

Desain Alat Ukur Kuat Medan Listrik dengan Sensor Elektroda Kapasitif dan Metode Kalibrasi Regresi Linier

Fadlil¹, Ardiansyah², Tole Sutikno³

Program Studi Magister Teknik Elektro,
Fakultas Teknik Industri,
Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta.

¹2307057007@webmail.uad.ac.id, ²ardiansyah@tif.uad.ac.id, ³tole@ee.uad.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan desain sensor dan teknik kalibrasi alat ukur medan listrik menggunakan sensor elektroda kapasitif dan rumus regresi linier untuk mengukur kuat medan listrik yang dihasilkan alat terapi kanker ECCT (*Electro Capacitive Cancer Therapy*). Tujuan utama dari penelitian ini adalah menghasilkan suatu desain sensor dan teknik kalibrasi yang dapat digunakan untuk mengembangkan lebih lanjut sistem pengukuran untuk keperluan cek kualitas medan listrik yang dihasilkan oleh alat terapi kanker ECCT sehingga efek terapi lebih maksimal. Sensor medan listrik didesain dari elektroda tembaga dengan ukuran 1x1cm dan tebal 0.1mm. Sensor dihubungkan dengan rangkaian pengkondisi sinyal dan dibaca oleh ADC mikrokontroler Arduino uno, lalu dikirimkan datanya ke komputer melalui port *serial USB converter*. Hasil pengujian alat ukur didapatkan rata-rata ketidakpastian mutlak sebesar 1.03, rata-rata prosentase error/ketidakpastian relatif sebesar 5%, akurasi pengukuran sebesar 95%, dan standar deviasi dari 50 sampel pengukuran sebesar 0.092.

Kata kunci: Alat ukur, Medan listrik, Terapi Kanker, Sensor elektroda aktif, Regresi linier

Abstract

This research proposes the design of a sensor and calibration technique for measuring electric field strength using capacitive electrode sensors and linear regression formulas for the Electro Capacitive Cancer Therapy (ECCT) cancer therapy device. The main objective of this research is to produce a sensor design and calibration technique that can be further developed into a measurement system for assessing the quality of the electric field generated by the ECCT cancer therapy device, thus maximizing the therapy effects. The electric field sensor is designed using copper electrodes measuring 1x1cm and 0.1mm thick. The sensor is connected to a signal conditioning circuit and read by the ADC of an Arduino Uno microcontroller, then its data is transmitted to a computer via a serial USB converter port. The testing results of the measurement device reveal an average absolute uncertainty of 1.03, an average percentage error/relative uncertainty of 5%, a measurement accuracy of 95%, and a standard deviation of 0.092 from 50 measurement samples.

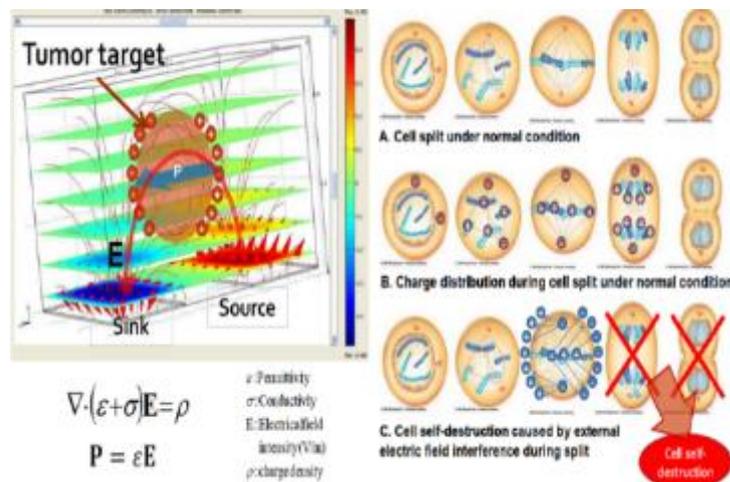
Keywords: Measurement device, Electric field, Cancer Therapy, Active electrode sensor, Linear regression

1. Pendahuluan

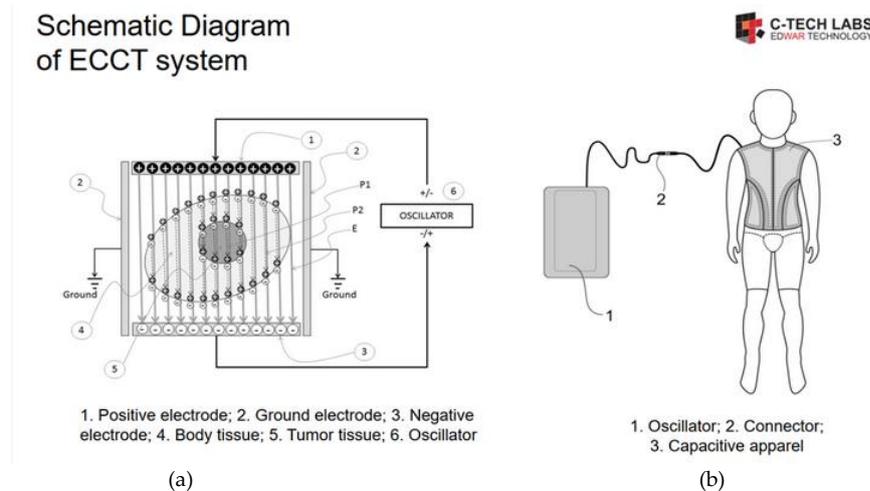
Kanker merupakan salah satu penyebab kematian utama di seluruh dunia, menyebabkan hampir 10 juta kematian pada tahun 2020, atau hampir satu dari enam kematian. Kanker paling umum adalah kanker payudara, paru-paru, usus besar dan rektum, serta kanker prostat. Sekitar sepertiga dari kematian akibat kanker disebabkan oleh penggunaan tembakau, indeks massa tubuh tinggi, konsumsi alkohol, asupan buah dan sayur yang rendah, dan kurangnya aktivitas fisik. Infeksi yang menyebabkan kanker, seperti human papillomavirus (HPV) dan hepatitis, bertanggung jawab atas sekitar 30% kasus kanker di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah rendah. Banyak jenis kanker dapat disembuhkan jika terdeteksi dini dan diobati secara efektif [1].

Salah satu penemuan baru alat terapi kanker di dunia adalah ECCT (electro capacitive cancer therapy) yang memanfaatkan radiasi medan listrik berdaya rendah yang mana medan listrik tersebut dihasilkan dari suatu perangkat elektronik dengan sumber tegangan baterai lithium ion lalu disalurkan ke Apparel yang di dalamnya terdapat elektroda tembaga untuk dipancarkan ke bagian tubuh pasien kanker. Berbeda dari Teknik penyembuhan kanker pada umumnya yaitu teknik radioterapi yang memanfaatkan Sinar-X dengan catu daya relatif besar yaitu antara 10 KV-300 KV dan teknik kemoterapi yang memanfaatkan obat-obatan untuk membunuh kanker, ECCT memanfaatkan medan listrik AC dengan frekuensi antara 100 kHz hingga 300 kHz dan intensitas rendah. Medan listrik kapasitif terbukti efektif menghambat proliferasi sel kanker payudara baik secara in vitro maupun in vivo, tanpa efek samping yang signifikan. Ini menunjukkan potensi terapi kanker dengan medan listrik kapasitif sebagai modalitas pengobatan baru [2] [3].

Prinsip dasar Electro-Capacitive Cancer Therapy (ECCT) adalah menghasilkan medan listrik di lokasi area tumor yang ditargetkan dengan modulasi tertentu (pola intensitas dan frekuensi). Hal ini bertujuan menciptakan distribusi medan listrik sedemikian rupa untuk mengganggu polarisasi listrik dalam sel kanker selama mitosis, menyebabkan penangguhan mitosis yang mengakibatkan kerusakan diri dari sel yang sedang membelah. Teknik ini juga dianggap sebagai stimulasi medan listrik non-kontak. Respons dari pengobatan ECCT tergantung pada polarisabilitas dan elastisitas sel terhadap rangsangan medan listrik eksternal; semakin polar dan elastis sel, semakin tinggi responsnya. Secara umum, semakin tinggi tingkat keganasan sel (lebih ganas), semakin cepat respons terhadap ECCT [4].



