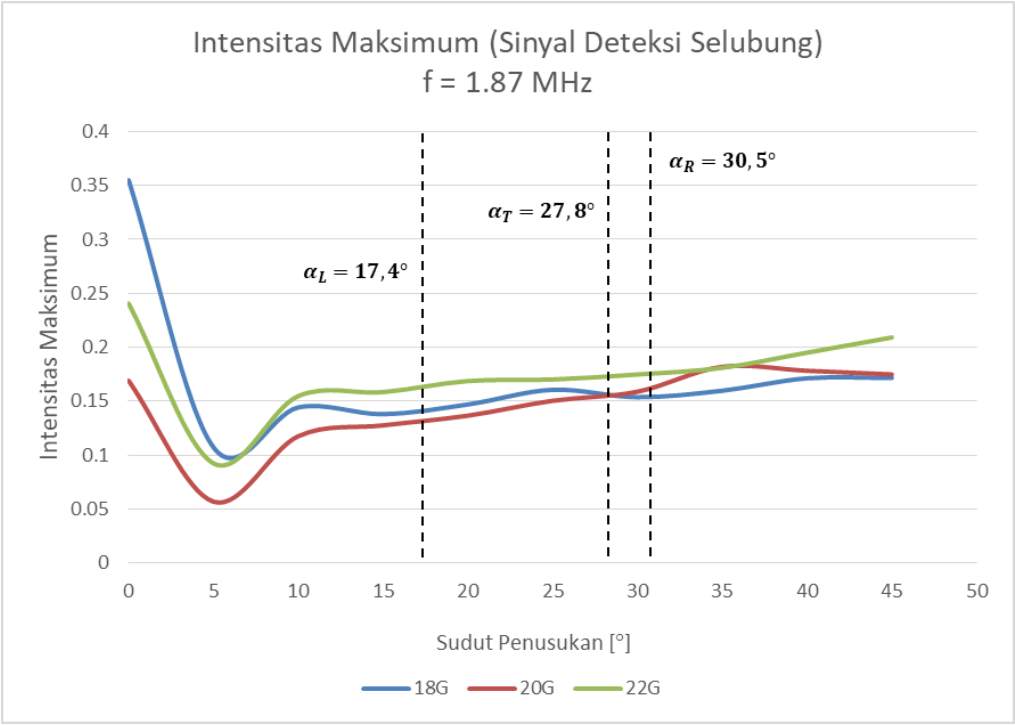
Gambar 3.9 Ilustrasi sinyal deteksi selubung (merah) dari sinyal mentah Frekuensi Radio (FR) (biru) pada sudut penusukan 25°

Distribusi parameter ini diamati perubahannya, terutama di sekitar sudut-sudut kritis α_L, α_T, dan α_R, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.10.

Jarum spinal dengan panjang 90 mm, ukuran 18G, 20G, dan 22G diukur menggunakan sepasang transduser elemen tunggal tipe terendam Sonatest IMR3750, yang terdiri dari 1 transduser pengirim dan 1 transduser penerima. Jarum spinal ditempatkan di bawah permukaan air pada zona medan jauh sekitar 5 cm arah *in-plane* dari muka transduser. Sudut penusukan divariasikan pada rentang 0°–45° dengan resolusi 5°. Efek *beamforming* dikecualikan dalam eksperimen untuk mengamati secara murni efek fenomena gelombang yang terjadi sehingga perbandingan terhadap model hamburan akustik dari tahap pemodelan dan simulasi menjadi setara.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10, pada sudut α = 0°, nilai maksimum intensitas berada pada nilai tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa propagasi balik dominan berasal dari refleksi spekular dari permukaan jarum, yaitu komponen hamburan nonresonansi ketika berkas gelombang ultrasonik menumbuk dan direfleksikan kembali pada arah tegak lurus terhadap permukaan jarum. Kemudian, nilai maksimum intensitas menurun secara drastis pada α = 5°. Kecenderungan ini disebabkan karena propagasi balik yang berasal dari refleksi spekular menjadi tidak sedominan sebelumnya pada α = 0°. Selanjutnya, nilai parameter ini meningkat kembali secara berangsur-angsur hingga sudut α = 45°. Dalam rentang ini, terdapat tiga sudut

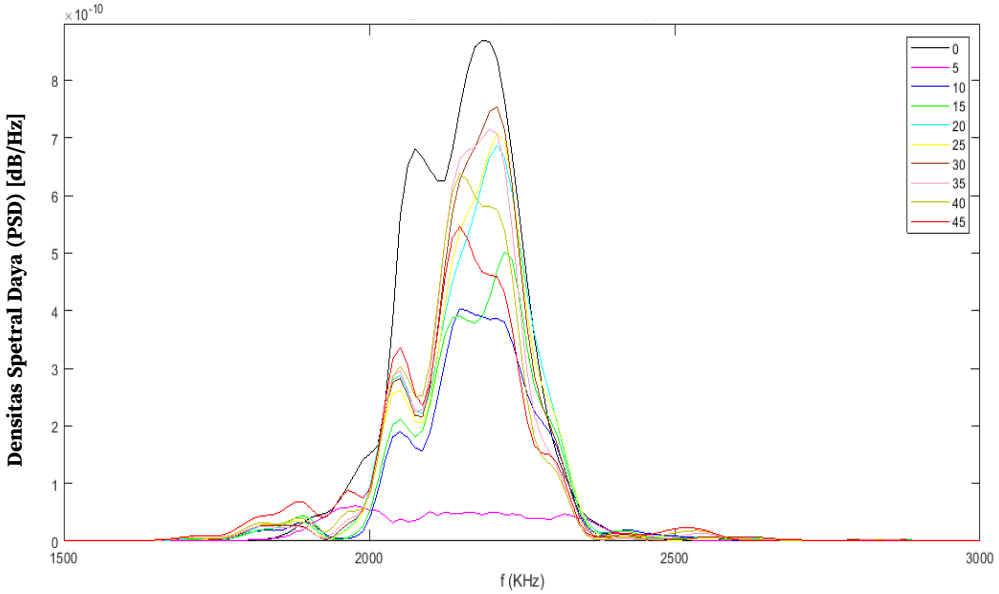
kritis yang meningkatkan probabilitas terjadinya resonansi sehingga menambah jumlah propagasi balik total yang diterima kembali oleh transduser selain dari komponen nonresonansi (refleksi spekular).



Gambar 3.10 Distribusi nilai maksimum intensitas dari parameter sinyal deteksi selubung dalam domain waktu.

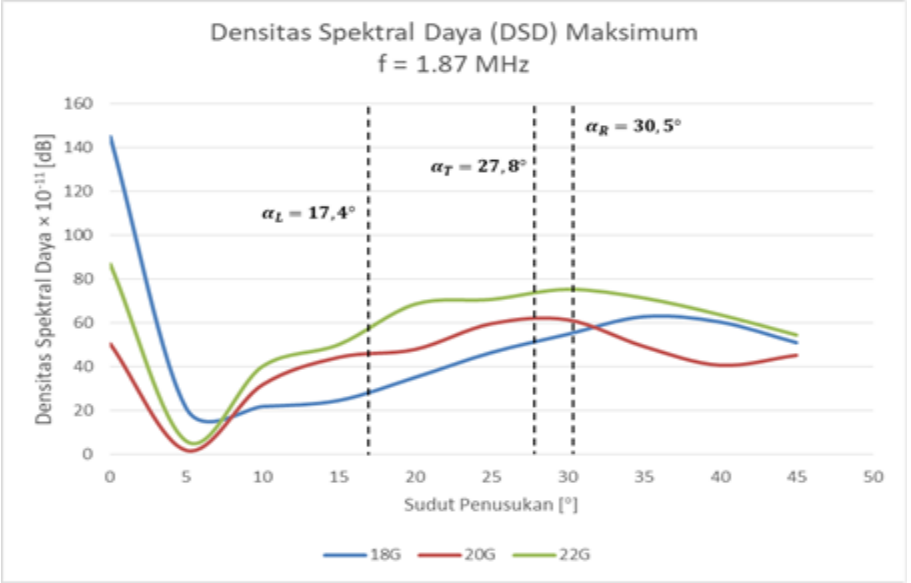
3.5.2 Parameter Sinyal Domain Frekuensi

Parameter sinyal dalam domain frekuensi berupa nilai Densitas Spektral Daya (DSD) maksimum diamati perilakunya terhadap variasi sudut penusukan yang sekaligus merepresentasikan sudut datang berkas gelombang (α), terutama di sekitar sudut-sudut kritis α_L, α_T, dan α_R. Spektrum sinyal pantulan akustik dalam representasi DSD satu sisi untuk jarum ukuran 22G ditunjukkan pada Gambar 3.11



Gambar 3.11 Densitas Spektral Daya (DSD) satu sisi untuk jarum 22 G, variasi sudut penusukan 0°–45°.

Pada Gambar 3.11, di sudut α = 0°, nilai DSD maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa propagasi balik dominan berasal dari refleksi spekular dari permukaan jarum, yaitu komponen hamburan nonresonansi ketika berkas gelombang ultrasonik menumbuk dan direfleksikan kembali pada arah tegak lurus terhadap permukaan jarum. Kemudian, nilai DSD maksimum menurun secara drastis pada α = 5°. Kecenderungan ini disebabkan karena propagasi balik yang berasal dari refleksi spekular menjadi tidak sedominan sebelumnya pada α = 0°. Selanjutnya, nilai parameter ini meningkat kembali secara berangsur-angsur hingga sudut α ≈ 30°. Dalam rentang ini, terdapat tiga sudut kritis yang meningkatkan probabilitas terjadinya resonansi sehingga menambah jumlah propagasi balik total yang diterima kembali oleh transduser selain dari komponen nonresonansi (refleksi spekular). Kemudian setelah α = 30°, kedua parameter ini berangsur-angsur turun karena telah melewati daerah sudut kritis sekaligus meningkatnya jarak muka transduser terhadap permukaan jarum.



Gambar 3.12 Distribusi nilai Densitas Spektral Daya maksimum dalam domain frekuensi.

Jika dibandingkan dengan distribusi nilai maksimum intensitas dari parameter sinyal deteksi selubung pada Gambar 3.12, parameter DSD maksimum dapat merepresentasikan efek hamburan resonansi terhadap propagasi balik total di sekitar sudut-sudut kritis dengan pola dominan peningkatan visibilitas pada rentang di sekitar sudut kritis 15°–30°.

Hasil penelitian ini menghasilkan satu rekomendasi pada perbaikan rekonstruksi rekontruksi citra modus-B dengan pedekatan DSD untuk meningkatkan kontras jarum sehingga lebih optimal.

3.6 Manfaat dan Pengembangan Kedepan

a. Pendekatan multi-fisis untuk meningkatkan fungsionalitas pencitraan ultrasonografi sebagai pemandu penusukan jarum spinal memberikan lebih komprehensif terkait untuk memahami inkonsistensi visibilitas jarum pada citra modus-B ultrasonografi.
b. Dalam kasus penggunaan instrumentasi pencitraan ultrasonografi (USG) untuk kelas *general USG* yang banyak tersedia di rumah sakit di Indonesia, jenis spesifikasi material jarum, strategi sudut penusukan dan pemilihan *center frequency* pada parameter *general USG* dapat menjadi pertimbangan untuk meningkatkan visibilitas jarum pada citra USG.

c. Rancangan sistem evaluator visibilitas jarum dengan metode spektroskopi ultrasonik sinyal modus-A dapat dikembangkan untuk membantu dalam menentukan spesifikasi jarum spinal medis dari berbagai manufaktur yang dapat dipilih agar relatif lebih baik visibilitas dalam citra USG.
d. Untuk mendukung *re-engineering* dari instrumentasi *USG*, pendekatan multi-fisis terkait rekayasa pembangkitan gelombang ultrasonik dengan memperhatikan parameter gelombang antara lain frekuensi, daya, fasa gelombang serta superposisi gelombang yang dibangkitkan dari setiap elemen tranduser USG menjadi basis utama dalam desain optimasi tranduser. Perkembangan tranduser USG yang memungkinkan untuk mengatur arah berkas gelombang ultrasonik (*beam steering*) pada ribuan elemen array tranduser dimulai dari desain tranduser dengan pendekatan *computational simulation*. Pengujian performansi dari desain tranduser secara *computational simulation* adalah tahapan penting sebelum dilakukan fabrikasi tranduser.
e. Dasar keilmuan terkait rekayasa sistem elektronik pendukung USG dan strategi dalam pengolahan sinyal dan citra untuk meningkatkan fungsionalitas dari USG, dalam jangka pendek akan diarahkan untuk pengembangan *add-on system* berupa eksternal pengolahan citra, peningkatan visualisasi dan kemampuan dalam membantu analisis data berdasarkan pendekatan *Artificial Intelligence* (AI) dari low-end USG yang banyak digunakan untuk aplikasi di Obstetri dan Ginekologi (Obgyn) di Indonesia. Salah satu contoh adalah pengembangan *computer aided diagnosis* berbasis citra USG untuk deteksi kelainan pada paru-paru. Pendekatan ini perlu dikembangkan sebagai jawaban kebutuhan pencitraan paru-paru untuk ibu hamil dan balita. Dikarenakan penggunaan gelombang ultrasonik memiliki risiko yang lebih rendah jika dibandingkan dengan penggunaan pencitraan X-ray.
f. Pengalaman dari penelitian terkait pendekatan multi-fisis untuk meningkatkan fungsionalitas pencitraan ultrasonografi sebagai pemandu penusukan jarum spinal, akan membuka jalan lebih cepat dalam pendekatan *re-engineering* dan pengembangan instrumentasi medis berbasis gelombang ultrasonik, misalkan untuk diagnosis kepadatan tulang, evaluasi detak jantung bayi dalam kandungan dengan pendekatan *doopler ultrasonic*, serta untuk pengembangan teknologi ultrasonik dalam bidang *skincare* dan terapi tumor dengan high intensity *focused ultrasound* (HiFU).

