

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi instrumentasi telah memberikan kontribusi yang penting pada sistem pencitraan dalam berbagai bidang, terutama pada bidang kesehatan, industri, dan penelitian. Sistem pencitraan memungkinkan untuk mendapatkan informasi serta melihat kondisi internal suatu objek tanpa merusak struktur objek tersebut. Berbagai sistem pencitraan telah banyak digunakan seperti Ultrasonografi (USG), Computed Tomography (CT), Magnetic Resonance Imaging (MRI), dan Positron Emission Tomography (PET). Masing-masing sistem memiliki prinsip kerja yang berbeda-beda, tetapi pada umumnya memiliki fungsi yang sama yaitu untuk dapat menghasilkan informasi atau citra mengenai suatu kondisi internal objek yang sulit diamati secara langsung sehingga dapat mendukung proses analisis, diagnosis, perencanaan, serta evaluasi yang lebih akurat. (Hussain et al., 2022)

Meskipun mampu menghasilkan citra dengan resolusi yang tinggi, setiap sistem pencitraan memiliki keterbatasan tertentu. Computed Tomography (CT) dan Positron Emission Tomography (PET) memanfaatkan radiasi pengion sehingga penggunaannya harus memperhatikan aspek keselamatan radiasi. Di sisi lain, Magnetic Resonance Imaging (MRI) memerlukan biaya investasi dan operasional yang relatif tinggi serta memiliki ukuran sistem yang besar. Selain itu, beberapa sistem juga membutuhkan infrastruktur dan fasilitas khusus dalam pengoperasiannya. Berbagai keterbatasan tersebut mendorong pengembangan berbagai metode pencitraan alternatif yang lebih sederhana, aman, portabel, serta memiliki biaya yang lebih rendah tanpa menghilangkan kemampuan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi internal suatu objek. (Murdef et al., 2023)

Salah satu metode alternatif dalam sistem pencitraan yang sedang dikembangkan adalah Electrical Impedance Tomography (EIT). EIT merupakan teknik

pencitraan non-invasif yang bekerja dengan menginjeksikan arus listrik beramplitudo kecil ke dalam objek melalui sejumlah elektroda yang ditempatkan pada permukaan objek. Tegangan yang terukur pada elektroda kemudian digunakan untuk memperoleh informasi mengenai distribusi konduktivitas listrik di dalam objek. Data hasil pengukuran tersebut selanjutnya diolah sehingga menghasilkan citra dua dimensi yang merepresentasikan kondisi internal objek. (Adler and Boyle, 2017)

Metode EIT memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode pencitraan lainnya, di antaranya biaya implementasi yang relatif rendah, konsumsi daya yang kecil, tidak menggunakan radiasi ionisasi, serta memiliki potensi untuk melakukan pengukuran secara real-time. Karakteristik tersebut menjadikan EIT berpotensi diterapkan pada berbagai bidang, seperti pemantauan fungsi paru-paru, pencitraan jaringan biologis, pengujian material, hingga pemantauan proses industri. Namun demikian, EIT juga memiliki keterbatasan berupa resolusi spasial yang relatif rendah serta sensitivitas terhadap kualitas kontak elektroda dan gangguan noise, sehingga pengembangan sistem akuisisi data dan algoritma rekonstruksi citra masih menjadi fokus berbagai penelitian hingga saat ini. (Adler and Boyle, 2017)

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mengembangkan sistem Electrical Impedance Tomography (EIT) dengan berbagai pendekatan. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Francisco Zamora-Arellano et al. (2021) yang berhasil mengembangkan sistem EIT portabel berbasis *embedded system* dengan menekankan aspek portabilitas, keandalan, dan biaya implementasi yang relatif rendah. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan akuisisi data dan rekonstruksi citra secara mandiri menggunakan *platform* Raspberry Pi. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih menggunakan *single-board computer* sebagai unit pemrosesan utama sehingga masih terdapat peluang untuk mengembangkan sistem menggunakan mikrokontroler yang memiliki biaya implementasi lebih rendah, konsumsi daya yang lebih kecil, serta arsitektur yang lebih sederhana tanpa mengurangi fungsi utama sistem EIT. Selain itu, hasil rekonstruksi citra yang diperoleh masih menunjukkan keterbatasan resolusi spasial sehingga peningkatan kualitas