Gambar 1. Prinsip kerja alat terapi kanker berbasis radiasi medan listrik (ECCT)



Gambar 2. Skema diagram system ECCT (a) Diagram sistem elektroda, (b) system ECCT keseluruhan mulai dari oscillator, conector, dan capacitive apparel

Salah satu faktor yang memengaruhi efektifitas terapi adalah medan listrik yang dipancarkan oleh ECCT ke tubuh harus stabil dan tidak mengalami penurunan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Penurunan ini banyak diakibatkan oleh pelemahan komponen elektronik di dalam perangkat dan kerusakan elektroda pemancar. Oleh karena itu diperlukan suatu perangkat yang dapat digunakan untuk melakukan inspeksi kuat medan listrik pada perangkat ECCT. Sebenarnya untuk pengguna ECCT sudah dilengkapi dengan Electrified Field Detector (EFD) yaitu suatu alat untuk mendeteksi adanya medan listrik pada Apparel berupa indikator LED yang menyala dan adanya bunyi buzzer. Namun ini belum maksimal karena hasil pembacaannya hanya ditampilkan berupa indikator nyala LED dan bunyi buzzer belum berupa angka yang menyatakan nilai kuat medan listrik [5].

Dalam penelitian sebelumnya tentang sensor medan listrik sangat memungkinkan untuk membuat suatu perangkat sensor pengukur medan listrik secara non kontak. Salah satunya dengan prinsip efek medan listrik menggunakan Field Effect Transistor sebagai penguat sinyal. Cara ini dapat mendeteksi muatan pada permukaan konduktor yang menginduksi muatan pada grid FET, yang kemudian terdeteksi sebagai tegangan. Sinyal kemudian diproses lebih lanjut untuk bisa ditampilkan sebagai sebuah nilai tegangan. Metode ini sensitif dan akurat untuk mendeteksi tegangan pada sirkuit baik saat ada arus yang mengalir atau tidak [6]. Juga penelitian tentang penggunaan elektroda kapasitif sebagai sensor medan listrik yang berhasil membuktikan sistem pengukuran kuat medan listrik frekuensi daya berbasis sensor kapasitif keping sejajar dengan tingkat akurasi yang memadai untuk penerapan praktis [7]. Selain itu juga penelitian sensor medan listrik dengan 3 sensor elektroda yang diletakkan mengikuti sumbu x,y,z untuk mengakumulasi total kuat medan listrik dari 3 arah dengan menambahkan *Guard* berbentuk cincin melingkar. Sistem dianggap cocok untuk diterapkan pada platform baru seperti helm tenaga, drone, dan robot inspeksi tanah sub-stasi. Sistem ini memberikan informasi medan listrik yang akurat, memastikan keselamatan perangkat dan pekerja [8].

Salah satu tantangan dalam pengembangan sensor medan listrik dengan elektroda kapasitif yang bersifat analog dengan output yang masih berupa tegangan adalah perlunya suatu metode kalibrasi yang tepat agar hasil pengukuran sesuai dengan alat ukur yang dijadikan standar kalibrasi. Namun di sisi yang lain penggunaan sensor elektroda kapasitif untuk mengukur kuat medan listrik sangat praktis dan murah biayanya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan suatu sistem kalibrasi sensor kuat medan listrik sederhana dan murah biayanya namun hasil pengukurannya mendekati alat ukur standar. Sehingga sistem ini dapat digunakan sebagai dasar pengembangan alat ukur kuat medan listrik untuk pengukuran kuat medan listrik yang dipancarkan oleh alat terapi kanker berbasis medan listrik ECCT.

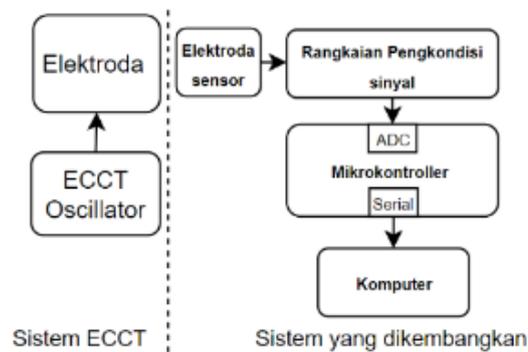
2. Metode

Metode yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian ini adalah:

1) Perancangan sistem, 2) Pembuatan prototipe, dan 3) Pengujian.

2.1. Perancangan Sistem

Berikut adalah diagram blok alat ukur kuat medan listrik dengan sensor elektroda kapasitif:

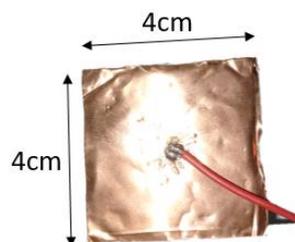


Gambar 3. Diagram blok alat ukur kuat medan listrik dengan sensor elektroda kapasitif

Pada sisi kiri terdapat sistem ECCT yang diukur dimana komponen utamanya adalah osilator sebagai pembangkit sinyal, dan elektroda sebagai pemancar. Sebelah kanan adalah sistem yang dikembangkan yang terdiri atas:

1. Elektroda sensor
2. Rangkaian pengkondisi sinyal
3. Pengubah Analog ke Digital/ Analog to Digital Converter (ADC)
4. Pengolah data
5. Pengirim data serial komputer

Elektroda sensor berfungsi untuk menangkap radiasi medan listrik yang dipancarkan oleh elektroda pemancar ECCT. Bahan yang digunakan berupa foil tembaga berukuran 10mmx10mm dengan tebal 0.1mm. berikut adalah desain dan bentuk elektroda sensor yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 4. Desain elektroda sensor

Hubungan dimensi sensor dengan kapasitansi dapat dilihat pada rumus berikut:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

Dimana, C adalah Kapasitansi (Farad), ϵ_0 adalah permitivitas di ruang hampa ($8.85 \times 10^{-12} \cdot 1 \text{cm}^2$), A adalah luas elektroda (m^2), dan d adalah jarak sensor dengan elektroda pemancar (m).

Rangkaian pengkondisi sinyal berfungsi untuk mengatur dan mengkondisikan sinyal yang ditangkap oleh elektroda sensor agar dapat diterima dan diproses dengan stabil dan tidak cacat oleh sistem selanjutnya yaitu rangkaian pengubah analog ke digital (analog to digital converter). Bagian ini terdiri atas Penguat sinyal (*Amplifier*), pendeteksi sinyal puncak (*peak detector*) dan pembagi tegangan (*voltage divider*) sekaligus tapsi lolos bawah (*low pass filter*) yang masing-masing bagian memiliki fungsi sendiri-sendiri.

Bagian penguat sinyal (*Amplifier*) komponen utamanya adalah Transistor Efek Medan (*Field Effect Transistor/FET*) dan beberapa resistor. Pada penelitian yang dilakukan oleh Shaoliang Wei, FET digunakan sebagai penguat sinyal karena sangat sensitif terhadap perubahan medan listrik [9]. Bagian ini berfungsi menguatkan arus dan tegangan dari sinyal yang diterima sensor sehingga tegangannya tidak drop ketika diproses oleh rangkaian selanjutnya. FET yang digunakan adalah J-FET tipe N. J-FET ini memiliki karakteristik *small signal input* yaitu dapat menerima masukan sinyal yang sangat kecil [10]. Komponen lain selain FET yang banyak digunakan oleh beberapa peneliti sebelumnya adalah Transistor Darlington [11], Penguat Operasional (*operational Amplifier*) [12], IC sensor khusus medan listrik PS25255 [13] yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Pada penelitian ini menggunakan penguat tipe FET karena cukup sensitif dan rangkaianannya praktis serta mudah didapat di pasaran.

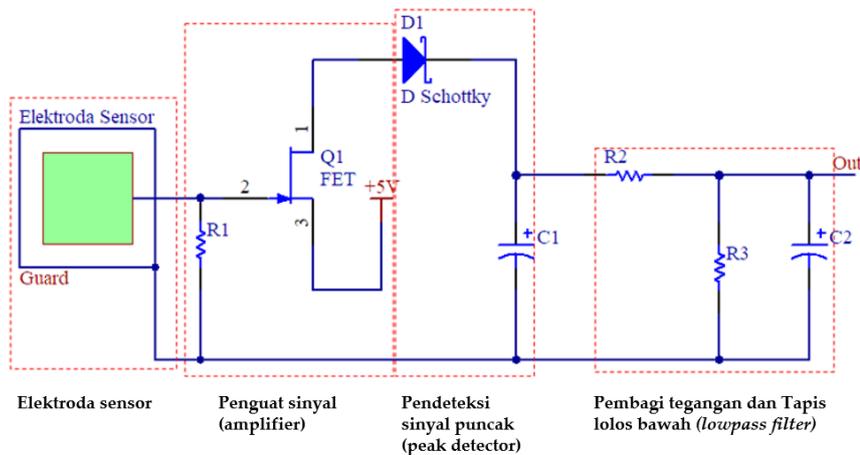
Selanjutnya adalah bagian deteksi sinyal puncak (*peak detector*) yang berfungsi untuk mengambil puncak positif dari setiap sinyal. Komponen utama rangkaian ini adalah dioda Schottky dan kapasitor. Dioda Schottky adalah jenis dioda yang memiliki kecepatan switching yang lebih tinggi dan tegangan jepit yang lebih rendah dibandingkan dengan dioda biasa. Dioda Schottky menggunakan junction logam-semikonduktor, sementara dioda biasa menggunakan junction pn. Lebih lanjut, dioda Schottky memiliki tegangan jepit lebih rendah karena tidak memiliki lapisan depletion yang ada pada dioda biasa, sehingga menghasilkan kecepatan switching yang lebih tinggi dan penurunan tegangan yang lebih rendah [14].