4 PENDEKATAN MULTI-FISIS PADA PENINGKATAN FUNGSIONALITAS PENCITRAAN OTAK BERBASIS ELECTROENCEPHALOGRAM

4.1 Pengantar Teknologi Pencitraan Otak

Pencitraan otak (*brain imaging*) adalah proses penggunaan teknik atau metode untuk memvisualisasikan struktur dan fungsi otak. Tujuan utamanya adalah untuk mempelajari dan memahami cara kerja otak, mengidentifikasi perubahan patologis, mendiagnosis gangguan neurologis, dan sebagai *biofeedback* pada rehabilitasi medis.

Fenomena fisik dasar untuk pencitraan aktivitas otak dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *hemodynamic response signals* (HRS) dan *electromagnetic physiological signals* (EPS). HRS adalah proses homeostatis yang mengisi nutrisi yang digunakan pada otak dengan menyesuaikan aliran darah ke area fokus aktivitas, sedangkan EPS adalah terkait dinamika dari aktivitas elektromagnetik pada otak (Lenartowicz & Poldrack, 2010).

Teknologi pencitraan otak yang berbasis HRS adalah *functional magnetic resonance imaging* (fMRI) dan *functional near-infrared spectroscopy* (fNIRS). Secara teknologi, fMRI adalah bagian dari strategi *protocol imaging* yang digunakan pada *magnetic resonance imaging* (MRI). MRI terutama digunakan untuk menghasilkan kontras citra anatomi tubuh beresolusi tinggi khususnya pada jaringan lunak, antara lain otak. Ini memberikan informasi struktural terperinci tentang jaringan dan organ yang dicitrakan. Sedangkan pada fMRI, kontras citra adalah fungsi dari *blood oxygen level-dependent* (BOLD). BOLD akan sangat tergantung dari aktivitas neuron-neuron aktif dalam otak. fMRI mempunyai resolusi spasial yang sangat baik dan resolusi waktunya dalam orde detik dari satu pemindaian otak.

fNIRS adalah sebuah metode pencitraan otak non-invasif yang digunakan untuk memonitor aktivitas otak manusia. Metode ini mengukur perubahan oksigenasi darah di dalam otak sebagai indikator aktivitas saraf. Proses fNIRS melibatkan penggunaan sumber cahaya inframerah dekat (*Near-Infrared-NIR*) dan detektor yang ditempatkan di sekitar kepala untuk mendeteksi perubahan oksigenasi darah dalam jaringan otak. fNIRS mengukur konsentrasi hemoglobin oksigen (HbO) dan hemoglobin deoksigen

(HbR) dalam darah, yang memberikan informasi tentang aktivitas saraf di otak. Ketika suatu area otak aktif, permintaan oksigen meningkat, yang menyebabkan peningkatan konsentrasi HbO dan penurunan konsentrasi HbR. Dengan memonitor perubahan ini, fNIRS dapat memberikan gambaran tentang aktivitas otak yang terkait dengan fungsi kognitif, persepsi sensorik, dan respons emosi.

Teknologi pencitraan otak yang berbasis EPS adalah *magnetoencephalogram* (MEG) and *electroencephalogram* (EEG). MEG adalah metode pencitraan otak berbasis fisiologis elektromagnetik yang digunakan untuk mengukur medan magnet yang sangat lemah yang dihasilkan oleh arus listrik yang terjadi secara alami di otak. Medan magnet lemah yang dihasilkan dari aktivitas otak diukur dengan *superconducting quantum interference devices* (SQUIDs) (Suprijanto et al., 2021).

EEG adalah teknik pencitraan otak berbasis EPS yang digunakan untuk mengukur sinyal bio-listrik yang dilakukan ke kulit kepala yang dihasilkan langsung oleh aktivitas saraf. Elektroda EEG mengukur sinyal bio-listrik dari kulit kepala.

Jika dibandingkan dengan fMRI, fNIR, dan MEG, EEG menjadi salah satu teknologi untuk pencitraan kognitif otak yang masih terus dikembangkan sampai dengan saat ini, karena beberapa faktor antara lain, pengukuran dapat dilakukan secara non-invasif, resolusi temporal yang paling baik, portabilitas dan juga relatif paling rendah biaya investasi untuk sistem instrumentasinya.

4.2 Sistem Instrumentasi EEG

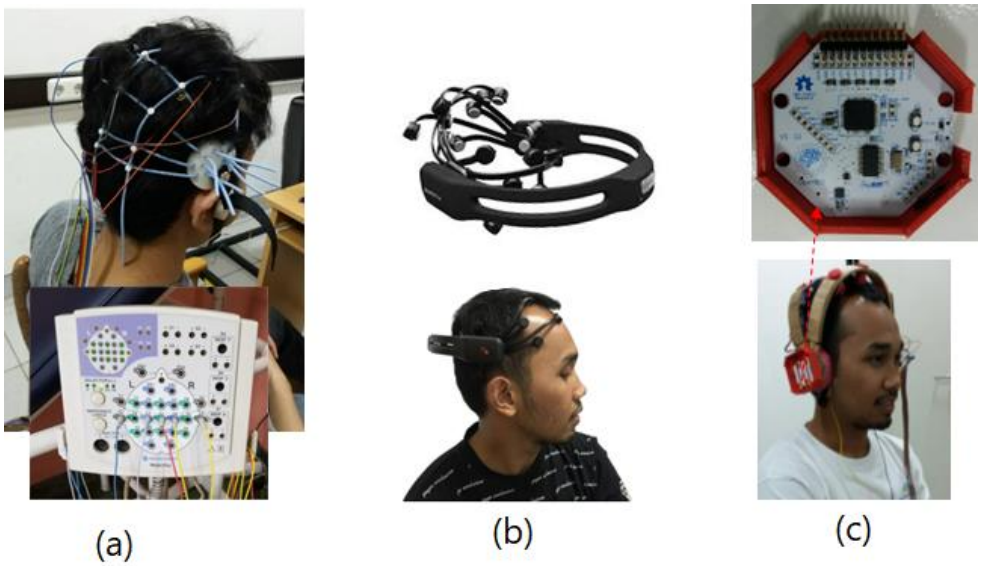
Electroencephalogram (EEG) adalah metode pengukuran sinyal listrik dari aktivitas neuron pada otak dengan sensor elektroda yang diletakkan pada permukaan kepala. Penemuan EEG pada tahun 1929 oleh psikiater Jerman Hans Berger merupakan terobosan sejarah yang menyediakan alat diagnostik neurologis dan psikiatri baru pada saat itu.

Komponen-komponen dasar untuk pengukuran EEG adalah elektroda yang diletakkan pada permukaan kepala, gel konduktif untuk meningkatkan konduktivitas antara kulit kepala dengan elektroda, sistem pengkondisi sinyal, dengan subsistem utama adalah *low noise bio-amplifier* dan filter aktif,

konversi sinyal dari analog ke digital dan sistem akusisi data serta penganalisis sinyal secara digital.

Saat ini, sistem instrumentasi EEG untuk keperluan medis masih menggunakan standar universal 10-20, dan kemudian adalah menentukan susunan elektroda dan konfigurasi yang digunakan untuk merekam (*montages)*, yaitu bipolar atau monopolar.

Untuk meminimalkan noise, elektroda referensi terpisah sering dipilih untuk setiap sisi kepala, misalkan pada telinga ipsilateral. *Montages* bipolar dan monopolar berisi informasi dasar yang sama yang dapat diubah menjadi format mana pun dengan metode subtraksi sederhana selama semua elektroda, termasuk referensi, disertakan dalam kedua montase dan ditautkan ke satu referensi umum (Khandpur, 2003).



Gambar 4.1 (a). EEG Klinik, (b). Komersial Wereable EEG dan (c) *open system wereable* EEG.

Secara umum, elektrode dihubungkan ke sistem instrumentasi EEG klinik (lihat Gambar 4.1-A) dengan kabel dan komunikasi dengan komputer juga dilakukan dengan menggunakan kabel. Untuk mendapatkan rasio dari sinyal terhadap noise yang tinggi, penggunaan elektroda dengan lapis emas menjadi salah satu standar dalam keperluan klinik. Untuk menurunkan nilai impedansi antara elektroda dan permukaan kepala, sekitar 10 kΩ, diperlukan usaha untuk membersihkan kulit kering pada permukaan kepala dan penggunaan gel konduktif.

Instrumentasi EEG klinik pada saat ini merekam sinyal multi-kanal dalam bentuk digital. Rekam medik dalam EEG klinik akan disimpan dalam format tertentu yang terdiri dari informasi pasien yang direkam, penandaan dari posisi elektroda dari setiap rekaman sinyal EEG, anotasi perlakukan khusus selama perekaman EEG, misalkan kapan pasien diminta tutup mata dan waktu saat diberikan rangsangan cahaya berkedip.

Untuk mendukung pemanfaatan sinyal EEG pada aplikasi bidang nonmedis, mulai banyak penelitian perangkat EEG yang *wearable,* nirkabel, dan memungkinkan adanya perekaman sinyal EEG dengan subjek yang tidak diam (Casson, 2019), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1-B. Pada awalnya Perangkat EEG yang *wearable* dan nirkabel dikembangkan oleh vendor secara spesifik, sehingga sistem tersebut relatif mahal dan sistem hanya dapat bekerja dengan komponen dan perangkat lunak yang dikembangkan oleh industri pembuat tersebut. Kemudian dalam beberapa tahun terakhir, mulai muncul industri yang menawarkan yang bersifat desain sistem terbuka, mulai dari *board* utama yang digunakan sampai dengan perangkat lunak yang menempel pada *board* utama tersebut. Pada *board* utama tersebut pun terdapat kemampuan *programmble amplifier*, *filter*, *analog to digital converter* dan komunikasi data secara nirkabel. Kondisi tersebut membuka peluang untuk pengembangan *EEG wearable headset* sesuai dengan kebutuhan dan spesifikasi yang diperlukan. Contoh pengembangan *open system wereable* EEG di laboratorium instrumentasi medik, KK Instrumentasi dan Kontrol, ITB(Suprijanto et al., 2018) ditunjukkan pada Gambar 4.1-C.

