

RANCANG BANGUN ALAT UKUR MEDAN LISTRIK

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun oleh :

REDY RENANDAPRADANA

NIM. 0310632031 - 63

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2007

ABSTRAK

Redy Renandapradana, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2006, **Rancang Bangun Alat Ukur Medan Listrik**, Dosen Pembimbing : **Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT & Ir. Chairuzzaini**.

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk melakukan rancang bangun suatu “Alat Ukur Medan Listrik” dengan mengaplikasikan hukum Coulomb dan hukum Gauss.

Perangkat instrumentasi tersebut digunakan untuk mengetahui kuat medan listrik pada suatu media dari pengaruh suatu sumber listrik. Perangkat ini dirancang dengan metode yang sederhana tetapi masih mengedepankan keakuratan besaran nilai kuat medan yang diukur.

Perangkat alat ukur medan listrik ini dirancang dengan prinsip generator dan sinyal pengukurannya diproses secara elektronik dengan tampilan digital. Hasil perancangan nantinya akan diuji untuk mendapatkan besar kesalahan dan koreksi alat ukur medan listrik statis dengan rentang pengukuran 0,1 – 99,9 kV/m. Sensor yang digunakan adalah kepingan plat dengan mengaplikasikan hukum Coulomb dan Gauss dengan cara menimbulkan perubahan fluksi medan listrik yang menerpa elektroda ukur.

Hasil yang diperoleh dari pengujian perangkat instrumentasi ini mendekati nilai hasil dari perancangan. Tingkat kesalahan keluaran dari perangkat ini sebesar 2%. Range pengukuran dari alat ukur medan dengan metode ini lebih mudah untuk diatur, biaya pembuatan yang lebih ekonomis dan hasil yang maksimal.

Kata Kunci : Alat Ukur, Medan Listrik

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya. Dengan izin Allah SWT, skripsi yang berjudul “**Rancang Bangun Alat Ukur Medan Listrik**” dapat terselesaikan dengan baik.

Selanjutnya, ucapan terimakasih yang sedalam-dalamnya, disampaikan kepada semua pihak yang telah ikut membantu selama pelaksanaan skripsi ini, terutama ditujukan kepada:

1. Ir. Heru Nurwarsito, M Kom, selaku Ketua Jurusan dan Rudy Yuwono, ST. M.Sc, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
2. Drs.Ir. Moch.Dhofir, MT, dan Ir.Chairuzzaini selaku dosen pembimbing, terimakasih atas masukan, saran, bimbingan dan kesabarannya.
3. Seluruh Pengajar dan Staf Administrasi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
4. Kedua orangtua Bpk Sunarso dan Ibu Lilik Kustini serta keluarga besar, terimakasih atas perhatian, dorongan serta semangat moril maupun materil selama ini.
5. Rekan-rekan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Semua pihak yang telah membantu secara moril maupun materil selama kegiatan ini berlangsung yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Disadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu kritik serta saran sangat diharapkan demi kesempurnaan penyusunan skripsi ini.

Akhirnya, diharapkan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa dan bagi seluruh pembaca.

Malang, Agustus 2007

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PERSETUJUAN DOSEN PENGUJI.....	iii
ABSTRAK.....	iv
PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Ruang Lingkup Masalah.....	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Sisematika Penulisan	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Umum Medan Listrik.....	4
2.2. Gaya dan Garis Gaya Medan Listrik	4
2.3. Hukum Gauss.....	6
2.4. Pengukuran Medan Listrik Statis.....	7
2.5. Penguat Kerja.....	10
2.5.1. <i>Op-Amp</i> Sebagai Penguat <i>Non Inverting</i>	11
2.5.2. Penyearah Setengah Gelombang.....	12
2.6. <i>AD Converter</i>	13
2.7. <i>Decorder Seven Segment</i>	15
2.8. Karakteristik Kerja Alat Ukur.....	16

BAB III METODOLOGI PERANCANGAN

3.1. Studi Literatur	18
----------------------------	----



3.2. Perancangan Alat Ukur Medan Listrik	18
3.2.1. Tinjauan Umum	18
3.2.2. Blok Diagram Alat	18
3.2.3. Diagram Alir Kerja Alat Ukur Medan Listrik	18
3.2.4. Deskripsi Kerja	19
3.3. Perancangan Transduser	20
3.3.1. Perancangan Dimensi dan Bahan Transduser	21
3.3.2. Alur Perancangan Transduser	21
3.4. Perancangan Pengkondisi Sinyal	23
3.5. Perencanaan Pengujian	23
3.5.1. Pengujian Rangkaian Pengkondisi Sinyal	23
3.5.2. Pengujian Elektroda	23
3.5.3. Pengujian Keseluruhan Sistem	24
3.6. Penarikan Kesimpulan dan Saran	25