Bagian terakhir dari rangkaian pengkondisi sinyal adalah pembagi tegangan sekaligus filter lolos bawah (*lowpass filter*) yang berfungsi untuk membagi tegangan keluaran dari rangkaian sebelumnya menjadi lebih kecil untuk menyesuaikan dengan besaran input tegangan rangkaian selanjutnya dalam hal ini rangkaian pengubah analog ke digital sekaligus menghilangkan sinyal frekuensi tinggi (*noise*) yang masih lolos dari rangkaian sebelumnya. Bagian ini terdiri atas komponen utama dua resistor yang diseri dan satu buah kapasitor. Besarnya tegangan keluaran dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Dimana V_{out} (Volt) adalah tegangan output dari rangkaian, V_{in} (Volt) adalah tegangan input, R_1 adalah resistor diantara V_{out} dengan ground, dan R_2 adalah resistor diantara V_{in} dan V_{out} keduanya dinyatakan dalam ohm [15]. Jika kedua resistor bernilai sama maka tegangan output adalah setengah dari tegangan input.

Berikut rangkaian keseluruhan dari bagian sensor sampai pengkondisi sinyal:



Gambar 5. Sensor dan Rangkaian pengkondisi sinyal

Selanjutnya setelah sinyal diproses dan menjadi tegangan DC yang linier maka perlu diubah menjadi data digital agar mudah dalam pengolahan dan pengiriman. Rangkaian yang berfungsi merubah data analog ke digital biasa disebut dengan ADC (*Analog to Digital Converter*) [16]. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan ADC agar tepat sesuai kebutuhan antara lain jumlah masukan, jumlah bit cacahan/ resolusi, serta kecepatan sampling rate yang dinyatakan dalam *sampling per second*.

Banyaknya jumlah kanal masukan ADC disesuaikan dengan kebutuhan akan perangkat yang dikembangkan. Di pasaran ada yang hanya 1 kanal masukan hingga belasan kanal masukan. Besarnya resolusi akan berpengaruh pada tingginya akurasi pembacaan. Semakin banyak resolusi maka akan semakin banyak cacahan data dan semakin tinggi tingkat akurasi. Resolusi biasanya dinyatakan dalam tegangan per bit (V/bit) dimana bisa dilihat pada rumus (3) berikut:

$$\text{Resolusi ADC} = V_{in} \times \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (3)$$

Dimana, V_{in} adalah tegangan masukan, V_{ref} adalah tegangan referensi ADC, dan n adalah besarnya resolusi bit ADC dinyatakan dalam bit (8bit, 10 bit, 12 bit, hingga 16 bit). Dari rumus (3) tersebut dapat dipahami untuk meningkatkan akurasi selain dari jumlah bit juga dari tegangan referensi yang digunakan, sehingga jika menggunakan sekecil mungkin tegangan referensi maka akurasi juga akan semakin tinggi. Namun efek mengecilkan tegangan referensi membuat jangkauan pengukuran menjadi sempit. Oleh karena itu di beberapa penelitian sebelumnya dilakukan

2.2. Pembuatan Prototipe

Tahap pembuatan prototipe ini terdiri atas: Identifikasi kebutuhan, pengumpulan alat dan bahan, perakitan dan penyolderan. Identifikasi kebutuhan bertujuan untuk membatasi seberapa tinggi spesifikasi yang dibutuhkan disesuaikan dengan biaya dan kebutuhan. Identifikasi kebutuhan harus diperhatikan sebelum pengadaan alat dan bahan karena menjadi salah satu faktor dalam keberhasilan penelitian. Berdasarkan beberapa pertimbangan kebutuhan dan biaya maka berikut adalah beberapa komponen dan bahan utama penelitian ini:

1. Elektroda sensor
2. J-FET tipe N

3. Mikrokontroler Arduino Uno
4. Personal Komputer dan
5. Software Arduino IDE

Elektroda sensor menggunakan foil tembaga dengan tebal 0.1mm yang dapat ditemukan di pasaran baik online maupun offline. Tidak ada spesifikasi khusus dalam pembelian tembaga ini, hanya ukuran saja ada yang dalam bentuk lembaran dan gulungan.

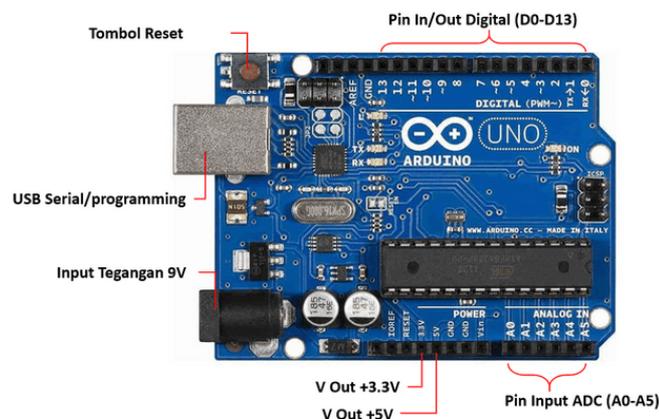
Komponen penguat sinyal menggunakan Transistor J-FET tipe N yang terdiri atas 3 pin yaitu *Gate* yang berfungsi sebagai input sensor, *Source* berfungsi sebagai sumber tegangan, dan *Drain* berfungsi sebagai keluaran. Bentuk J-FET bisa dilihat pada Gambar 6 berikut:



Gambar 6. Bentuk-bentuk J-FET

Untuk mengubah sinyal analog menjadi data digital dan mengolah hasil pembacaan data dalam penelitian ini menggunakan board Mikrokontroler Arduino Uno. Berdasarkan kebutuhan dan spesifikasi yang ditawarkan oleh situs penyedia board arduino antara lain tersedia fitur pembacaan ADC dengan resolusi 10bit sebanyak 6 kanal masukan, komunikasi serial 8 bit, kecepatan pengolahan data hingga 16MHz. besar resolusi ADC dan Tegangan referensi ini yang nanti berpengaruh pada range hasil pengukuran dan sensitifitas pengukuran. Jika resolusi sebesar 10 bit maka data yang dicacah sebanyak 1024, artinya jika tegangan referensi ADC sebesar 5V maka berdasarkan rumus (3) sensitifitas alat ukur berada pada 4.88mV. Untuk lebih jelasnya bisa melihat Gambar 6 dan Tabel 1.

Perangkat yang dibutuhkan selanjutnya adalah *Personal Computer* dan perangkat lunak Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino IDE bisa di unduh secara gratis karena bersifat terbuka (*open source*). Arduino IDE rilis terbaru adalah seri Arduino IDE 2.3.2, sedangkan yang digunakan untuk penelitian ini adalah seri IDE 2.2.1. Arduino. IDE ini menyediakan berbagai fitur dan alat yang memudahkan pengguna dalam menulis, mengunggah, dan mengelola kode program untuk mikrokontroler Arduino.



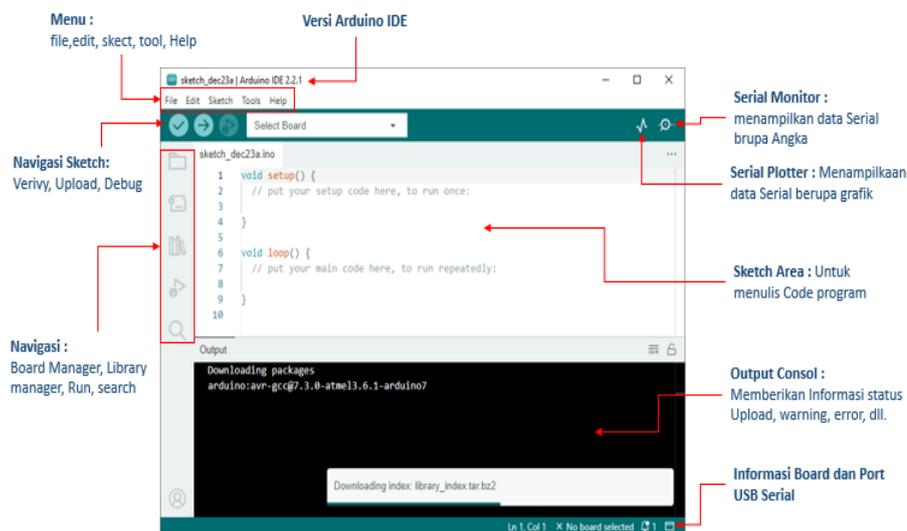
Gambar 7. Tampilan dan fungsi kaki Board Arduino Uno