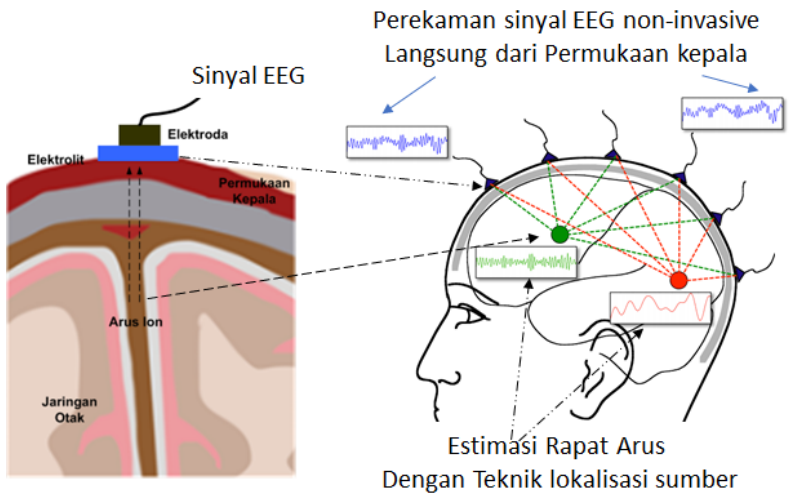
4.3 Quantitative EEG

Dewasa ini bidang elektrofisiologi otak telah mengalami kemajuan yang signifikan. Sinyal EEG dapat direkam langsung dengan metode non-invasif dilakukan pada permukaan kepala. Sumber dari sinyal EEG adalah dari sinkronisasi aktivitas potensial aksi dari sel neuron yang dipropagasikan pada permukaan kepala, di mana aliran ion terjadi melalui jaringan lunak, batok kepala dan beberapa lapisan lain pada kepala. Lapisan antarmuka antara elektrolit dan elektroda dengan permukaan kepala, akan mengkonversi arus ion menjadi arus listrik karena mekanisme reaksi oksidasi dan reduksi. Tegangan diperoleh dari dua titik pada daerah lobus tertentu relatif terhadap titik referensi. Daerah lobus yang digunakan pada sistem 10-20 dikenal daerah

Frontal (F), Central (C), Temporal (T), Parietal (P) dan Occipital (O)(Popa et al., 2020). Sebagai contoh untuk T4 adalah titik temporal pada bagian belahan permukaan kepala kalan, sedangkan T3 untuk bagian kiri. Untuk lokasi elektroda pada bagian tengah kepala, dikenal dengan titik Cz.

Sejalan dengan perkembangan teknologi digital, penggunaan komputer untuk analisis sinyal EEG mulai dikenal di tahun 1997. Aplikasi dari pengolahan sinyal EEG memberikan dampak antara lain pemilihan fitur signifikan yang mudah untuk akuisisi EEG yang benar, kemungkinan menganalisis spesifik fitur dari sinyal EEG menjadi terus berkembang sehingga berkembangan bidang penelitian quantifikasi EEG (QEEG) (Kanda et al., 2009). (Popa et al., 2020). Teknik QEEG adalah metode untuk menganalisis pola sinyal EEG yang berkaitan dengan informasi diagnostik, penurunan kemampuan kognitif (*cognitive deficits*) atau berkorelasi dengan pengaruh stimulus eksternal. Ekstraksi pola sinyal EEG yang diproses dengan QEEG juga dimanfaatkan sebagai *neurofeedback* untuk proses pada rehabilitasi medis.

Metode yang dijadikan dasar pada QEEG pada saat ini adalah berdasarkan pengolahan sinyal dari perekaman langsung EEG dari permukaan kepala dan estimasi densitas arus dengan metode lokalisasi sumber (lihat Gambar 4.2). Sejalan dengan kemampuan komputasi yang baik, metode dari lokalisasi sumber berkembang menjadi *low resolution 3D tomography* EEG(Lenartowicz & Poldrack, 2010), menjadi awal pengembangan pencitraan otak berbasis EEG.



Gambar 4.2 Metode Perakaman EEG.

4.4 QEEG Berbasis Perekaman Langsung

Berdasarkan perekaman langsung dari sinyal EEG, berkembangan pembagian tipe dari sinyal EEG untuk informasi diagnostik dan *neurofeedback*. Dua tipe dari sinyal EEG adalah gelombang otak(*brain wave*) dan *evoke respone potensial* (ERP)(Khandpur, 2003).

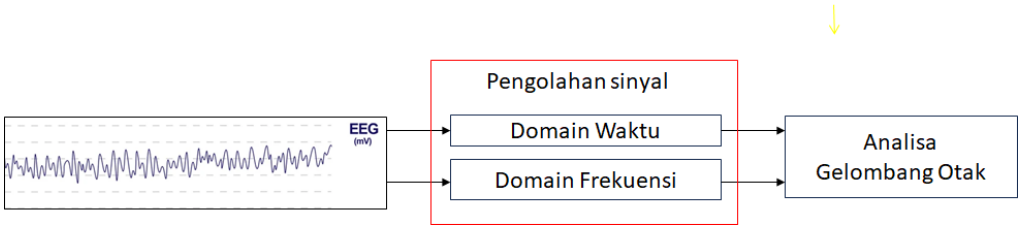
Gelombang otak adalah merepresentasikan pembangkitan sinyal EEG terkait spesifik aktivitas sinkronisasi dan de-sinkronisasi dari kelompok neuron piramidal yang terekam pada area permukaan otak di mana elektroda diletakkan. Pola aktivitas gelombang otak dapat dikenali dari amplitudo dan frekuensinya. Frekuensi menunjukkan seberapa cepat gelombang berosilasi yang diukur dengan jumlah gelombang per detik (Hz), sedangkan amplitudo mewakili kekuatan gelombang ini diukur dengan mikrovolt (μV).

Komponen frekuensi dari gelombang otak yang berbeda dapat dikategorikan menjadi sebagai berikut (Lavelle et al., 2019).

a. Gelombang delta adalah sinyal EEG dengan komponen frekuensi kurang dari 4 Hz. Gelombang ini diamati pada sinyal EEG saat seseorang dalam keadaan tidur dalam.
b. Gelombang theta adalah sinyal EEG dengan komponen frekuensi 4–8 Hz. Gelombang ini sering kali dikaitkan kondisi perekaman pada saat seseorang mengantuk atau tidur ringan.
c. Gelombang alfa adalah sinyal EEG dengan komponen frekuensi (8–13 Hz). Gelombang ini dapat terekam pada saat perekaman, subjek dalam kondisi seseorang rileks, tetapi tetap terjaga.
d. Gelombang beta adalah sinyal EEG dengan komponen frekuensi (13–30 Hz). Gelombang ini dapat diamati pada saat subjek direkam dalam keadaan waspada dan terjaga.
e. Gelombang gamma adalah sinyal EEG dengan komponen frekuensi 30–100 Hz. Gelombang gamma diamati ketika seseorang pada saat seseorang mengalami aktivitas mental yang sangat tinggi.

Perekaman pola sinyal EEG untuk evaluasi aktivitas sinkronisasi dan de-sinkronisasi yang direkam oleh elektroda kulit kepala di atas korteks sensorimotor selama aktivitas saraf terjaga, dikenal dengan gelombang mu. Frekuensi *bandwitdh* dari gelombang mu antara 8 dan 13 Hz. Gelombang mu adalah salah satu gelombang otak sering dimanfaatkan sebagai informasi

neurofeedback terkait evaluasi proses motorik pada rehabilitas medis (Pfurtscheller & Neuper, 1994).



Gambar 4.3 Pengolahan sinyal EEG untuk perekaman langsung.

Untuk analisis gelombang otak (lihat Gambar 4.3), pengolahan sinyal EEG dapat dilakukan dalam domain waktu, dengan menggunakan metode antara lain *digital bandpass filter* dan *discrete wavelet transformation* (DWT). Objektif dari analisis EEG dalam domain waktu adalah mampu untuk membuang *low* frekuensi komponen (< 0.4 Hz) karena gerakan dan bernapas, serta interferensi dari jala-jala listrik (50 Hz). Karakteristik dari filter dalam domain waktu harus menjamin minimal *overlap* antara rentang lebar pita frekuensi pada setiap jenis gelombang otak (Masitoh et al., 2021).

Dalam domian frekuensi, pendekatan metode estimasi kerapatan spektral daya berbasis *fast fourier transform* (FFT) yang dimodifikasi untuk durasi sinyal EEG yang terbatas. Dalam beberapa kasus, pendekatan analisis secara simultan dalam domain waktu-frekuensi dengan *sort time* FFT juga digunakan untuk evaluasi gelombang otak. Untuk mendapatkan resolusi frekuensi dan estimasi dari amplitudo densitas spektral daya (DSD) EEG yang optimal, penentuan parameter terkait durasi sample EEG yang dianalisis, parameter resolusi frekuensi dan jenis *windows* yang digunakan (Hu & Zhang, 2019).

Tipe analisis sinyal EEG berbasis ERP (*event-related potential*) adalah untuk mengukur perubahan amplitudo sinyal EEG yang mengikuti (atau mendahului) timbulnya rangsangan visual, pendengaran, atau sensorik tertentu lainnya, serta isyarat yang menandakan persiapan motorik, eksekusi motorik. Dalam kebutuhan klinik, sering kali diperlukan informasi tambahan untuk melakukan sinkronisasi antara rangsangan yang diberikan dan perekaman EEG yang dilakukan. Sinkronisasi antara lain dengan menggunakan perekaman video dari subjek selama direkam dengan EEG atau memberikan anotasi tertentu pada saat rangsangan diberikan. Sering kali

untuk mendapatkan ERP dengan SNR yang baik harus dilakukan pengukuran berulang dengan pemberian stimulus yang sama.

Pola ERP diperoleh dengan mengekstraksi dan kemudian merata-ratakan beberapa segmen temporal dari EEG yang direkam secara repetitif sesuai dengan jenis stimulus diinginkan. Amplitudo, latensi, dan topografi dari defleksi positif dan negatif yang dihasilkan diambil untuk mengindeks operasi mental yang mendasarinya. ERP menjelaskan proses kognisi dalam persepsi, perhatian, emosi, tindakan, memori (Hu & Zhang, 2019).

4.4 QEEG Berbasis Estimasi Densitas Arus dengan Lokalisasi Sumber

Permasalahan dari pendekatan QEEG berbasis perekaman langsung adalah *cross-talk* antara area bagian otak pada saat melakukan perekaman pada permukaan kepala di mana elektroda diletakkan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.4. Dari permasalahan ini berkembangkan pendekatan QEEG berbasis estimasi densitas arus dengan lokalisasi sumber (Michel et al., 2004; Pascual-Marqui, 2002).

Ide utama lokalisasi dan rekonstruksi sumber adalah berdasarkan estimasi densitas arus dari kortikal primer selama perekaman EEG yang diberikan di seluruh permukaan kepala. Pendekatan ini adalah salah satu usaha untuk meningkatan kemampuan resolusi spasial dari penggunaan EEG untuk pencitraan otak.

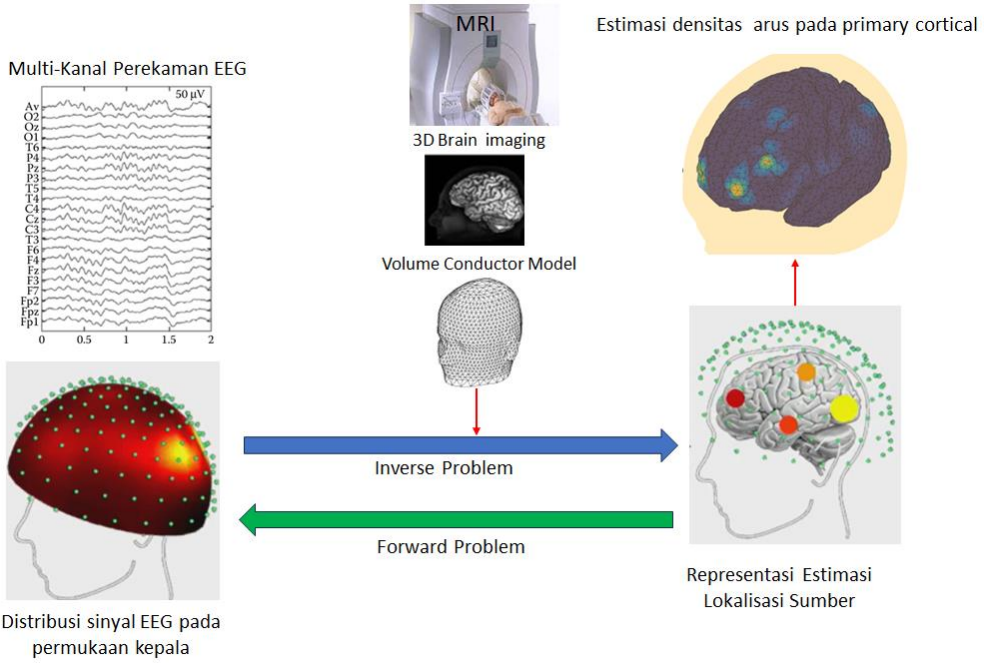
Tahapan untuk melakukan estimasi densitas arus berdasarkan perekaman EEG dengan multi-kanal yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Distribusi perbedaan potensial listrik antara elektroda (Φ) yang ditempatkan pada posisi kulit kepala yang berbeda disebabkan oleh perambatan densitas arus (J) yang dihasilkan dari *synchronized post-synaptic potentials* dari *pyramidal neurons*. Model dasar untuk masalah ***Forward problem*** adalah

$$\Phi = KJ + n \tag{4.1}$$

Secara umum, parameter Φ adalah perekaman EEG secara multi-kanal. Persyaratan minimum untuk mendapatkan resolusi spasial dari estimasi lokalisasi dan rekonstruksi sumber yang representatif adalah dengan sistem 10-20 (21 elektroda). Untuk meningkatan resolusi spasial dari estimasi

lokalisasi dan rekonstruksi sumber, berkembang perangkat EEG digital yang mampu untuk melakukan pengukuran dengan sistem 10-10, yang terdiri atas 63 elektroda. Prosedur perekaman EEG untuk meminimal noise dan artifak (n) harus menjadi perhatian utama untuk memaksimalkan hasil dari rekonstruksi sumber.