citra masih menjadi peluang penelitian lebih lanjut.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Fabian Alvarado-Arriagada et al. (2024) berhasil mengembangkan dan memvalidasi sistem EIT portabel untuk pemantauan respirasi secara *real-time*. Sistem tersebut menggunakan konfigurasi 16 elektroda dan mampu melakukan akuisisi data secara kontinu sehingga dapat digunakan untuk memantau perubahan fisiologis selama proses pernapasan. Hasil validasi menunjukkan bahwa sistem memiliki performa yang baik dalam mengestimasi parameter respirasi. Namun, penelitian tersebut secara khusus difokuskan pada aplikasi pemantauan respirasi, sehingga pengujian terhadap kemampuan sistem dalam mendeteksi dan merekonstruksi objek anomali pada *phantom* sebagai media uji belum menjadi fokus utama.

Biasi et al. (2022) mengembangkan sistem EIT untuk *tactile sensing* dengan menggabungkan pemodelan berbasis *Finite Element Method* (FEM) dan *Artificial Neural Network* (ANN) untuk menyelesaikan permasalahan *inverse*. Penelitian tersebut membandingkan metode ANN dengan metode rekonstruksi linear serta melakukan pengujian pada prototipe fisik untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menentukan posisi sentuhan. Hasil pengujian prototipe menunjukkan *mean position error* sebesar 5,74 mm pada metode ANN. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kesalahan posisi dapat digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk mengevaluasi kemampuan lokalisasi pada sistem EIT. Namun, penelitian Biasi et al. berfokus pada penerapan EIT sebagai sensor taktil dan menggunakan pendekatan ANN untuk proses rekonstruksi, sehingga pengembangan sistem instrumentasi EIT berbasis mikrokontroler dengan metode rekonstruksi *Back Projection* pada *phantom* 16 elektroda belum menjadi fokus penelitian tersebut. (Biasi et al., 2022)

Penelitian yang dilakukan oleh Aldo-Nofrianto et al. (2025) berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem akuisisi data Electrical Impedance Tomography (EIT) menggunakan konfigurasi 16 elektroda yang mengintegrasikan pembangkit sinyal, Voltage Controlled Current Source (VCCS), multiplexer, dan sistem akuisisi data untuk menghasilkan rekonstruksi citra. Penelitian tersebut me-

nunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan proses akuisisi data dan menghasilkan citra hasil rekonstruksi sebagai bukti keberhasilan implementasi sistem. Namun, penelitian tersebut lebih berfokus pada hasil implementasi sistem akuisisi data, sedangkan pembahasan mengenai proses perancangan setiap subsistem instrumentasi, karakterisasi kinerja masing-masing rangkaian, serta integrasi perangkat keras dan perangkat lunak secara rinci belum dijelaskan secara komprehensif.

Berdasarkan ketiga penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa pengembangan sistem Electrical Impedance Tomography (EIT) telah mengalami kemajuan pada aspek portabilitas, aplikasi pemantauan secara *real-time*, maupun sistem akuisisi data. Namun demikian, setiap penelitian memiliki fokus yang berbeda sehingga masih terdapat *research gap* dalam pengembangan sistem EIT. Penelitian Francisco Zamora-Arellano et al. (2021) lebih menitikberatkan pada pengembangan sistem portabel berbasis *single-board computer*, penelitian Fabian Alvarado-Arriagada et al. (2024) berfokus pada aplikasi pemantauan respirasi, sedangkan penelitian Aldo Nofrianto et al. (2025) lebih menitikberatkan pada implementasi sistem akuisisi data. Berdasarkan penelitian terdahulu yang ditinjau, masih terdapat peluang untuk mengembangkan sistem EIT berbasis mikrokontroler dengan mengintegrasikan seluruh subsistem instrumentasi, mulai dari pembangkit sinyal, sumber arus konstan, multiplexer, pengondisi sinyal, sistem akuisisi data, hingga perangkat lunak rekonstruksi citra dalam satu platform yang terintegrasi untuk pengujian menggunakan *phantom* 16 elektroda.

Penelitian ini tidak menawarkan metode rekonstruksi citra maupun konfigurasi pengukuran EIT yang baru, melainkan berfokus pada pengembangan sistem instrumentasi yang terintegrasi menggunakan mikrokontroler ESP32-S2. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan akan sistem EIT yang memiliki biaya implementasi lebih rendah, konsumsi daya yang lebih kecil, arsitektur yang lebih sederhana, serta mudah direalisasikan untuk kegiatan penelitian dan pendidikan. Selain itu, integrasi seluruh subsistem instrumentasi dalam satu platform diharapkan dapat

mempermudah proses pengembangan, pengujian, maupun modifikasi sistem EIT pada penelitian selanjutnya.