Tabel 1. Spesifikasi Board Arduino Uno

| Aitem | Keterangan |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Board | Arduino UNO |
| Microcontroller | ATmega328P |
| USB connector | USB-B |
| Pin/ Kaki : | |
| • Masukan/Keluaran Digital | 14 |
| • Masukan Analog | 6 |
| • PWM | 6 |
| Komunikasi | UART, I2C, SPI |
| Daya : | |
| • Tegangan Masukan dan keluaran | 5 V |
| • Tegangan Suplai | 7-12 V |
| • Arus maksimal masukan dan keluaran | 20 mA |
| Kecepatan Clock : | |
| • Processor utama | 16 MHz |
| • USB-Serial | 16 MHz |
| Penyimpanan | 2KB SRAM, 32KB FLASH, 1KB EEPROM |
| Ukuran | |
| • Berat | 25 g |
| • Panjang | 53.4 mm |
| • Lebar | 68.6 mm |

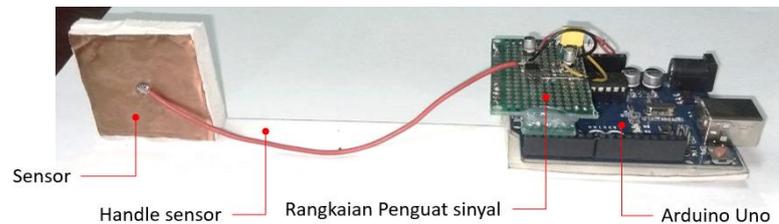
Salah satu fitur utama dari Arduino IDE adalah editor kode yang sederhana dan intuitif, yang memungkinkan pengguna untuk menulis program dalam bahasa pemrograman Arduino yang mudah dipahami. IDE ini juga dilengkapi dengan berbagai fungsi bantu, termasuk sintaks highlighting, auto-complete, dan indentasi otomatis, yang membantu pengguna dalam menulis kode dengan cepat dan akurat.

Selain itu, Arduino IDE memiliki kemampuan untuk mengelola berbagai jenis *Board* Arduino dan mikrokontroler yang didukung, termasuk Arduino Uno, Arduino Mega, dan Arduino Nano, serta varian-varian lainnya. Pengguna dapat dengan mudah memilih jenis papan yang ingin mereka gunakan melalui menu drop-down yang disediakan. Gambar 7 berikut adalah tampilan Arduino IDE:



Gambar 7. Tampilan dan deksripsi menu Perangkat lunak Arduino IDE versi 2.2.1

Setelah semua komponen dan bahan terkumpul langkah selanjutnya adalah perakitan dan penyolderan. Rangkaian pengkondisi sinyal dan sensor disolder pada papan PCB lubang di dihubungkan dengan kabel. Output dari rangkaian pengkondisi sinyal dimasukkan ke kaki pin ADC0 (A0). Data yang telah diolah akan dikirim ke komputer melalui komunikasi serial dengan kecepatan pengiriman 9600Bps. Data yang diterima oleh komputer akan ditampilkan oleh serial monitor Arduino IDE.



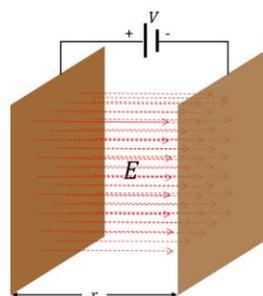
Gambar 8. Prototipe alat ukur medan listrik pada ECCT

2.3. Pengujian

Pengujian akan dilakukan dengan dua tahap, yaitu pertama membandingkan nilai keluaran sensor dibandingkan dengan perhitungan medan listrik untuk mendapatkan rumus kalibrasi, dan yang kedua membandingkan nilai keluaran sensor setelah kalibrasi dengan hasil perhitungan dan alat ukur yang ada di pasaran, dalam hal ini menggunakan EMF-839 keluaran Lutron.

Pengujian ini dilakukan dengan cara membuat sepasang elektroda yang mewakili elektroda ECCT sesuai Gambar 2(a), dengan ukuran 13cmx13cm dengan jarak antar elektroda 10cm kemudian meletakkan sensor diantara kedua elektroda. Untuk mewakili osilator ECCT digunakan *Signal Generator* Merk Tektronix seri AFG-2021 yang diset pada tegangan 1 hingga 20V pada frekuensi 100KHz dengan bentuk sinyal *Square Wave*.

Pengujian ini bertujuan untuk melihat perubahan tegangan output yang dikeluarkan oleh rangkaian pengkondisi sinyal terhadap tegangan masukan elektroda pemancar. Dari nilai itu akan didapat linieritas tegangan output sensor terhadap tegangan elektroda yang sebanding dengan nilai kuat medan listrik untuk selanjutnya nilai ini akan dibandingkan dengan nilai medan listrik sesuai perhitungan rumus kuat medan listrik pada plat sejajar, rumus (4) untuk dilakukan kalibrasi dengan menggunakan regresi linier. Rumus ini menyatakan bahwa besarnya kuat medan listrik diantara dua plat yang sejajar adalah sama sepanjang plat dan besarnya medan listrik tergantung pada tegangan dan jarak antar kedua plat [17, pp. 46–4]. Lebih jelasnya perhatikan Gambar 9 dan rumus (4) berikut:



Gambar 9. Medan listrik pada plat sejajar

$$E = \frac{V}{r} \tag{4}$$

Dimana, E adalah kuat medan listrik dinyatakan dalam V/m, V adalah beda potensial diantara kedua elektroda dinyatakan dalam Volt, dan r adalah jarak antar kedua elektroda dinyatakan dalam meter (m). Tegangan yang digunakan untuk pengujian dari 1V hingga 20V dengan frekuensi tetap 100KHz gelombang kotak (*square wave*).

Setelah dilakukan kalibrasi dari pengujian pertama selanjutnya perangkat juga akan dibandingkan dengan EMF-839 Lutron yaitu sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur medan listrik dengan dua pilihan sensor untuk jangkauan pengukuran frekuensi yang berbeda. Berikut bentuk dan spesifikasi EMF-839 Lutron:

Tabel 2. Spesifikasi Lutron EMF-839

| | |
|-------------------|---|
| Rangkaian | Custom one-chip of microprocessor LSI circuit |
| Tampilan | LCD size : 58 mm x 34 mm |
| Satuan Pengukuran | V/m, mW/cm ² , W/m ² |
| Akurasi | < 2 dB |
| Type sensor | EP-03H : 100 MHz to 3 GHz EP-04L : 100 kHz to 100 MHz |
| Impedansi sensor | 50 OHM |
| Pilihan jangkauan | EP-03H: 900 MHz, 1 GHz, 1.8 GHz, 2.4 GHz, 2.45 GHz, 3 GHz |
| Frekuensi | EP-04L: 100kHz, 200kHz, 500kHz, 1MHz, 10MHz, 13.56MHz, 100MHz |
| Jenis Sensor | Semiconductor 3 Axis |
| Tegangan masukan | Baterai DC 9 V adaptor DC 9V |
| Arus yang dipakai | 5.95 mA |
| Berat | 523 g/ 1.16 LB. |
| Ukuran | Perangkat utama : 200.0 x 76.2 x 36.8 mm Probe Sensor : 70 mm (diameter) x 290 mm (length) |
| Resolusi | 0 to 200.00 V/m : 0.01 V/m |
| Nilai efektif | > 1 V/m |



Gambar 10. Bentuk Lutron EMF-839

Gambar 11 adalah susunan alat ketika pengujian dimana sensor diletakkan pada posisi tengah kedua elektroda yang terhubung ke signal generator.



Gambar 11. Layout pengujian (a) alat yang dikembangkan, (b) membandingkan dengan Lutron EMF-839

2.4. Metode Kalibrasi

Kalibrasi adalah serangkaian kegiatan yang membentuk hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh instrumen ukur atau sistem pengukuran, atau nilai yang diwakili oleh bahan ukur, dengan nilai-nilai yang sudah diketahui yang berkaitan dari besaran yang diukur dalam kondisi tertentu [18]. Dengan kata lain, kalibrasi adalah kegiatan untuk menentukan kebenaran konvensional nilai penunjukkan alat ukur dan bahan ukur dengan cara membandingkan terhadap standar ukur yang dapat ditelusuri (*traceable*) ke standar nasional untuk satuan ukuran dan/atau internasional. Selain itu kalibrasi juga diartikan sebagai kegiatan peneraan untuk menentukan kebenaran nilai penunjukkan alat ukur dan/atau bahan ukur [19].