Parameter matriks K ini harus mempertimbangan permasalahan anatomi informasi dari otak terkait ketebalan tulang tengkorak dan prediksi properti dari lokal konduktivitas. Aspek lain adalah terkait bentuk kepala yang tidak berbentuk bulat sehingga jarak elektroda ke pusat kepala bervariasi. matriks K juga harus mengakomodasi koordinat posisi elektroda pada bagian kepala untuk tiap individu. Pada saat ini untuk menentukan K adalah dengan memanfaatkan pencitraan 3D otak dengan *magnetic resonance imaging* (MRI) untuk mendapatkan model K secara spesifik (Grech et al., 2008; Masitoh et al., 2023).



Gambar 4.4 Tahapan pemrosesan QEEG berbasis estimasi densitas arus dengan lokalisasi sumber sebagai basis pencitraan otak berbasis EEG.

Estimasi dari densitas arus dari sumber (*J*) akan sangat terkait dari parameter K dan reduksi *noise* pada perekaman EEG (Φ). Untuk reduksi *noise* dan menentukan rentang bandwidth EEG yang akan dijadikan dasar estimasi

densitas arus, diperlukan desain filter temporal yang optimal untuk menghindari terjadinya *overlap* spektrum hasil filtering sinyal EEG dengan informasi sinyal yang tidak diinginkan.

Untuk mendeteksi dan mengkoreksi artifak pada Φ yang disebabkan oleh kedipan dan pergerakkan mata serta *pulse* dari jantung, pendekatan *independent component analysis* (ICA) digunakan sebagai *spatial filtering*. *Output* dari pemrosesan Φ dengan ICA adalah membuang informasi Φ dari posisi elektroda dengan *signal to noise rasio* (SNR) yang rendah. Kemudian untuk menentukan distribusi pontesial antara posisi elektroda, digunakan pendekatan interpolasi 3D. Penggunaan *spatial filtering* juga digunakan untuk mereduksi terjadinya *cross-talk* pada Φ.

Untuk estimasi densitas arus (J) pada spesifik lokasi dari sumber pada cortical, diperlukan tahapan ***inverse problem***. Model dasar dari tahapan ini adalah

$$\mathrm{J} = (\Phi - n)K^{-1} \tag{4.2}$$

Untuk mendapatkan solusi dari J, salah satu pendekatan untuk solusi *inverse problem* dengan *Low-Resolution Electromagnetic 3D Tomography* (LORETA) pertama kali dikenalkan oleh Pascual-Marqui di tahun 1994. LORETA dilakukan dengan mencari invers dari matriks K melalui minimasi error $\|\Phi - KJ\|^2$ untuk setiap nilai densitas arus J.

Asumsi yang digunakan dalam estimasi respons dari neuron yang berdekatan cenderung untuk melakukan sinkronisasi setelah terjadinya desinkronisasi ketika terjadi stimulus motorik pada otak. Dapat dikatakan bahwa untuk seluruh J harus memiliki nilai yang mirip dengan rata-rata densitas arus di sekitarnya. Secara matematis, hal tersebut dirumuskan sebagai operator *Laplacian*. Operator *Laplacian* akan mencari solusi dengan memaksimalkan nilai *smoothness* dari nilai J meskipun hal tersebut mengorbankan resolusi spasial dari citra (Pascual-Marqui, 2002).

$$J = \min_{J} \|\Phi - KJ\|^2 + \alpha J^T Q J \tag{4.3}$$

dengan α adalah parameter regularisasi Tikhonov untuk *inverse problem*, dan Q adalah matriks bobot definit positif. Permasalahan utama dalam hal ini adalah solusi yang tidak unik (*ill-posed solution*), yang mana terdapat solusi yang tidak unik.

Salah satu open model untuk Matrik K yang banyak dijadikan untuk penelitian adalah model kepala dari hasil pemindaian MRI dari Montreal Neurological Institute (MNI), yaitu templat model MNI 152 yang memiliki 6239 voksel dengan ukuran voksel 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 5 mm. Model kepala MNI disegmentasi menjadi 3 kompartemen, yaitu korteks otak (*cerebral cortex*), tulang, dan kulit. Metode diskritisasi yang digunakan adalah *boundary element method* (BEM) dengan membagi setiap segmen menjadi mesh berbentuk segitiga.

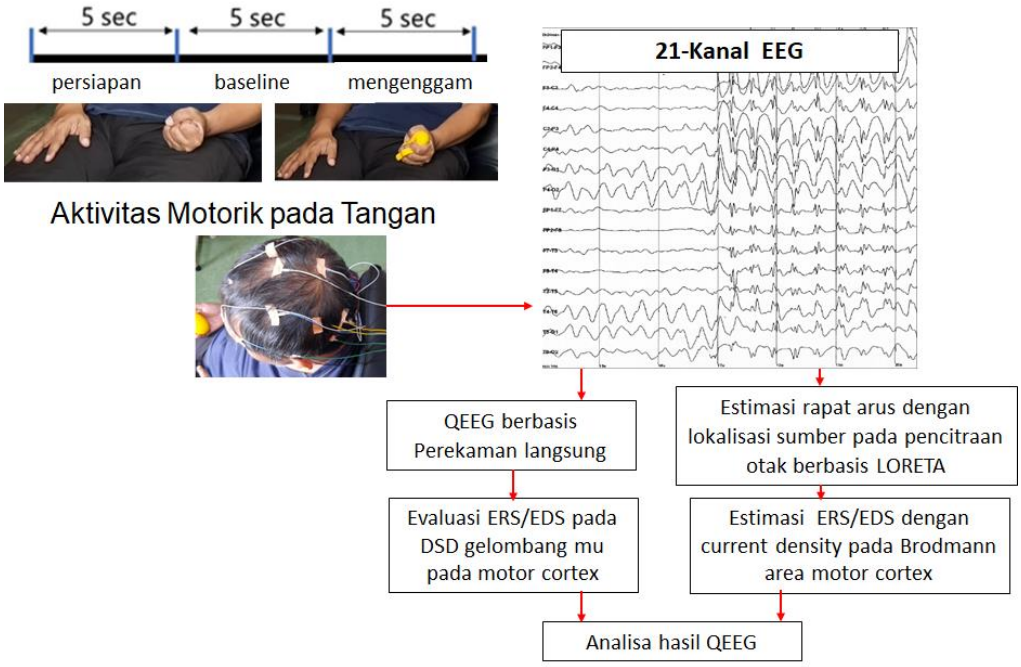
4.5 Studi Kasus: QEEG untuk *Neurofeedback* pada Aktivitas Motorik Repetitif pada Tangan

Untuk studi kasus, sinyal EEG dari subjek laki-laki sehat direkam menggunakan 21 elektroda kulit kepala (referensi pada A1 dan A2) yang disusun berdasarkan sistem penempatan elektroda EEG 10-20. Clinical EEG Nihon-Kohden Neurofax 9100A digunakan sebagai unit akuisisi sinyal EEG. Selama perekaman EEG, dalam kondisi *baseline* subjek dalam kondisi rileks dan diikuti dengan gerakan menggenggam dan membuka tangan secara repetitif. *Baseline* dilakukan pada awal percobaan dan di antara sesi (antara sesi kiri dan kanan dan antara skenario genggaman tangan) (Masitoh et al., 2023). Skenario aktivitas motorik repetitif pada tangan adalah kegiatan menggenggam dengan bola rehabilitasi selama 5 detik dengan mata tertutup, dilakukan dengan tangan kanan dan kiri secara bergantian.

Konfigurasi eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pengolahan sinyal EEG yang dilakukan pada QEEG berbasis perekaman langsung terdiri dari ekstraksi sinyal EEG pada rentang frekuensi gelombang dengan transformasi wavelet dalam domain waktu dan analisis respons dari akvitas motorik pada tangan dengan densitas spektral daya (DSD) untuk skenario A dan B. Evaluasi dilakukan pada perekaman EEG pada kanal C3 dan C4 pada daerah lobus motor cortex.

Untuk QEEG berbasis estimasi densitas arus dengan lokalisasi sumber, dilakukan tahapan permrosesan sinyal sebagai berikut. Dari hasil perekaman 21 kanal perekaman sinyal EEG, denosing dilakukan pada rentang frekuensi gelombang-mu dengan DWT dalam domain waktu. Filter spasial berbasis ICA digunakan untuk melakukan dekomposisi 21 komponen (**IC**). Kemudian dilakukan pemilihan komponen **IC** yang merepresentasikan aktivitas pada

motor cortex. Dasar pemilihan komponen **IC** adalah terkait aspek *event-related synchronization* (EDS) dan *event-related desynchronization* (ERD). Berdasarkan komponen **IC** yang dipilih, lokalisasi sumber dilakukan dengan metode LORETA. Estimasi dari densitas arus dilakukan pada daerah *active Brodmann* area (BA) terkait aktivitas motorik pada tangan.

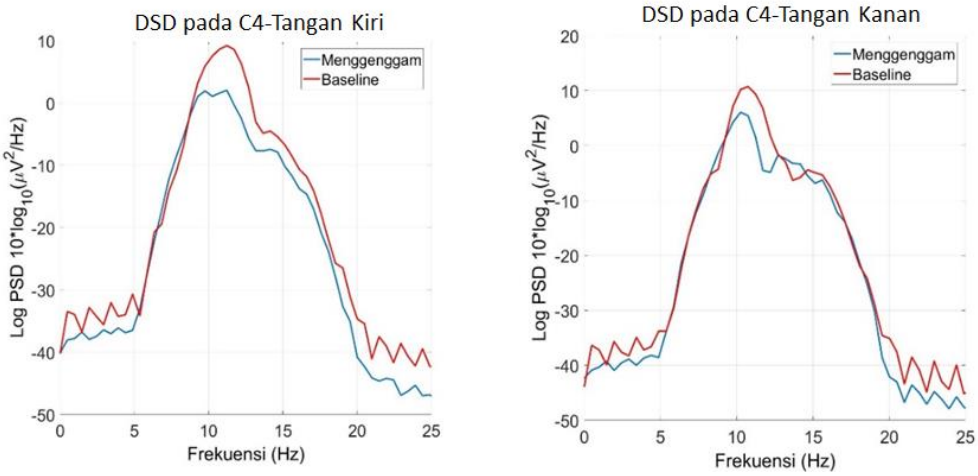


Gambar 4.5 Konfugurasi eksperimen untuk pecitraan otak berbasis EEG untuk analisis aktivitas motorik pada tangan.

4.6 Evaluasi QEEG Berbasis Perekaman Langsung

Untuk aktivitas tangan kanan, DSD dari signal EEG yang direkam pada posisi elektroda C3 (lobus motor cortex pada hemisphere kiri) dan elektoda C4 (lobus motor cortex pada hemisphere kanan), untuk evaluasi pola aktivitas otak kontralateral selama aktivitas motorik.