Kontribusi yang diharapkan dari penelitian ini adalah tersedianya rancangan dan implementasi sistem Electrical Impedance Tomography berbasis ESP32-S2 yang mengintegrasikan pembangkit sinyal AD9833, Voltage Controlled Current Source (VCCS), multiplexer, penguat instrumentasi AD620, rangkaian pengondisi sinyal, ADS1115, serta perangkat lunak rekonstruksi citra berbasis Python menggunakan PyEIT dalam satu sistem yang terintegrasi. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi alternatif platform EIT berbiaya relatif rendah yang dapat dimanfaatkan sebagai media penelitian, pengembangan, maupun pembelajaran di bidang instrumentasi dan pencitraan medis. Selain itu, dokumentasi proses perancangan dan integrasi sistem diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan sistem EIT yang lebih optimal.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun sistem Electrical Impedance Tomography (EIT) berbasis mikrokontroler ESP32-S2 menggunakan phantom 16 elektroda?
2. Bagaimana mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT)?
3. Bagaimana kemampuan sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) dalam mendeteksi dan merekonstruksi objek anomali pada *phantom* 16 elektroda?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) berbasis mikrokontroler ESP32-S2 menggunakan *phantom* 16 elektroda.
2. Mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT).
3. Menganalisis kemampuan sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) dalam mendeteksi dan merekonstruksi objek anomali pada *phantom* 16 elektroda.

1.4. Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek sebagai berikut.

1. Sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) menggunakan *phantom* silinder dengan 16 elektroda sebagai media pengujian.
2. Metode injeksi arus yang digunakan adalah metode *Adjacent*.
3. Penelitian difokuskan pada perancangan dan pembangunan sistem akuisisi data *Electrical Impedance Tomography* yang meliputi pembangkit sinyal, sumber arus konstan, sistem pemilihan elektroda, rangkaian pengondisi sinyal, dan sistem akuisisi data berbasis ESP32-S2.
4. Rekonstruksi citra dilakukan menggunakan perangkat lunak PyEIT dengan metode *Back Projection*. Penelitian ini tidak membahas pengembangan maupun optimasi algoritma rekonstruksi citra.

5. Pengujian sistem dilakukan pada *phantom* homogen dan *phantom* yang diberi objek anomali.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem Electrical Impedance Tomography (EIT) berbasis ESP32-S2 sebagai platform instrumentasi berbiaya relatif rendah melalui perancangan, integrasi, dan pengujian berbagai subsistem yang meliputi pembangkit sinyal, sumber arus konstan, multiplexer elektroda, penguat instrumentasi, rangkaian pengkondisi sinyal, dan sistem akuisisi data. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem EIT di bidang fisika instrumentasi serta mendukung kegiatan pembelajaran, praktikum, dan penelitian terkait pencitraan berbasis impedansi listrik, sekaligus menjadi dasar untuk pengembangan sistem EIT yang lebih lanjut dengan peningkatan jumlah elektroda, metode pengukuran, maupun algoritma rekonstruksi citra.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan ini disusun untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai isi penelitian yang dilakukan. Laporan penelitian ini dibagi ke dalam lima bab yang saling berkaitan sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan:

Membahas latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan laporan.

Bab II Tinjauan Pustaka:

Membahas landasan teori dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan *Electrical Impedance Tomography*, mikrokontroler ESP32-S2, modul AD9833 sebagai pembangkit sinyal, ADS1115 sebagai sistem akuisisi data, multiplexer CD74HC4067,

serta komponen pendukung lainnya.

Bab III Metode Penelitian:

Menjelaskan secara rinci metode penelitian yang digunakan, meliputi lokasi dan waktu penelitian, peralatan dan bahan, serta prosedur penelitian.

Bab IV Hasil dan Pembahasan:

Menyajikan hasil pengujian sistem, rekonstruksi citra, peningkatan kualitas citra, serta analisis hasil penelitian.

Bab V Kesimpulan dan Saran:

Memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan sistem *Electrical Impedance Tomography* di masa mendatang.