Tujuan kalibrasi secara umum adalah untuk mencapai ketertelusuran pengukuran. Hasil pengukuran dapat dikaitkan/ditelusuri sampai ke standar yang lebih tinggi/teliti (standar primer nasional dan / internasional), melalui rangkaian perbandingan yang tak terputus. Sedangkan tujuan kalibrasi dalam pengembangan alat ukur ini adalah untuk menyamakan hasil pembacaan alat ukur yang dikembangkan dengan hasil perhitungan rumus kuat medan listrik.

Perbandingan hasil pengukuran kemudian dicari korelasinya sehingga dihasilkan suatu rumus untuk digunakan sebagai nilai kalibrasi alat ukur. Untuk mendapatkan rumus kalibrasi ini digunakan suatu cara yang disebut regresi linier. Analisis/uji regresi merupakan suatu kajian dari hubungan antara satu variabel, yaitu variabel yang diterangkan (*the explained variabel*) dengan satu atau lebih variabel, yaitu variabel yang menerangkan (*the explanatory*). Apabila variabel bebasnya hanya satu, maka analisis regresinya disebut dengan regresi sederhana. Apabila variabel bebasnya lebih dari satu, maka analisis regresinya dikenal dengan regresi linear berganda [20]. Persamaan regresi linier sederhana merupakan suatu model persamaan yang menggambarkan hubungan satu variabel bebas/ predictor (X) dengan satu variabel tak bebas/ response (Y), yang biasanya digambarkan dengan garis lurus. Untuk rumus dasar dari regresi linier sederhana ini dapat dilihat pada Persamaan (5) berikut:

$$y = ax + b \quad (5)$$

Dimana y adalah garis regresi/ variabel respon, a adalah konstanta (*intercept*)/ perpotongan dengan sumbu vertical, b adalah konstanta regresi (*slope*), dan x adalah variabel bebas [20]. Untuk mencari rumus pendekatan tersebut, dilakukan pengambilan data kalibrasi dan hasil kalibrasi tersebut dijadikan acuan untuk mendapatkan rumus pendekatan dari *microsoft excel*, maka dilakukan langkah-langkah untuk mengubah tegangan terukur tersebut menjadi rumus yang akan digunakan sebagai dasar bagi mikrokontroler melakukan perhitungan [21].

Untuk mendapatkan rumus regresi linier bisa digunakan beberapa metode, seperti perhitungan manual, dengan aplikasi *Microsoft Excel*, atau dengan VScode Phyton. Untuk mendapatkan rumus regresi linier dengan aplikasi *Microsoft Excel* caranya adalah dengan memasukkan data yang ingin dikalibrasi sebagai x dan data referensi sebagai y pada lembar Excel secara menurun. Selanjutnya pilih data lalu *Klick insert-pilih X-Y scatter*, lalu klick OK. Lalu klick kanan pada node dan pilih *Add Trendline* dan centang pada pilihan *Display Equation* dan *display R-square*, maka akan tampil grafik dengan rumus regresi linier dengan susunan seperti rumus (4) di atas. Jika menggunakan aplikasi *VScode Phyton* bisa memanfaatkan modul *Scikit Learn* dipadukan dengan *Matplotlib* untuk menampilkan grafik [22].

Selanjutnya rumus tersebut dimasukkan ke dalam mikrokontroller arduino uno melalui perangkat arduino IDE untuk mengubah nilai keluaran sensor menjadi satuan medan listrik yaitu V/m.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

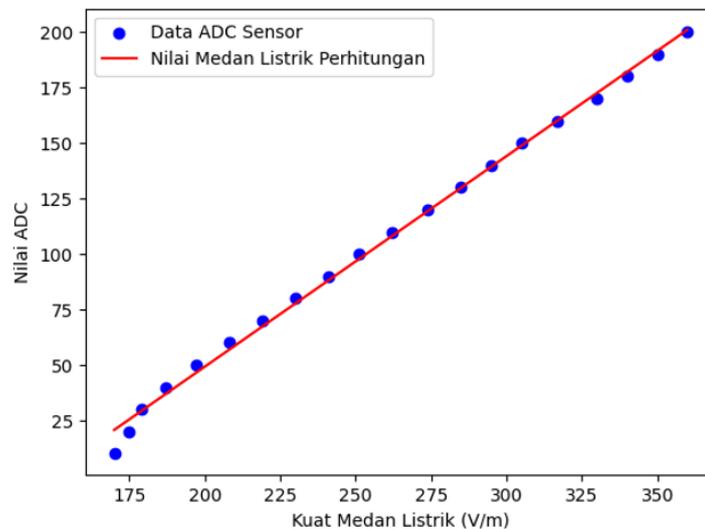
Hasil dari penelitian ini akan menampilkan hasil pengujian antara lain 1) nilai keluaran sensor sebelum dilakukan kalibrasi, 2) nilai keluaran sensor setelah kalibrasi, 3) perhitungan besar nilai ketidakpastian pengukuran, dan terakhir 4) nilai simpangan pengukuran (Standar Deviasi) dari 50 data pengukuran.

3.1. Nilai keluaran sensor sebelum dilakukan kalibrasi

Tabel 2 berikut adalah nilai keluaran sensor yang diukur pada titik keluaran rangkaian pengkondisi sinyal sebelum masuk ke port ADC arduino Uno dan setelah pembacaan ADC oleh Arduino.

Tabel 2. Data keluaran sensor sebelum dilakukan kalibrasi

| Tegangan Antar Elektroda (V) | Tagangan output sensor | | Nilai ADC Perhitungan | Error ADC |
|------------------------------|------------------------|----------|-----------------------|-----------|
| | Data Tegangan (V) | data ADC | | |
| 1 | 0.847 | 170 | 173 | -3 |
| 2 | 0.859 | 175 | 176 | -1 |
| 3 | 0.883 | 179 | 181 | -2 |
| 4 | 0.924 | 187 | 189 | -2 |
| 5 | 0.973 | 197 | 199 | -2 |
| 6 | 1.025 | 208 | 210 | -2 |
| 7 | 1.077 | 219 | 221 | -2 |
| 8 | 1.13 | 230 | 231 | -1 |
| 9 | 1.183 | 241 | 242 | -1 |
| 10 | 1.236 | 251 | 253 | -2 |
| 11 | 1.29 | 262 | 264 | -2 |
| 12 | 1.344 | 274 | 275 | -1 |
| 13 | 1.397 | 285 | 286 | -1 |
| 14 | 1.451 | 295 | 297 | -2 |
| 15 | 1.506 | 305 | 308 | -3 |
| 16 | 1.559 | 317 | 319 | -2 |
| 17 | 1.612 | 330 | 330 | 0 |
| 18 | 1.666 | 340 | 341 | -1 |
| 19 | 1.719 | 350 | 352 | -2 |
| 20 | 1.772 | 360 | 363 | -3 |



Gambar 13. Grafik perbandingan Data ADC sensor dengan Medan listrik dengan pendekatan perhitungan

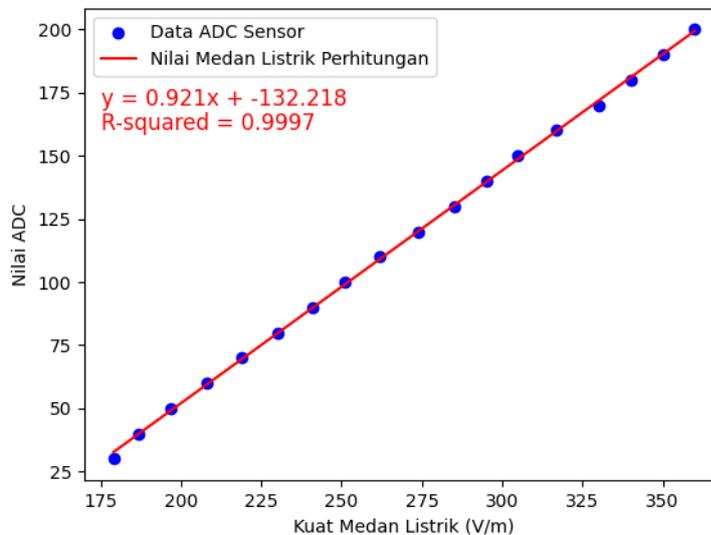
Dari Tabel 2 ketidakpastian (*error*) tertinggi pembacaan ADC bernilai -3 bit dan rata-rata -2 bit. Ini berarti ada selisih pembacaan antara perhitungan dan pengukuran yang nilainya negatif (-) artinya, data akhir ADC harus dikurangi 2 hingga 3bit agar sesuai dengan rumus perhitungan ADC. Adanya selisih ini akan berakibat pada pengurangan nilai tegangan sensor perhitungan dengan nilai terukur sebesar maksimal 14.6 mV dan rata-rata sebesar 9.7 mV. Pada Tabel 3 dan Gambar 13 ditampilkan data perbandingan pembacaan ADC sensor dengan nilai kuat medan listrik perhitungan.