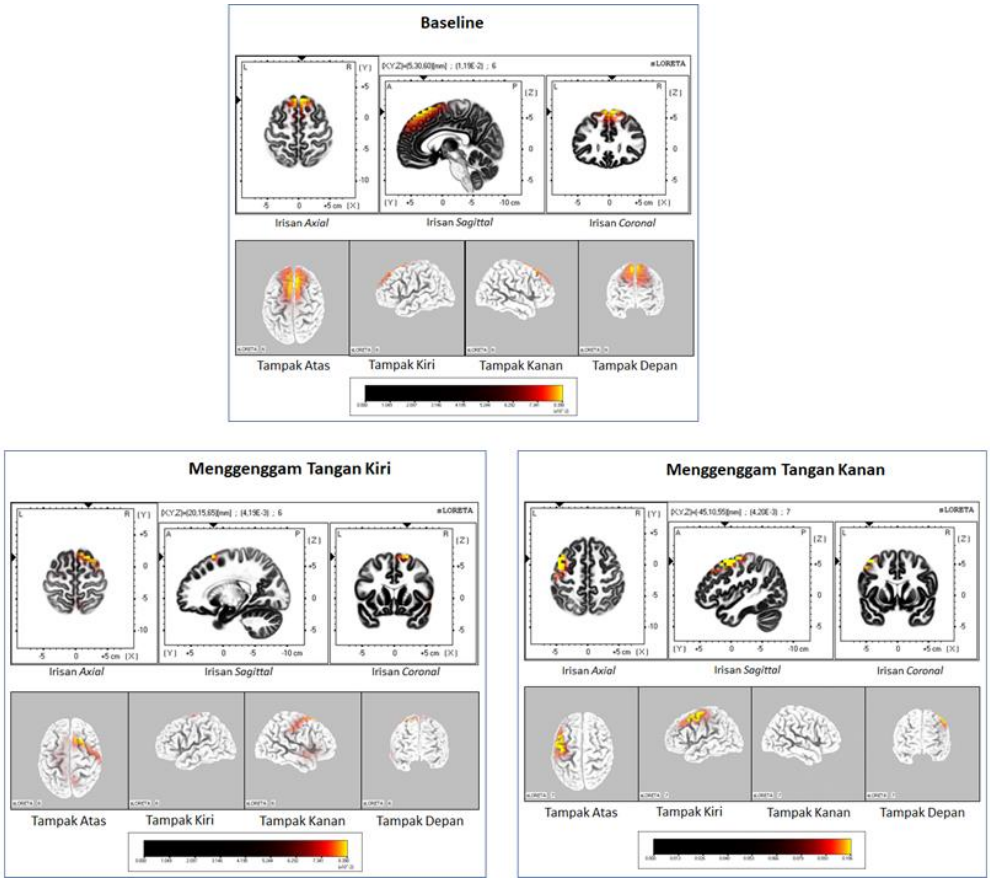
Distribusi dari DSD terhadap frekuensi untuk gelombang-mu pada aktivitas tangan mengengam ditunjukkan pada Gambar 4.6. Hasil ini menunjukkan fenomena ERD pada gelombang mu selama aktivitas motorik saat dilakukan dengan beban bola rehabilitasi, yang dapat dikuantifikasi dari tren penurunan daya dari gelombang-mu pada saat aktivitas menggenggam.



Gambar 4.6 Densitas Spektral Daya (DSD) untuk gelombang-mu berdasarkan perekaman langsung. Tren penurunan DSD dari gelombang-mu terjadi pada saat aktivitas menggenggam.

4.7 Evaluasi QEEG Berbasis Estimasi Densitas Arus dengan Lokalisasi Sumber

Analisis lokalisasi sumber dilakukan pada *baseline* data EEG untuk dapat membandingkan aktivasi otak sebelum dan selama aktivitas motorik. Hasil analisis lokalisasi sumber sinyal dengan pencitraan otak berbasis EEG yang diperoleh dari eksperimen disajikan dalam Gambar 4.7. Selama *baseline*, aktivasi yang lebih tinggi terjadi secara bilateral di sekitar korteks frontal dan terutama di sekitar *gyrus frontal superior*. Hasil dari aktivitas motorik tangan menunjukkan aktivasi otak kontralateral selama performa motorik. Dibandingkan dengan hasil analisis DSD pada gelombang-mu di C3 dan C4, hasil lokalisasi sumber memberikan lebih banyak informasi tentang distribusi spasial aktivitas otak selama kinerja motorik, yang mengikuti teori aktivasi otak kontralateral yang tidak ditampilkan dengan jelas oleh hasil DSD dari pengukuran secara langsung. Hal ini menunjukkan bahwa hasil lokalisasi aktivitas korteks motorik selama kinerja motorik lebih baik untuk memprediksi distribusi spasial aktivitas otak.

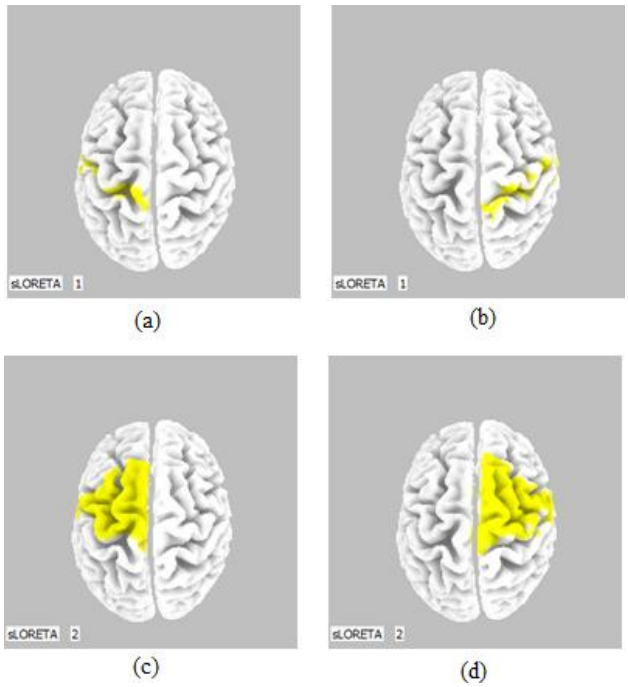


Gambar 4.7 Lokalisasi sumber dari hasil LORETA, untuk kondisi baseline dan tangan mengengam – tangan. Area kuning dan merah yang mewakili aktivitas otak yang lebih tinggi dalam model korteks serebral adalah menggambarkan dominasi distribusi dipol pada saat kinerja relatif terhadap bagian otak lainnya. Hasil dari aktivitas motorik tangan menunjukkan aktivasi otak kontralateral selama aktivitas motorik.

4.8 Estimasi Densitas Arus Sumber dari Area Brodmann 4 dan 6

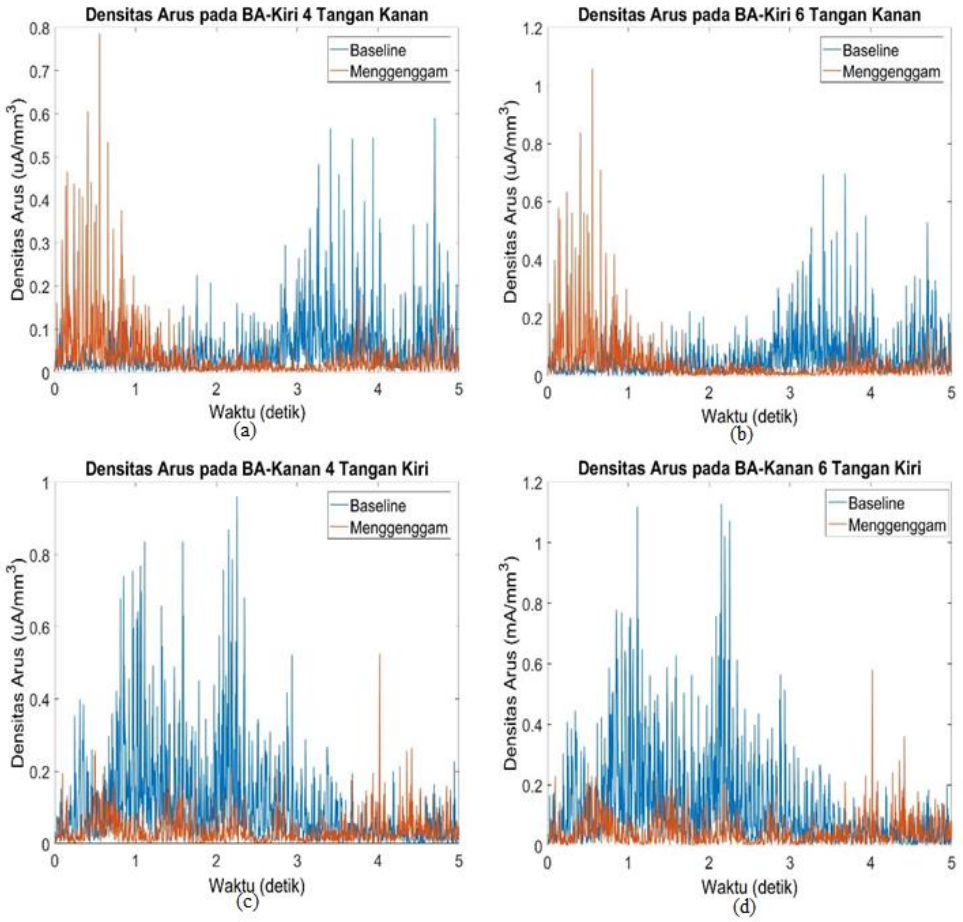
Lobus central yang secara spesifik berhubungan dengan gerakan motorik diklasifikasikan pada peta Brodmann berada pada Area Brodmann 4 (BA 4) sebagai korteks motor primer (M1) yang berhubungan erat dengan gerakan otot serta Area Brodmann 6 (BA 6) sebagai daerah pramotor (PMA) dan area motor tambahan (SMA) yang berhubungan erat dengan perencanaan atau persiapan gerakan otot termasuk gerakan yang hanya dibayangkan. Motor korteks bekerja secara kontralateral yang berarti bagian kanan tubuh dikendalikan oleh motor korteks pada *hemisphere* kiri dan sebaliknya (Masitoh et al., 2023).

LORETA menyediakan fitur untuk menghitung densitas arus pada *Region of Interest* (RoI) tertentu, termasuk di dalamnya bisa dilakukan untuk Area Brodmann tertentu. Visualisasi BA 4 dan BA 6 ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Visualisasi aktivitas otak terkait motorik pada tangan (a) BA 4 kiri, (b) BA 4 kanan, (c) BA 6 kiri, dan (d) BA 6 kanan. Area kuning mewakili aktivitas otak yang lebih tinggi dibandingkan daerah lain.

Estimasi densitas arus ditentukan dari area pada model korteks otak. BA 4 dan BA 6 di belahan kiri dipilih untuk analisis kerapatan arus untuk gerakan tangan kanan, sedangkan BA 4 dan BA 6 di belahan kanan dipilih untuk gerakan tangan kiri. Contoh hasil estimasi rapat arus ditunjukkan pada Gambar 4.9. Hasil ini dapat mengonfirmasi penurunan aktivasi gelombang-mu selama pergerakan dibandingkan dengan *baseline*, yang mungkin telah ditunjukkan dalam bentuk tren penurunan hasil DSD di C3 dan C4. Penurunan kerapatan arus rata-rata ini adalah terkait dengan desinkronisasi gelombang-mu yang terjadi di korteks motorik selama pergerakan. Hasil tersebut juga kuantifikasi dari aktivasi otak kontralateral selama performa motorik.



Gambar 4.9 Densitas arus saat baseline dan menggenggam– tangan kanan (a) BA 4 kiri dan (b) BA 6 kiri, a) BA 4 kanan dan (b) BA 6 kanan.

Analisis lebih lanjut densitas arus rata-rata ditabulasikan pada Tabel 4.1. Pada Tabel 4.1 menunjukkan penurunan densitas arus rata-rata yang konsisten selama kondisi genggaman tangan dari kondisi *baseline*, di B.A. 4 dan 6. Tes peringkat bertanda Wilcoxon yang dilakukan pada data melaporkan perubahan yang signifikan dalam kerapatan arus selama menggenggam dibandingkan dengan *baseline* (Z = -2,521, p = 0,012). Penurunan kerapatan arus rata-rata ini mungkin terkait dengan desinkronisasi gelombang-mu yang terjadi di korteks motorik selama pergerakan; tetapi, data lebih lanjut masih perlu dikumpulkan dan dianalisis untuk memastikan hubungannya.

Tabel 4.1 Estimasi densitas arus rata-rata dari selama kondisi genggaman tangan dari kondisi *baseline*, di B.A. 4 dan 6.

	Tangan Kanan				***Tangan Kiri***			
	B.A. 4		*B.A. 6*		*B.A. 4*		*B.A. 6*	
	BL	*MG*	*BL*	*MG*	*BL*	*MG*	*BL*	*MG*
Densitas Arus Rata-rata (µA/mm3)	*0,1110*	*0,0349*	*0,135*	*0,0408*	*0,0744*	*0,0365*	*0,0921*	*0,0436*
delta (µA/mm3)	*0,0761*		*0,0942*		*0.0379*		*0.0485*	
Std	*0,1267*	*0,0715*	*0,1537*	*0,0878*	*0,1093*	*0,0803*	*0,1396*	*0,0983*

BL=baseline MG=Menggengam

4.9 Tren Aplikasi Pencitraan Otak pada QEEG

Penelitian QEEG berbasis estimasi densitas arus dengan lokalisasi sumber secara non-invasif pada saat ini terus berkembang. Untuk peningkatkan akurasi dari lokasisasi sumber, model kepala dari pemindaian MRI sebagai paramater matriks K perlu untuk dikembangkan dengan evaluasi membangun *data base* Indonesia berdasarkan dimensi anatomi otak yang lebih spesifik. Potensi lain adalah melakukan *skaling* secara proposional dari *data base* model kepala yang dipindai dengan MRI, berdasarkan pemindaian 3D kepala secara optik dari subjek yang akan dilakukan diagnosis dengan QEEG. Metode lokalisasi aktif dari posisi elektroda terhadap koordinat spasial kepala perlu dikembangkan untuk meningkatkan akurasi dari lokalisasi sumber.