Grafik pada Gambar 13 menunjukkan bahwa nilai ADC sensor pada tegangan elektroda 1Vpp dan 2 Vpp terlihat tidak linier dengan data di atasnya. Mungkin ini diakibatkan karena pada tegangan elektroda 1Vpp dan 2Vpp medan listrik yang dihasilkan rendah sehingga tegangan keluaran sensor menjadi rendah dan tidak terbaca dengan baik oleh ADC. Jika kita amati pada tabel 2 selisih nilai adc pada tegangan input 1 hingga 3Vpp sangat kecil yaitu skitar 4 hingga 5 bit sedangkan pada input tegangan elektroda 4Vpp hingga seterusnya selisih data ADC bisa hingga 10bit. Ini membuktikan memang sensitifitas sensor lemah pada level medan listrik 10V/m hingga 20V/m. Jika diperhatikan pada Tabel 3, pada nilai medan listrik yang >30V/m setiap kenaikan nilai medan listrik 10V/m data pembacaan ADC naik 10 bit secara konstan. Ini berarti pada rentang nilai medan listrik yang >30V/m akurasi pembacaan alat ukur adalah 1V/m.

Selanjutnya untuk mendapatkan rumus kalibrasi kita gunakan data yang linier yaitu 3V hingga 20Vpp agar mendapatkan nilai *R-Square* yang mendekati 1. Nilai *R-square* ini menandakan bahwa semakin mendekati dengan angka 1 maka korelasi antara data yang dibandingkan dengan data referensi semakin mirip atau linier [22]. Dari data tegangan 3Vpp hingga 20Vpp kemudian dilakukan pengolahan dengan aplikasi VScode python dan didapat grafik linieritas dan nilai *R-square* seperti tertera pada Gambar 14.

Tabel 3. Data pembacaan ADC sensor dibandingkan dengan perhitungan kuat medan listrik

| Tegangan Antar Elektroda (Vpp) | Data ADC Kuat medan listrik | Nilai Kuat Medan listrik perhitungan (V/m) | Kenaikan Nilai ADC Setiap Kenaikan 10V/m |
|--------------------------------|-----------------------------|--|--|
| 1 | 170 | 10 | 5 |
| 2 | 175 | 20 | 4 |
| 3 | 179 | 30 | 8 |
| 4 | 187 | 40 | 10 |
| 5 | 197 | 50 | 11 |
| 6 | 208 | 60 | 11 |
| 7 | 219 | 70 | 11 |
| 8 | 230 | 80 | 11 |
| 9 | 241 | 90 | 10 |
| 10 | 251 | 100 | 11 |
| 11 | 262 | 110 | 12 |
| 12 | 274 | 120 | 11 |
| 13 | 285 | 130 | 10 |
| 14 | 295 | 140 | 10 |
| 15 | 305 | 150 | 12 |
| 16 | 317 | 160 | 13 |
| 17 | 330 | 170 | 10 |
| 18 | 340 | 180 | 10 |
| 19 | 350 | 190 | 10 |
| 20 | 360 | 200 | |



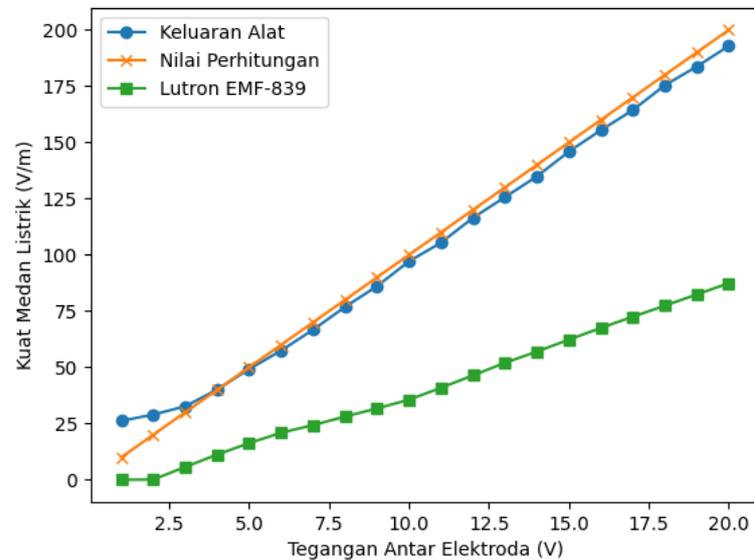
Gambar 14. Grafik linieritas ADC sensor terhadap nilai medan listrik perhitungan

3.2. Keluaran sensor setelah dilakukan kalibrasi

Setelah dilakukan kalibrasi dari data pengukuran sebelumnya dengan memasukkan rumus regresi linier ke dalam listing program arduino IDE. Selanjutnya dilakukan pengujian kembali dengan alat pembanding yang sama yaitu Lutron EMF-839, namun dengan tegangan uji yang berbeda yaitu dimulai dari tegangan 10V hingga 20Vpp. Ini karena alat uji embanding pada tegagan rendah kurang dari 10Vpp tidak bisa menampilkan angka hasil pengukuran (hasilnya 0V/m). Tabel 4 dan Gambar 14 berikut adalah hasil pengukuran alat setelah dilakukan kalibrasi:

Tabel 4. Hasil pengujian alat ukur setelah dilakukan kalibrasi dengan rumus regresi linier

| Tegangan Antar Elektroda (V _{pp}) | Kuat Medan Listrik (V/m) | | |
|---|--------------------------|-------------------|----------------|
| | Alat yang dikembangkan | Perhitungan E=V/r | Lutron EMF-839 |
| 1 | 26.2 | 10 | 0 |
| 2 | 28.97 | 20 | 0.1 |
| 3 | 32.65 | 30 | 5.7 |
| 4 | 40.1 | 40 | 11.2 |
| 5 | 49.22 | 50 | 16.3 |
| 6 | 57.44 | 60 | 20.9 |
| 7 | 66.73 | 70 | 24.3 |
| 8 | 76.85 | 80 | 28.1 |
| 9 | 86.1 | 90 | 31.7 |
| 10 | 97.12 | 100 | 35.6 |
| 11 | 105.41 | 110 | 40.9 |
| 12 | 116.46 | 120 | 46.4 |
| 13 | 125.67 | 130 | 52 |
| 14 | 134.88 | 140 | 57 |
| 15 | 145.93 | 150 | 62.3 |
| 16 | 155.42 | 160 | 67.5 |
| 17 | 164.35 | 170 | 72.5 |
| 18 | 175.4 | 180 | 77.4 |
| 19 | 183.7 | 190 | 82.4 |
| 20 | 192.9 | 200 | 87.4 |

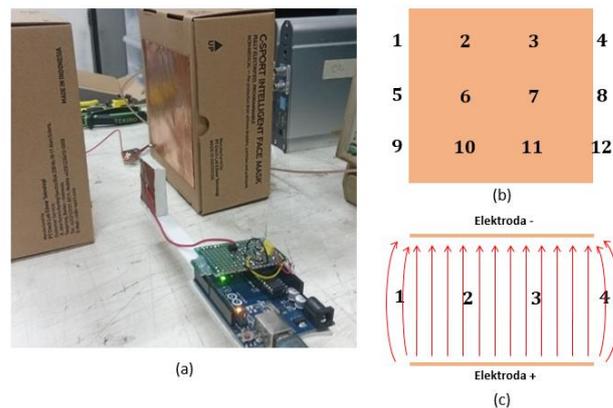


Gambar 14. Grafik hasil pengukuran setelah kalibrasi dibandingkan dengan pengukuran dan Lutron EMF-839

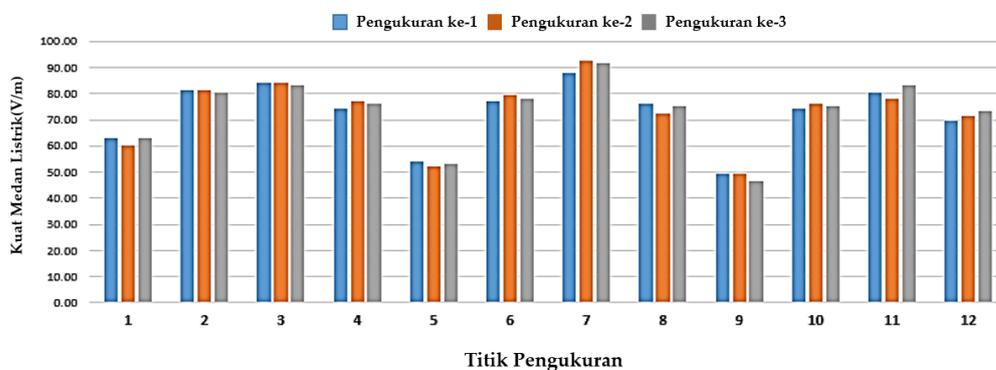
Pada grafik Gambar 14 di atas dapat dilihat bahwa setelah dilakukan kalibrasi rentang nilai pengukuran hampir mirip dengan perhitungan dan cukup linier. Hanya saja pada tegangan rendah 1V_{pp} dan 2V_{pp} nilai kuat medan selisihnya sangat kecil. Sedangkan Lutron EMF-839 memiliki nilai pembacaan yang berbeda intensitasnya, namun masih mengikuti perubahan tegangan elektroda secara linier. Hal ini mungkin disebabkan oleh metode dan karakter sensor pembacaannya berbeda. Lutron-EMF-839 ini memang memiliki jumlah sensor yang lebih banyak yaitu 3 sumbu. Karakter pengukurannya mirip

dengan alat yang dikembangkan dimana pada tegangan rendah juga sulit untuk bisa membaca perubahan.

Selanjutnya juga dilakukan pengujian dengan variasi posisi elektroda di sepanjang permukaan elektroda. Tujuan dari pengujian adalah membuktikan bahwa medan listrik di sepanjang kedua plat dengan jarak yang sama, akan menghasilkan medan listrik yang sama, kecuali pada tepi plat dikarenakan efek tepi (*fringe effect*), dimana garis-garis medan listrik menyebar keluar dari batas elektroda, sehingga medan listrik menjadi tidak seragam di tepi pelat. Hal ini menyebabkan penyimpangan dari medan seragam yang ideal di antara pelat [23]. Gambar 15 berikut adalah posisi pengukuran pada elektroda uji:



Gambar 15. Posisi pengukuran distribusi medan listrik di sepanjang permukaan elektroda (a) tampilan Posisi Alat ketika mengukur, (b) desain titik pengukuran pada permukaan elektroda tampak samping, (c) desain titik pengukuran tampak atas



Gambar 16. Hasil pengukuran pada titik yang berbeda sepanjang garis tengah antar elektroda

Pada gambar 16 di atas terlihat bahwa pada titik pengukuran 2,3,6,7,10,11 nilainya cukup tinggi dan seragam, sedangkan pada titik 1,5, 9 ini paling rendah nilainya karena sudah menyebar keluar. Untuk titik 4, 8, dan 12 ini harusnya sama dengan titik 1,5,9, namun karena posisi pengukuran dimana kabel sensor dan alat berada di area antara dua elektroda maka akan menambah kuat medan listrik yang masuk ke perangkat sensor. Dari pengujian ini kita bisa menyimpulkan bahwa, pada tepi luar elektroda masih terdapat medan listrik yang merupakan efek dari menyebarnya medan listrik. Selain itu juga perlu adanya *shielding* pada body alat ukur khususnya penguat sensor agar medan listrik yang tidak diharapkan terukur tidak mengganggu pengukuran.

3.3. Ketidakpastian Pengukuran (*Error*)

Keandalan pengukuran dapat dilihat dari tingkat Ketidakpastian antara hasil yang sebenarnya dengan yang terbaca pada alat ukur. Ketidakpastian bersistem akan menyebabkan hasil yang diperoleh menyimpang dari hasil sebenarnya [24]. Ketidakpastian ini dapat diminimalisir. Sumber-sumber ketidakpastian bersistem ini penyebabnya antara lain:

1. Kesalahan kalibrasi alat, dapat diketahui dengan membandingkannya dengan alat yang lain.
2. Kesalahan titik nol (KTN).
3. Kerusakan komponen alat, misalnya pegas yang telah lama dipakai sehingga menjadi tidak elastis lagi.
4. Gesekan.
5. Kesalahan paralaks.
6. Kesalahan karena keadaan saat bekerja, kondisi alat pada saat dikalibrasi berbeda dengan kondisi pada saat alat bekerja [24].

Untuk menghitung ketidakpastian pengukuran pada suatu alat ukur dapat menggunakan beberapa rumus berikut:

$$Error = V_U - V_S \quad (6)$$

$$Mean Absolute Error (MEA) = \sum_{t=1}^n V_U - V_S \quad (7)$$

$$Mean Square Error (MSA) = \sum_{t=1}^n \frac{(V_U - V_S)^2}{n} \quad (8)$$

$$Root Mean Square Error (RMSA) = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{(V_U - V_S)^2}{n}} \quad (9)$$

$$Mean Absolute Percentage Error (MAPE) = \sum_{t=1}^n \frac{V_U - V_S}{V_S} \quad (10)$$

Dari Tabel 5 didapatkan bahwa rata-rata ketidakpastian mutlak sebesar 4.72, rata-rata prosentase error/ ketidakpastian relatif sebesar 14%, dan akurasi pengukuran sebesar 86%. Semakin baik mutu alat ukur, semakin kecil ketidakpastian pengukuran (*Error*) yang diperoleh. Semakin kecil ketidakpastian mutlak (*Absolute Error*) akan semakin tepat hasil pengukuran, dan semakin kecil ketidakpastian relatif (*Mean Absolute Percentage Error*), makin tinggi ketelitian yang dicapai pada pengukuran [24].

3.4. Standar Deviasi Alat Ukur

Standard deviasi dalam konteks pengukuran menggambarkan selisih antara tiap hasil pengukuran dari nilai rata-ratanya [24]. Dalam pengukuran, standard deviasi memberikan informasi tentang seberapa jauh titik data individual tersebar dari rata-rata. Artinya, jika standard deviasi rendah berarti hasil pengukuran menunjukkan presisi yang lebih tinggi dalam alat ukur tersebut. Sebaliknya, jika standard deviasinya tinggi, menunjukkan ketidakpastian (*error*) yang lebih besar dalam pengukuran. Rumus standar deviasi (11) dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

dimana, σ adalah Standar Deviasi, x_i adalah data pengukuran ke- n , x' adalah nilai rata-rata, dan n adalah jumlah data. Untuk menghitung standar deviasi dibutuhkan pengulangan pengambilan data pengukuran dalam satu nilai input. Dalam perhitungan standar deviasi

ini digunakan data sebanyak 50 data dengan kondisi tegangan antar elektroda diatur pada 10Vpp dan posisinya berapa di tengah antar elektroda. Perhitungan yang telah kami lakukan dengan rumus excel (12) hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5 dimana dari data sebanyak 50, didapat standar deviasi sebesar 0.807.

$$\text{Standar Deviasi} = \text{STDEV. S}(\text{data ke} - 1 ; \text{hingga data ke} - n) \tag{12}$$

Tabel 5. Perhitungan ketidakpastian pengukuran alat ukur yang dikembangkan beserta nilai hasil perhitungan

| Tegangan Antar Elektroda (Vpp) | Kuat Medan Listrik (V/m) | | error | absolute error | Square error | Absolute Percentage error |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------|---------------|----------------|---------------|---------------------------|
| | Alat yang dikembangkan | erhitungan E=V/r | | | | |
| 1 | 26.2 | 10 | 16.20 | 16.20 | 262.44 | 1.62 |
| 2 | 28.97 | 20 | 8.97 | 8.97 | 80.46 | 0.45 |
| 3 | 32.65 | 30 | 2.65 | 2.65 | 7.02 | 0.09 |
| 4 | 40.1 | 40 | 0.10 | 0.10 | 0.01 | 0.00 |
| 5 | 49.22 | 50 | -0.78 | 0.78 | 0.61 | 0.02 |
| 6 | 57.44 | 60 | -2.56 | 2.56 | 6.55 | 0.04 |
| 7 | 66.73 | 70 | -3.27 | 3.27 | 10.69 | 0.05 |
| 8 | 76.85 | 80 | -3.15 | 3.15 | 9.92 | 0.04 |
| 9 | 86.1 | 90 | -3.90 | 3.90 | 15.21 | 0.04 |
| 10 | 97.12 | 100 | -2.88 | 2.88 | 8.29 | 0.03 |
| 11 | 105.41 | 110 | -4.59 | 4.59 | 21.07 | 0.04 |
| 12 | 116.46 | 120 | -3.54 | 3.54 | 12.53 | 0.03 |
| 13 | 125.67 | 130 | -4.33 | 4.33 | 18.75 | 0.03 |
| 14 | 134.88 | 140 | -5.12 | 5.12 | 26.21 | 0.04 |
| 15 | 145.93 | 150 | -4.07 | 4.07 | 16.56 | 0.03 |
| 16 | 155.42 | 160 | -4.58 | 4.58 | 20.98 | 0.03 |
| 17 | 164.35 | 170 | -5.65 | 5.65 | 31.92 | 0.03 |
| 18 | 175.4 | 180 | -4.60 | 4.60 | 21.16 | 0.03 |
| 19 | 183.7 | 190 | -6.30 | 6.30 | 39.69 | 0.03 |
| 20 | 192.9 | 200 | -7.10 | 7.10 | 50.41 | 0.04 |
| | | Total | -38.50 | 94.34 | 660.50 | 2.70 |
| Mean Absolute error (MAE) | | | 4.72 | | | |
| Mean Absolute Percentage Error (MAPE) | | | 14% | | | |
| Akurasi | | | 73% | | | |