Aplikasi klinis QEEG terus berkembang saat ini, melibatkan gangguan neuropsikiatri, epilepsi, stroke, demensia, cedera otak traumatis, gangguan kesehatan mental, dan banyak lainnya. Peran QEEG memungkinkan untuk menentukan diagnosis secara lebih komprehensif. Sejalan dengan perkembangan metode yang dikembangkan QEEG, evaluasi analitik untuk mendapatkan informasi objektif yang diperlukan untuk memperoleh diagnosis terperinci, penilaian keparahan penyakit yang akurat, dan evaluasi respons pengobatan tertentu (Kanda et al., 2009; Keizer, 2021). Pendekatan multi-modal pencitraan otak dari pendekatan EEG, fMRI, fNIR dan MEG, menjadi tren yang berkembang saat ini, untuk mendapatkan diagnosis dari fungsi kerja otak yang lebih komprehensif.

Salah satu pendekatan multi-modal pencitraan otak untuk apliasi klinis yang menjadi fokus pengembangan adalah *dual modality* berbasis EEG dan fNIR, yang mengabungkan pendekatan *hemodynamic response signals* (HRS)

dan *electromagnetic physiological signals* (EPS). Teknologi Instrumentasi dengan pendekatan dual modalitas tersebut sangat memungkinkan untuk dikembangkan di Indonesia.

Keterkaitan antara informasi yang bisa didapatkan dari sinyal EEG dengan rangsangan yang diberikan (baik rangsangan internal maupun eksternal) mendorong adanya pemanfaatan sinyal EEG sebagai *biofeedback* untuk keperluan nonmedis. Pengembangan dari perangkat nirkabel dan *wereable* EEG memberikan ruang aplikasi yang makin besar. Pengembangan sensor elektroda EEG yang didesain tanpa memerlukan gel konduktif secara khusus, dan dapat memaksimalkan kontak dengan permukaan kulit kepala walaupun subjek tanpa menghilangkan rambut di kepala, juga mendorong perkembangan QEEG untuk keperluan nonmedis.

Aplikasi QEEG untuk keperluan nonmedis antara lain untuk keperluan pada bidang psiko-akustik (Chen et al., 2021; Dong et al., 2017) dan psiko-*lighting* (pencahayaan)(Binnie et al., 1980; R. Zhang et al., 2020), evaluasi sinyal EEG digunakan untuk melihat preferensi terhadap aspek-aspek desain akustik dan pencahayaan baik dalam lingkungan nyata maupun pada lingkungan simulator virtual.

Bio-feedback terhadap faktor atensi subjek dalam aktivitas kerja terhadap stimulus eksternal juga menjadi salah satu kajian dengan memanfaatkan evaluasi sinyal EEG (Fitri et al., 2020; Zuraida et al., 2019). Aplikasi pemanfaatan sinyal EEG dalam dunia nonmedis juga berkembang dalam bidang *marketing*, sehingga dikenal bidang penelitian *neuromarketing* (Aprilianty et al., 2016).

Selain itu, ada juga penelitian yang dilakukan untuk membangun model yang dapat menerjemahkan sinyal EEG untuk suatu perintah motorik spesifik dan digunakan menjadi masukan pada sistem tertentu, misalkan kursi roda dan *computer game.* Teknologi tersebut dikenal dengan *brain computer interface* (Baniqued et al., 2021; Kawala-Sterniuk et al., 2021; Kaysa et al., 2013; Putri et al., 2022; Widyotriatmo et al., 2015) .

5 PENUTUP

Teknik Fisika merupakan bidang keilmuan rekayasa yang mempelajari gejala-gejala fisika secara multi-fisis dan multi-skala. Teknik Fisika memadukan tiga pilar metode rekayasa dengan seimbang, yaitu eksperimental, analitikal, maupun komputasional. Selanjutnya, aspek multi-skala dapat dibangun dengan sains rakayasa yang lebar dari skala makro hingga nano. Di atas dasar rekayasa yang kuat tersebut, keahlian multi-faset dibentuk dengan mempelajari keahlian instrumentasi & kontrol, sistem energi & thermal, fisika bangunan, serta pemrosesan material lanjut.

Pengembangan bidang instrumentasi medis dalam keilmuan teknik fisika pada saat ini berkembang ke arah sains dan teknologi pengukuran dalam pendekatan multi-fisis yang mampu untuk melihat aspek yang lebih luas terkait interaksi manusia , sistem fisik dan sistem *cyber*. Kebutuhan untuk peningkatan fungsionalitas dari sistem instrumentasi medik, baik dengan pendekatan *reverse engineering*, aspek pengembangan visualiasi dan analisa dimensi data besar yang diperolah dari *multi-modality* sistem pencitraan medik, pengembangan *digital twins* dalam instrumentasi medik, yang mengintegrasikan kemampuan pemodelan dan simulasi multi-fisis dan multi-skala dan eksperimen dalam sistem instrumentasi lanjut yang berkembang.

Perkembangan teknologi instrumentasi pencitraan medik di masa depan akan mengarah kemampuan resolusi ke level molekuler, portabilitas dari perangkat, kemampuan fungsionalitas yang berkembang sesuai dengan kebutuhan klinik dan kemampuan perangkat melakukan analisis berbasis *Artificial intelligence*(AI). Kemampuan rekayasa intrumentasi berbasis pendekatan multi-fisis multi-skala menjadi salah satu kunci agar dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi pencitraan medis di masa depan.

6 UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdullilah, puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah Swt. karena atas karunia-Nya saya berada pada titik langkah perjalanan hidup yang tidak pernah saya impikan, tetapi Allah berikan amanah karier akademik di ITB sebagai Guru Besar.

Terima kasih saya ucapkan yang sebesar-besarnya kepada Pimpinan dan Majelis Wali Amanat ITB, Rektor dan jajarannya, Pimpinan dan Majelis Senat ITB, pimpinan dan seluruh anggota Forum Guru Besar ITB serta kepada Dekan Fakultas Teknologi Industri Prof. Brian Yuliarto dan Prof. Ari Widyanti, serta jajarannya di Fakultas Teknologi Industri, untuk dukungan dalam proses pengusulan Guru besar.

Terima kasih untuk guru-guru saya selama belajar dan berkarier di Teknik Fisika, dan tempat saya untuk belajar banyak hal tentang ilmu dan kehidupan, motivasi untuk terus maju dan kekeluargaan selama ini, untuk ibu Dr. Farida I Muchtadi, ibu Dr. Endang Juliastuti, Dr. Sutanto Hadisupadmo, Dr. Edi Leksono, Prof. Yul Yunazwin, Prof. Harijono A. Tjokronegoro, Prof. Hermawan K. Dipojono, Prof. Deddy Kurniadi, Prof. Bambang Sunendar, Prof. Soegijanto (alm), Prof. Andrianto Handojo (alm), Prof. Amoranto Trisnobudi (alm), Dr. Parsaulian Ishaya Siregar, Prof. Endra Joelianto, Dr. Agus Samsi, Dr. Rochmanuddin, Dr. Bambang Abednego, Dr. Kusmayanto Kadiman, F.X. Nugroho Soelami, Dr. Aman Mostovan, Ph.D., R.Triyogo, MDESSC, Dr. Suyatman, Nugraha, Ph.D., Dr. Ida Bagus Ardhana Putra (alm), Ir. Praptowidodo, M.Sc (alm), Dr. Nyoman Bangsing (alm), Ir. Wasigaren (alm), Ir. Soelardjo Kertoatmodjo M.Sc. MET. (alm), Dr. Ida Bagus Ardhana Putra (alm), Hendradjit, M.Sc.E. (alm),

Rekan Dosen Teknik Fisika satu generasi dengan saya, Dr. Eko Mursito Budi, R. Sugeng Joko Sarwono, Ph.D., Estiyanti Ekawati, Ph.D., Prof. Brian Yuliarto, Dr. Augie Widyotriatmo, Iwan Prasetiyo, MT., Ph.D., atas dukungan dan kekeluargaan selama ini.

Terima kasih kepada mantan mahasiswa dan bimbingan saya sewaktu S1 dan/atau S2 atau S2 dan/atau S3 yang sekarang menjadi kolega dosen di Teknik Fisika, Dr. Rahmat Romadhon, Dr. Damar Rastri Adhika, Dr. Rizki Armanto, Dr. Vebi Nadhira, Dr. Miranti Indar Mandasari, Dr. Anugrah

Sabdono, Dr. Ni Putu Amanda Nitidara, Dr. Narendra Kurnia Putra, Ayu Gereta Risangtuni, S.T., M.T., Naila Zahra, S.T., M.T..

Juga para mantan mahasiswa yang sekarang juga menjadi kolega dosen yang luar biasa, Adhitya Gandaryus Saputro, Ph.D., Fadjar Fathurahman, Ph.D., Ganes Shukri, S.T., M.Eng., Ph.D., Mohammad Kemal Agusta, Ph.D., Muhammad Haris Mahyuddin, Dr.Eng, dan Muhammad Iqbal, Dr. Eng.

Terima kasih juga untuk mantan bimbingan mahasiswa saya yang banyak mewarnai juga arah penelitian instrumentasi biomedis bersama saya dan setia untuk tetap berkarier sebagai dosen dan peneliti , antara lain Dr. Hesty Susanti, Masitoh S.T., M.T., Affan Kaysa Waafi, S.T., M.Se., Dr. Eng. Ananta Adhi Wardana, dan banyak lagi mantan bimbingan mahasiswa saya yang berkarier di penelitian yang mohon maaf tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Terima kasih yang tidak terhingga untuk istri tercinta, Hayati S.si., Apt, dan putra-putri yang juga setia menemani saya belajar dan bekerja, Ainun Nabiila, S.T., dan Zaki Azhari. Terima kasih atas dukungan dan kesabaran selama ini. Semoga berkah dan rahmat Allah selalu untuk keluarga kita.

Terima kasih yang paling dalam dan doa saya untuk almarhum Bapak Tomo dan almarhumah ibu Soekatipah (semoga Allah merahmati Ayah dan Ibu), semangat 45 dari beliau untuk mendorong saya terus sekolah, walau beliau sendiri tidak pernah tamat sekolah formal di semua jenjang. Untuk ibu Mertua dan almarhum bapak Mertua, saya haturkan terima kasih atas segala dorongan dan doa kepada saya, istri, dan anak-anak saya.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, semua pihak baik yang secara langsung maupun tidak langsung telah mengantarkan perjalan hidup saya sampai dengan momen saat ini. Semoga semua amal dan kebaikan bapak dan ibu mendapatkan balasan yang lebih baik dari Allah Swt..

DAFTAR PUSTAKA

Abdelaziz, M. E. M. K., Tian, L., Hamady, M., Yang, G. Z., & Temelkuran, B. (2021). X-ray to MR: The progress of flexible instruments for endovascular navigation. In *Progress in Biomedical Engineering* (Vol. 3, Issue 3). https://doi.org/10.1088/2516-1091/ac12d6.

Aprilianty, F., Purwanegara, M. S., & Suprijanto. (2016). Effects of colour towards underwear choice based on electroencephalography (EEG). *Australasian Marketing Journal*, *24*(4). https://doi.org/10.1016/j.ausmj.2016.11.007.

Baniqued, P. D. E., Stanyer, E. C., Awais, M., Alazmani, A., Jackson, A. E., Mon-Williams, M. A., Mushtaq, F., & Holt, R. J. (2021). Brain–computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review. In *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* (Vol. 18, Issue 1). https://doi.org/10.1186/s12984-021-00820-8.

Binnie, C. D., Darby, C. E., de Korte, R. A., Veldhuizen, R., & Wilkins, A. J. (1980). EEG sensitivity to television: Effects of ambient lighting. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *50*(3–4). https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90161-3.

Casson, A. J. (2019). Wearable EEG and beyond. In *Biomedical Engineering Letters* (Vol. 9, Issue 1). https://doi.org/10.1007/s13534-018-00093-6

Chen, X., Lin, J., Jin, H., Huang, Y., & Liu, Z. (2021). The psychoacoustics annoyance research based on EEG rhythms for passengers in high-speed railway. *Applied Acoustics*, *171*. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107575.

Culp, W. C., McCowan, T. C., Goertzen, T. C., Habbe, T. G., Hummel, M. M., LeVeen, R. F., & Anderson, J. C. (2000). Relative ultrasonographic echogenicity of standard, dimpled, and polymeric-coated needles. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, *11*(3). https://doi.org/10.1016/S1051-0443(07)61429-8.

Dong, Y., Raif, K. E., Determan, S. C., & Gai, Y. (2017). Decoding spatial attention with EEG and virtual acoustic space. *Physiological Reports*, *5*(22). https://doi.org/10.14814/phy2.13512.

Fitri, L. L., Purawijaya, D. A., & Suprijanto. (2020). Effect of blue light exposure to brain wave physiology related to cognitive and motoric function during

night driving simulation. *Malaysian Applied Biology*, *49*(2). https://doi.org/10.55230/mabjournal.v49i2.1525.

Furlow, B. (2019). CT-Guided Interventional Radiology. In *Radiologic technology* (Vol. 90, Issue 6).

Glomb, K., Cabral, J., Cattani, A., Mazzoni, A., Raj, A., & Franceschiello, B. (2022). Computational Models in Electroencephalography. *Brain Topography*, *35*(1). https://doi.org/10.1007/s10548-021-00828-2.

Grech, R., Cassar, T., Muscat, J., Camilleri, K. P., Fabri, S. G., Zervakis, M., Xanthopoulos, P., Sakkalis, V., & Vanrumste, B. (2008). Review on solving the inverse problem in EEG source analysis. In *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* (Vol. 5). https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-25.

Hendee, W. R. (1994). The Essential Physics of Medical Imaging. *Radiology*, *191*(3). https://doi.org/10.1148/radiology.191.3.786.

Hoskins, P. R., Martin, K., & Thrush, A. (2019). Diagnostic ultrasound, third edition: Physics and equipment. In *Diagnostic Ultrasound, Third Edition: Physics and Equipment*. https://doi.org/10.1201/9781138893603.

Hu, L., & Zhang, Z. (2019). EEG signal processing and feature extraction. In *EEG Signal Processing and Feature Extraction*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9113-2.

Huang, J., & Gao, H. (2016). Regional anesthesia practice in China: A survey. *Journal of Clinical Anesthesia*, *34*. https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2016.03.071.

Hungr, N., Fouard, C., Robert, A., Bricault, I., & Cinquin, P. (2011). Interventional radiology robot for CT and MRI guided percutaneous interventions. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *6891 LNCS*(PART 1). https://doi.org/10.1007/978-3-642-23623-5_18.

Kanda, P. A. de M., Anghinah, R., Smidth, M. T., & Silva, J. M. (2009). The clinical use of quantitative EEG in cognitive disorders. *Dementia & Neuropsychologia*, *3*(3). https://doi.org/10.1590/s1980-57642009dn30300004.

Katircioglu, K., Hasegeli, L., Ibrahimhakkioglu, H. F., Ulusoy, B., & Damar, H. (2008). A retrospective review of 34,109 epidural anesthetics for obstetric and gynecologic procedures at a single private hospital in Turkey. *Anesthesia and Analgesia*, *107*(5). https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31817bd11f.

Kawala-Sterniuk, A., Browarska, N., Al-Bakri, A., Pelc, M., Zygarlicki, J., Sidikova, M., Martinek, R., & Gorzelanczyk, E. J. (2021). Summary of over fifty years with brain-computer interfaces—a review. In *Brain Sciences* (Vol. 11, Issue 1). https://doi.org/10.3390/brainsci11010043.

Kaysa, W. A., Suprijanto, S., & Widyotriatmo, A. (2013). Design of Brain-computer interface platform for semi real-time commanding electrical wheelchair simulator movement. *Proceedings of 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Control and Automation, ICA 2013*. https://doi.org/10.1109/ICA.2013.6734043.

Keizer, A. W. (2021). Standardization and Personalized Medicine Using Quantitative EEG in Clinical Settings. *Clinical EEG and Neuroscience*, *52*(2). https://doi.org/10.1177/1550059419874945.

Khandpur, R. S. (2003). Handbook of Biomedical Instrumentation. In *Biomedical Instrumentation*.

Lavelle, C., Wuttke, M., Valentin, I., Roy, J., & Roy, S. (2019). What are Brainwaves ? Types of Brain waves | EEG sensor and brain wave – UK. In *Brainworks - Train Your Mind*.

Lenartowicz, A., & Poldrack, R. A. (2010). Brain Imaging. In G. F. Koob, M. Le Moal, & R. F. Thompson (Eds.), *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience* (pp. 187–193). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045396-5.00052-X.

Lon, F., Lecroq, F., Dcultot, D., & Maze, G. (1992). Scattering Of An Obliquely Incident Acoustic Wave By An Infinite Hollow Cylindrical Shell. *Journal of the Acoustical Society of America*, *91*(3). https://doi.org/10.1121/1.402469

Masitoh, Suprijanto, & Nadhira, V. (2021). DWT decomposition of EEG signal and source localization using ICA-eLORETA method for basic hand motor activity. *Proceedings of the 2021 International Conference on Instrumentation, Control, and Automation, ICA 2021*. https://doi.org/10.1109/ICA52848.2021.9625677.

Masitoh, Suprijanto, Putri, F. D., & Nadhira, V. (2023). Quantitative EEG Based on Direct Recording and Source Localization Estimation in Repetitive Hand Motor Activity. *International Journal Bioautomation*, *27*(1), 51–68. https://doi.org/10.7546/ijba.2023.27.1.000897.

Michel, C. M., Murray, M. M., Lantz, G., Gonzalez, S., Spinelli, L., & Grave De Peralta, R. (2004). EEG source imaging. In *Clinical Neurophysiology* (Vol. 115, Issue 10). https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.06.001.

Mohamed Y. Abdallah, Y., & Alqahtani, T. (2019). Research in Medical Imaging Using Image Processing Techniques. In *Medical Imaging - Principles and Applications [Working Title]*. https://doi.org/10.5772/intechopen.84360.

Pascual-Marqui, R. D. (2002). Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): Technical details. *Methods and Findings in Experimental and Clinical Pharmacology*, *24*(SUPPL. D).

Pfurtscheller, G., & Neuper, C. (1994). Event-related synchronization of mu rhythm in the EEG over the cortical hand area in man. *Neuroscience Letters*, *174*(1). https://doi.org/10.1016/0304-3940(94)90127-9.

Popa, L. L., Dragos, H., Pantelemon, C., Rosu, O. V., & Strilciuc, S. (2020). The Role of Quantitative EEG in the Diagnosis of Neuropsychiatric Disorders. *Journal of Medicine and Life*, *13*(1). https://doi.org/10.25122/jml-2019-0085

Putri, F., Susnoschi Luca, I., Garcia Pedro, J. A., Ding, H., & Vučković, A. (2022). Winners and losers in brain computer interface competitive gaming: directional connectivity analysis. *Journal of Neural Engineering*, *19*(4). https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac8451.

Solomon, S. B., & Silverman, S. G. (2010). Imaging in interventional oncology. In *Radiology* (Vol. 257, Issue 3). https://doi.org/10.1148/radiol.10081490

Suprijanto, & Hesty Susanti. (2020). *Ultrasonografi Medis : Prinsip dan Aplikasi: Vol. I* (I). Penerbit ITB Press.

Suprijanto, S., Gareta R., A., Masyhuroh, F. K., & Maisaroh, S. (2018). Rancang Bangun Purwarupa Perangkat Wearable Headset untuk Pengukuran Sinyal Listrik pada Otak. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, *7*(3). https://doi.org/10.22146/jnteti.v7i3.445.

Suprijanto, S., Masitoh, M., Putri, F. D., & Risangtuni, A. G. (2021). Future Trend of EEG Source Localization for Quantifying Repetitive Motor Activity as feedback for Rehabilitation Device. *Proceedings of the 2021 International Conference on Instrumentation, Control, and Automation, ICA 2021*. https://doi.org/10.1109/ICA52848.2021.9625665.

Suyatman, & Sonny Yuliar. (2004). *Engineering Physics Antara "Fisika Teknik" dan 'Teknik Fisika* (S. Y. Suyatman, Ed.). PT Mizan Grafika Sarana.

Tim Kurikulum TF ITB. (2019). *Dokumen Kurikulum Program Studi Teknik Fisika Program Sarjana*.

von Groote-Bidlingmaier, F., & Koegelenberg, C. F. N. (2012). A practical guide to transthoracic ultrasound. In *Breathe* (Vol. 9, Issue 2). https://doi.org/10.1183/20734735.024112.

Widyotriatmo, A., Suprijanto, & Andronicus, S. (2015). A collaborative control of brain computer interface and robotic wheelchair. *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244838.

Zhang, R., Yang, Y., Fang, Q., Liu, Y., Zhu, X., Wang, M., & Su, L. (2020). Effect of indoors artificial lighting conditions on computer-based learning performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(7). https://doi.org/10.3390/ijerph17072537.

Zhang, X., Huang, Z., Lu, H., Yang, X., Cao, L., Wen, Z., Zheng, Q., Peng, H., Xue, P., & Jiang, X. (2023). Identification of resection plane for anatomical liver resection using ultrasonography-guided needle insertion. *Frontiers in Surgery*, *9*. https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.1035315

Zhang, Y., & Dong, Z. (2023). Medical Imaging and Image Processing. *Technologies*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/technologies11020054.

Zuraida, R., Iridiastadi, H., Sutalaksana, I. Z., & Suprijanto. (2019). An analysis of EEG changes during prolonged simulated driving for the assessment of driver fatigue. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, *51*(2). https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.2.9.

CURRICULUM VITAE

Nama	: Suprijanto
Tempat/tgl lahir	: Surabaya, 2 September 1970
Kel. Keahlian	: Instrumentasi dan Kontrol
Alamat Kantor	: Ganesha 10 Bandung
Nama Istri	: Hayati
Nama Anak	: Ainun Nabiila
	Zaki Azhari

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doktor, Imaging Science and Technology, Delft University of Technology, Netherlands, 2006
- Magister Teknik , Instrumentasi dan Kontrol ITB, 1998
- Sarjana Teknik, Teknik Fisika, ITB, 1994

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

Staf Pengajar Teknik Fisika	1996-sekarang
Anggota KK Instrumentasi dan Kontrol	2006-sekarang
Ketua Program S2 Teknik Fisika	2014-2018
Ketua Program S2 Instrumentasi dan Kontrol	2014-2018
Ketua Program S3 Teknik Fisika	2014-2018
Koordinator Akademik Program untuk Program Pendampingan pendidikan Kerja Sama ITB dan Kementrian Perdagangan : Akademi Metrologi dan Instrumentasi	*2016-2020*
Anggota Senat Akademik Fakultas Teknologi Industri(FTI) - ITB	*2019-Sekarang*
Anggota Senat - ITB	*2019-Sekarang*

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, 1 April 1996
- Penata Muda III/a, 25 April 1997
- Penata III/c, 07 Januari 2009
- Penata Tingkat I III/d, 22 Juni 2010
- Pembina IV/a, 23 Juni 2016
- Pembina Tingkat I IV/b, 23 Mei 2018
- Pembina Utama Muda IV/c, 30 Maret 2020

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Juli 2000
- Asisten Ahli, 1 Januari 2001
- Lektor, 1 Januari 2008
- Lektor Kepala, 01 Juli 2015
- Guru Besar, 1 November 2022