Tabel 5 berikut adalah hasil perhitungan standar deviasi alat ukur dengan fungsi excel

| Data ke-n | Hasil | Data ke-n | Hasil | Data ke-n | Hasil | Data ke-n | Hasil | Data ke-n | Hasil |
|-----------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------------|
| 1 | 95.277 | 11 | 94.356 | 21 | 95.277 | 31 | 95.277 | 41 | 96.198 |
| 2 | 95.277 | 12 | 96.198 | 22 | 95.277 | 32 | 95.277 | 42 | 96.198 |
| 3 | 96.198 | 13 | 94.356 | 23 | 95.277 | 33 | 94.356 | 43 | 95.277 |
| 4 | 95.277 | 14 | 94.356 | 24 | 95.277 | 34 | 95.277 | 44 | 94.356 |
| 5 | 96.198 | 15 | 97.119 | 25 | 96.198 | 35 | 97.119 | 45 | 94.356 |
| 6 | 95.277 | 16 | 97.119 | 26 | 97.119 | 36 | 96.198 | 46 | 96.198 |
| 7 | 95.277 | 17 | 95.277 | 27 | 95.277 | 37 | 95.277 | 47 | 95.277 |
| 8 | 95.277 | 18 | 95.277 | 28 | 96.198 | 38 | 95.277 | 48 | 97.119 |
| 9 | 95.277 | 19 | 95.277 | 29 | 95.277 | 39 | 93.435 | 49 | 95.277 |
| 10 | 96.198 | 20 | 95.277 | 30 | 96.198 | 40 | 95.277 | 50 | 95.277 |
| Standar Deviasi | | | | | | | | | 0.807 |

3.5. Pembahasan

Pada paper ini dibahas tentang perancangan sensor kuat medan listrik menggunakan foil elektroda tembaga dengan ukuran 4x4cm. Jenis sensor ini dipilih karena mudah didapatkan dengan biaya pembuatan yang rendah. Untuk menguatkan sinyal hasil

penangkapan sensor digunakan komponen transistor J-FET karena rangkaiannya cukup sederhana dan mudah didapat, namun sangat sensitive pada perubahan kuat medan listrik. Terbukti dari hasil pengujian bahwa sensor mampu menghasilkan nilai keluaran yang linier pada tegangan uji yang kecil dari rentang 1 Vpp hingga 20 Vpp.

Rangkaian pembaca ADC yang digunakan pada penelitian ini adalah ADC Atmega328 milik Arduino UNO dengan resolusi 10 bit dan tegangan referensi sebesar 5V. Dengan demikian secara teori resolusi tegangan yang dapat dibaca rangkaian adalah 4.8mV. Nilai ini cukup untuk membaca perubahan medan listrik tiap kenaikan 1V/m. Kedepannya untuk meningkatkan resolusi dan akurasi alat dapat digunakan perangkat dengan nilai resolusi ADC yang lebih tinggi dan tegangan referensi yang disesuaikan.

4. Kesimpulan

Alat ukur medan listrik dengan sensor elektroda kapasitansi dan metode kalibrasi regresi linier yang telah dibuat mampu mengukur kuat medan listrik yang dihasilkan oleh sepasang elektroda pemancar berdimensi 13cm x13cm dengan jarak 10cm yang dihubungkan pada sumber tegangan berbentuk Kotak (*Square wave*) dengan frekuensi 100KHz dan tegangan mulai dari 1V hingga 20Vpp. Selanjutnya dari hasil pengujian setelah dilakukan kalibrasi didapat rata-rata ketidakpastian mutlak sebesar 4.72, rata-rata prosentase error/ ketidakpastian relatif sebesar 14%, akurasi pengukuran sebesar 84%, dan standar deviasi dari 50 sampel pengukuran sebesar 0.807.

Ucapan Terimakasih

Kami mengucapkan terimakasih kepada PT Ctech Lab Edwar Teknologi yang telah memberikan dukungan peralatan, bahan dan tempat penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] WHO, "The top 10 causes of death." Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- [2] F. Alamsyah, I. N. Ajrina, F. N. A. Dewi, D. Iskandriati, S. A. Prabandari, and W. P. Taruno, "Antiproliferative Effect of Electric Fields on Breast Tumor Cells In Vitro and In Vivo," *Indonesian Journal of Cancer Chemoprevention (IJCC)*, vol. 6, no. 3, p. 71, Jan. 2017, doi: 10.14499/indonesianjcanchemoprev6iss3pp71-77.
- [3] Y. Setyaji, "Efek Terapi Electro-Capacitive Cancer Therapy (ECCT) terhadap Profil Leukosit dan Rasio CD4+/CD8+ Sukarelawan Sehat," Universitas Gadjah Mada, 2020.
- [4] A. Fontana, *19 tahun inovasi ketenagalistrikan Indonesia: PLN berinovasi untuk Indonesia*. PLN, 2016.
- [5] D. Aribowo and H. Hamzah, "Analisa Desain Sensor Electrical Field Detector (EFD)," *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 3, no. 1, pp. 1-7, Mar. 2016, doi: 10.36055/setrum.v3i1.492.
- [6] S. Wei, L. Zhang, W. Gao, and Z. Cao, "Non-contact Voltage Measurement Based on Electric-Field Effect," *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 1973-1977, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.368.
- [7] W. Zhu, J. Guo, G. Zhang, D. Yao, S. Zhang, and S. Qian, "Research and Design of Power Frequency Electric Field Measurement System," *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 740-745, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.107>.

- [8] C. Suo, R. Wei, W. Zhang, and Y. Li, "Research on the Three-Dimensional Power Frequency Electric Field Measurement System," *Journal of Sensors*, vol. 2021, pp. 1–15, Sep. 2021, doi: 10.1155/2021/8859022.
- [9] S. Wei, L. Zhang, W. Gao, and Z. Cao, "Non-contact Voltage Measurement Based on Electric-Field Effect," *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 1973–1977, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.368.
- [10] componentsinfo.com, "2N5457 Transistor Pinout, Equivalent, Uses, Features, Applications." Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.componentsinfo.com/2n5457-transistor-pinout-equivalent/>
- [11] M. Reza and H. A. Rahman, "Non-Invasive Voltage Measurement Technique for Low Voltage AC Lines," in *2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, China: IEEE, May 2021, pp. 143–148. doi: 10.1109/ICET51757.2021.9450978.
- [12] M. A. Haberman and E. M. Spinelli, "A Noncontact Voltage Measurement System for Power-Line Voltage Waveforms," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 6, pp. 2790–2797, Jun. 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2926877.
- [13] D. Roggen, A. P. Yazdan, F. J. Ordóñez Morales, R. J. Prance, and H. Prance, "Electric field phase sensing for wearable orientation and localisation applications," in *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, Heidelberg Germany: ACM, Sep. 2016, pp. 52–53. doi: 10.1145/2971763.2971774.
- [14] B. G. Streetman and S. Banerjee, *Solid state electronic devices*, vol. 4, Prentice hall New Jersey, 2000.
- [15] P. Horowitz, W. Hill, and I. Robinson, *The art of electronics*, vol. 2, Cambridge university press Cambridge, 1989.
- [16] D. Hariyanto, "Analog to digital converter," *diperoleh dari: www.staff.uny.ac.id [diakses 14 Juli 2018]*, 2015.
- [17] M. R. Lindeburg, *Engineer-in-training reference manual*, 8th ed, Professional Publications, Inc., 1992.
- [18] Z. Grkov, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)*, Bureau of Standardization and Metrology, 1998.
- [19] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 54 Tahun 2015 Tentang Pengujian Dan Kalibrasi Alat Kesehatan," 2015.
- [20] B. Darma, *Statistika Penelitian Menggunakan SPSS (Uji Validitas, Uji Reliabilitas, Regresi Linier Sederhana, Regresi Linier Berganda, Uji t, Uji F, R2)*, Guepedia, 2021.
- [21] J. Jumrianto, "Kalibrasi Sensor Tegangan dan Sensor Arus dengan Menerapkan Rumus Regresi Linear menggunakan Software Bascom AVR," *Journal of Systems, Information Technology, and Electronics Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [22] R. Kaestria and E. F. Himmah, "Implementasi Bahasa Pemrograman Python untuk Path analysis," *Jurnal Komputasi*, vol. 11, no. 2, pp. 105–117, 2023.
- [23] W. Hayt and J. Buck, *Engineering electromagnetics*, 8th ed, McGraw-Hill Companies, Inc, 2012.
- [24] N. Nurlina, R. Riska, and R. Karim, "Alat Ukur dan Pengukuran," *Makassar: LPP Unismuh Makassar*, 2019.