V. KEGIATAN PENELITIAN (10 Tahun Terakhir)

2022-2023	**Peneliti Utama**, Kemendikbud, **Judul Penelitian** : Pengembangan Produk Perangkat Fisioterapi Medis Customizable-Active Orthosis Dengan Pendekatan Additive Manufacturing
2023	**Peneliti**, Kemendikbud, **Judul Penelitian** : Pengembangan bioplastic flexible array-electrodes berbasis rumput laut dengan penambahan material konduktif grafit dan AgNP untuk evaluasi sikronisasi kontraksi otot pada proses menelan
2022	**Peneliti Utama**, Kemendikbud, Marching-Fund, **Judul Penelitian** : Hilirisasi dan Pengembangan Conductive Smart Textile Yang Terintegrasi Pada Produk Sportswear Sebagai Wearables Sensor Bio-Potensial Jantung,
2021	**Peneliti Utama**, Kemendikbud, **Judul Penelitian** : Pengembangan Neurofeedback dengan metode Low Resolution Brain Electromagnetic 3D Tomography Berbasis Perekaman Sinyal Listrik Otak
2020	**Peneliti Utama**, Kemenristek-dikti, **Judul Penelitian** : Sistem Cerdas untuk analisa pneumonia paru-paru karena COVID-19 berbasis citra Ultrasonografi (USG)
2020	**Peneliti Utama**, Institut Teknologi Bandung , **Judul Penelitian** : Rancang Bangun Sistem Scanning Portable untuk Inspeksi Cacat Internal Rel Kereta dengan NDT Berbasis Ultrasonik
2020	**Peneliti Utama** , Institut Teknologi Bandung , **Judul Penelitian** : Rancang Bangun Prototipe Perangkat Rehabilitasi Medis Homecare Untuk Aplikasi Mirror Therapy Motorik Tangan Berbasis Pneumatic Soft Robotic Glove
2019	**Peneliti Utama** , Kemenristek-dikti, **Judul Penelitian** : Pengembangan Sistem Bio-signal feedback untuk Evaluasi Keberhasilan Efek Terapi Motorik Repetitif Pada Pasien Pasca Stroke Subakut
2019	**Peneliti Utama** , Kemenristek-dikti, **Judul Penelitian** : Pengembangan Perangkat Simulator Needle Insertion sebagai Evaluator Performansi Fitur pada Pencitraan Ultrasonografi
2018	**Peneliti Utama** , Institut Teknologi Bandung , **Judul Penelitian** : Pembuatan Skin Imaging Profil Permukaan Kulit Berbasis Frinje Profilometri untuk Mendukung Uji Efikasi Sediaan Gel γ-PGA Hasil Fermentasi Kedelai Sebagai Anti Aging
2018	**Peneliti Utama** , ASAHI Foundation, **Judul Penelitian** : Understanding the Resonance Scattering Phenomenon on the Interaction between Ultrasound Wave and Needle in Soft Tissue: toward to Needle Visibility Enhancement on Medical Ultrasound-Guided for Needle Insertion

2017	**Peneliti Utama** , Kemenristek-dikti, **Judul Penelitian** : Pengembangan Perangkat Simulator Needle Insertion sebagai Evaluator Performansi Fitur pada Pencitraan Ultrasonografi
2016	**Peneliti Utama** , Kemenristek-dikti, **Judul Penelitian** : Pengembangan Pencitraan Deformasi Profil 3D Permukaan Kulit dengan One Shoot Fringe Projection
2015	**Peneliti Utama** , Institut Teknologi Bandung , **Judul Penelitian** : Pengembangan Sistem Klasifikasi Sinyal Bio-Elektrik Untuk Umpan Balik Proses Rehabiliasi Pasien Fisioterapi
2014	**Peneliti Utama** , Kemenristek-dikti, **Judul Penelitian** : Perancangan Platform Realitas Maya sebagai Simulator Pelatihan Teknik Pembedahan Minimal Invasif
2014	**Peneliti Utama** , Institut Teknologi Bandung , **Judul Penelitian** : Aplikasi Pemodelan dan Simulasi Untuk Evaluasi Laju Pelarutan Pada Pengembangan Formulasi Sediaaan Tablet Lepas Lambat

VI. PUBLIKASI

1. Aditya Prayugo Hariyanto, Nurhanifa Tri Budiarti, **Suprijanto**, Kwan Hoong Ng, Freddy Haryanto & Endarko. Evaluation of physical properties and image of polyvinyl chloride as breast tissue equivalence for dual-modality (mammography and ultrasound). *Physical and Engineering Sciences in Medicine 2023.*
2. Maulana, Harfi, Ahmad Ridwan, **Suprijanto**, Shanty Rahayu Kusumawardani, and Lulu Lusianti Fitri. Electrocardiogram Analysis of Hyperlipidemia-induced Wistar Rats Using Wireless Mice Electrocardiogram. *Sains Malaysiana, 2023.*
3. Masitoh, **Suprijanto**, Finda Putri, Vebi Nadhira (2023). Quantitative EEG Based on Direct Recording and Source Localization Estimation in Repetitive Hand Motor Activity. *International Journal Bioautomation, 2023.*
4. Ni Putu Amanda Nitidara, Joko Sarwono, **Suprijanto**, F.X. Nugroho Soelami,The multisensory interaction between auditory, visual, and thermal to the overall comfort in public open space: A study in a tropical climate, *Sustainable Cities and Society, Volume 78 ,2022.*
5. **Suprijanto**, Naila Zahra,Vebi Nadhira and Endang Juliastuti,"Adaptive Phase Error Suppression Concerning 3D surface Deformation Measurement on Color Digital Fringe Projection Profilometry," International Journal on Advanced Science*, Engineering and Information Technology, vol. 12, no. 5, pp. 1973-1980, 2022.*
6. Nurlis, A.G., Adhika, D.R., **Suprijanto**,. Effect of Reducing Agents on The Performance of AgNPs and PANI Flexible Conductive Fabrics. *International Journal of Technology*. Volume 13(6), pp. 1163-1172, 2022.
7. Zhafirah Ajrina, Revantino, Rizki A. Mangkuto, **Suprijanto**, F.X. Nugroho Soelami, Spectral reflectance and chromaticity differences of various

colors of interior finishing material samples under tunable LED lamps, *Journal of Building Engineering*, Volume 44, 2021.
8. **Suprijanto**, M. Masitoh, F. D. Putri and A. G. Risangtuni, "Future Trend of EEG Source Localization for Quantifying Repetitive Motor Activity as feedback for Rehabilitation Device," Proc.IEEE, I*nternational Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA), Bandung, Indonesia*, 2021, pp. 12-15.
9. **Suprijanto**, Susanti, H. (2021). Pleural Line Detection Enhancement in Lung Ultrasonography (LUS) Based on Morphological and Adaptive Structural 2D Filter. *International Journal of Integrated Engineering, 13(5), 98–106.*
10. Ahmad Zahi Ulul Azmi, **Suprijanto**, Vebi Nadhira, "Reconstruction and regularization multi frame super resolution on vegetation index NIR image," Proc. SPIE 11789, Fourth International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2020).
11. H Susanti, **Suprijanto**, D Kurniadi, Analytical Modelling Based on Resonance Scattering Theory Explaining the Needle Visibility Inconsistency in B-Mode Ultrasound, Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics / Vol. 15 / No. 1, 2021 / pp 131-148.
12. H. Susanti and **Suprijanto**, "Image Processing Framework for Pleural Line (A-Line) Detection in Video Lung Ultrasonography," 2020 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), Langkawi Island, Malaysia, 2021, pp. 99-102.
13. **Suprijanto**, Noor, Azizah S., Mandasari, Miranti I, Hesty Susanti,. Surface Electromyography Quantification Methods for Evaluating Muscle Activity in Dysphagia *Sains Malaysiana*, 2021.
14. **Suprijanto**, AS Noor, AG Risangtuni, H Susanti, Automatic Segmentation Scheme for Effective Synchronization of EMG-EEG Quantification, *International Journal of Biology and Biomedical Engineering 14, 136-143.*
15. LL Fitri, K Prestiasani, **Suprijanto**, Nocturnal Blue Light Exposure Increase Alpha and Beta Brain Waves as Cognition Function for Two Consecutive Night Driving in a Car Simulator, *Sains Malaysiana , 2020.*
16. K Ain, D Kurniadi, **Suprijanto**, O Santoso, Dual modality tran-admittance mammography and ultrasound reflection to improve accuracy of breast cancer detection, *Jurnal Teknologi 82 (4), 117-124, 2020.*
17. H Susanti, A Septyvergy, **Suprijanto**, A Quantification System of Needle Visibility in B-mode Ultrasound with Linear and Curved Transducer, D Kurniadi, *International Journal of Biology and Biomedical Engineering 14, 12-20, 2020.*
18. LL Fitri, DA Purawijaya, **Suprijanto**, Effect of blue light exposure to brain wave physiology related to cognitive and motor function during night driving simulation, Malaysian *Applied Biology Journal 49 (2), 69-74, 2020.*

19. A Widyotriatmo, C Maharnani, **Suprijanto**, Rehabilitation procedure and performance measurement using mechanical rotary impedance actuator, *International Journal of Artificial Intelligence 18 (1), 218-236, 2020.*
20. **Suprijanto**, D. Kurniadi and Sinta, Modelling and Simulation 3D Ultrasound Wave Propagation using k-space Pseudospectral Method in the Railway Track Geometry, *IEEE Proc. 6th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA), Bandung, Indonesia, 2019, pp. 153-157.*
21. A Azhari, G Gianto, **Suprijanto**, Comparison of the quality of the result of digitising panoramic analogue films using transmission and reflection scanner mode with direct digital imaging standard, *Padjadjaran Journal of Dentistry 31 (2), 99-105 2019.*
22. R Zuraida, H Iridiastadi, IZ Sutalaksana, **Suprijanto,** An Analysis of EEG Changes during Prolonged Simulated Driving for the Assessment of Driver Fatigue, *Journal of Engineering and Technological Sciences 51 (2), 290-302, 2019.*
23. RA Mangkuto, DE Agustina, FA Alifah, **Suprijanto**, Optimisation of luminance-based metrics for lighting in an open-plan dental examination room considering psycho-physiological response of dentists, Faridah, *Optical Review volume 26, 162–178*, 2019.
24. M. H. Barri, A. Widyotriatmo and **Suprijanto**, Path Reference Generation for Upper-Limb Rehabilitation with Kinematic Model," *IEEE International Conference on Robotics, Biomimetics, and Intelligent Computational Systems (Robionetics), Bandung, Indonesia, 2018, pp. 38-43.*
25. Rahmat Romadhon, Addin Dinda Rinata, **Suprijanto**, Yazid Bindar, F.X. Nugroho Soelami, Development of Thermoregulation Model of Surgical Patient and Heat Exchange with Air Condition in the Operating Room, *Procedia Engineering, Volume 170, , Pages 547-551,2017.*
26. K Ain, D Kurniadi, **Suprijanto**, O Santoso, Dual modality electrical impedance and ultrasound reflection tomography to improve image quality, *Journal of electrical bioimpedance 8 (1), 3-10, 2017.*
27. F Aprilianty, MS Purwanegara, **Suprijanto**, Effects of colour towards underwear choice based on electroencephalography (EEG), *Australasian Marketing Journal 24 (4), 331-336, 2016.*
28. L. Sekawati, N. U. Maulidevi and **Suprijanto**, Machine learning to predict person's interest towards visual object by utilizing EEG signal, *International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE), Denpasar, Indonesia, 2016.*

29. Tanotogono, E , Akasum, Gina , **Suprijanto**, and Sudirham, J. Model-based assessment of probe placement criteria in cancer therapy using RF ablation. *Journal of Physics: Conference Series. 694. 2016.*
30. N. B. Wicaksono, T. L. R. Mengko and **Suprijanto**, "Steady-State Visual Evoked Potential based Brain Computer Interface: Experiment of LED stimulation in two-rooms condition," *2015 4th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), Bandung, Indonesia, 2015, pp. 90-93.*
31. Widyotriatmo, **Suprijanto** and S. Andronicus, "A collaborative control of brain computer interface and robotic wheelchair," *2015 10th Asian Control Conference (ASCC), Kota Kinabalu, Malaysia, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ASCC.2015.7244838.*
32. W. A. Kaysa, **Suprijanto** and A. Widyotriatmo, "Design of Brain-computer interface platform for semi real-time commanding electrical wheelchair simulator movement," *IEEE Proc. 3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA), , Indonesia, 2013, pp. 39-44, doi: 10.1109/ICA.2013.6734043.*
33. **Suprijanto**, E. Juliastuti, Rachmawati, A, Computer vision for black tea grading based on the black tea particles and tea infusion color, *international journal of imaging and robotics 10 (2), 17-29, 2013.*
34. **Suprijanto** , Nadhira, V., Lestari, D. A., Juliastuti, E., & Darijanto, S. T. (2013). Digital Dermatoscopy Method for Human Skin Roughness Analysis. *Journal of ICT Research and Applications, 5(1), 57-71.*
35. **Suprijanto** , Vogel MW, Vos FM, Vrooman HA, Vossepoel AM. Inter-frame motion correction for MR thermometry. *Med Image Comput Comput Assist Interv.;8(Pt 1):580-8. doi: 10.1007/11566465_72. PMID: 16685893. 2005.*

VII. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 tahun (tahun 2016)
- Satyalancana Karya Satya 20 tahun (tahun 2019)
- Penghargaan Dosen Berprestasi Bidang Karya Inovasi ITB (2018)

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi pendidik sebagai dosen profesional (2011)
- Sertifikasi Insinyur Profesional Madya (2020)

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 978-623-297-321-3
9 786232 973213