BAB IV PERANCANGAN DAN PENGUJIAN ALAT UKUR MEDAN LISTRIK SERTA ANALISIS HASIL PENGUKURAN

4.1. Perancangan Dimensi Elektroda	26
4.1.1. Perancangan Arus Keluaran Elektroda	27
4.1.2. Perancangan Konstruksi dan Kecepatan Elektroda	29
4.1.3. Perhitungan Dimensi	33
4.2. Perhitungan Tegangan <i>Input</i> ADC	39
4.3. Perancangan dan Pengujian Rangkaian Pengkondisi Sinyal	41
4.3.1. Perancangan Rangkaian Buffer	41
4.3.2. Perancangan Penguat Tegangan	42
4.3.3. Perancangan Penyearah Setengah Gelombang	45
4.4. Pengujian Pengkondisi Sinyal dan Elektroda	45
4.4.1. Pengujian Pengkondisi Sinyal	46
4.4.2. Pengujian Elektroda	47
4.4.3. Pengujian Keseluruhan Sistem	49

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	52

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Garis Gaya dan Kerapatan Fluks Medan Listrik	5
Gambar 2.2 Kuat Medan Pada Permukaan Seluas A.....	7
Gambar 2.3 Macam-macam Metode Pengukuran Medan Elektrik	7
Gambar 2.4 Konstruksi Elektroda Ukur	8
Gambar 2.5 Kurva Muatan dan arus.....	9
Gambar 2.6 Penguat Kerja.....	11
Gambar 2.7 Tegangan Sumber Pada Penguat Operasional	11
Gambar 2.8 Penguat dengan Penguatan Variabel.....	12
Gambar 2.9 Aplikasi <i>Op-Amp</i> pada Penyearah Setengah Gelombang.....	13
Gambar 2.10 Bentuk Fisik dan Susunan Pin CA3162.....	14
Gambar 2.11 Rangkaian ADC dengan CA3161-CA3162.....	14
Gambar 2.12 Gambar Fisik dan Pin CA3161	15
Gambar 3.1 Blok Diagram Alat Ukur Medan Listrik	18
Gambar 3.2 Diagram Alir Kerja Instrumen Pengukur Medan Listrik.....	19
Gambar 3.3 Jari-jari Elektroda dan <i>Holder</i>	20
Gambar 3.4 Susunan Bagian Alat Ukur Medan Listrik.....	20
Gambar 3.5 Diagram Alir Perancangan Transduser/Elektroda.....	22
Gambar 3.6 Pengujian Elektroda.....	24
Gambar 4.1 Konversi Arus ke Tegangan.....	26
Gambar 4.2 Elektroda dengan Dua Segmen.....	29
Gambar 4.3 Elektroda dengan Empat Segmen.....	30
Gambar 4.4 Posisi dan Periode Elektroda	31
Gambar 4.5 Roda Penggerak Elektroda.....	32
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Kecepatan dan Jari-jari	35
Gambar 4.7 Grafik Hubungan E (Vm^{-1}) dan \bar{I} (nA)	37
Gambar 4.8 Grafik Hubungan E (kVm^{-1}) dan \bar{I} (μA).....	38
Gambar 4.9 <i>Display Seven Segment</i>	39
Gambar 4.10 Blok Diagram Pengkondisi Sinyal.....	41
Gambar 4.11 Konversi Arus ke Tegangan.....	41
Gambar 4.12 Rangkaian <i>Buffer</i>	42

Gambar 4.13 Rangkaian Penguat Tegangan..... 44

Gambar 4.14 Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang 44

Gambar 4.15 Blok Diagram Pengujian..... 46

Gambar 4.16 Susunan Pengujian Elektroda 47

Gambar 4.17 Hasil Pengukuran Pada $V = 30,1$ kV dan $f = 204$ Hz 48

Gambar 4.18 Hasil Pengukuran Pada $V = 30,1$ kV dan $f = 476$ Hz 48



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Kebenaran CA 3161 16

Tabel 4.1 Perhitungan Frekwensi dan Kecepatan Putar Elektroda..... 33

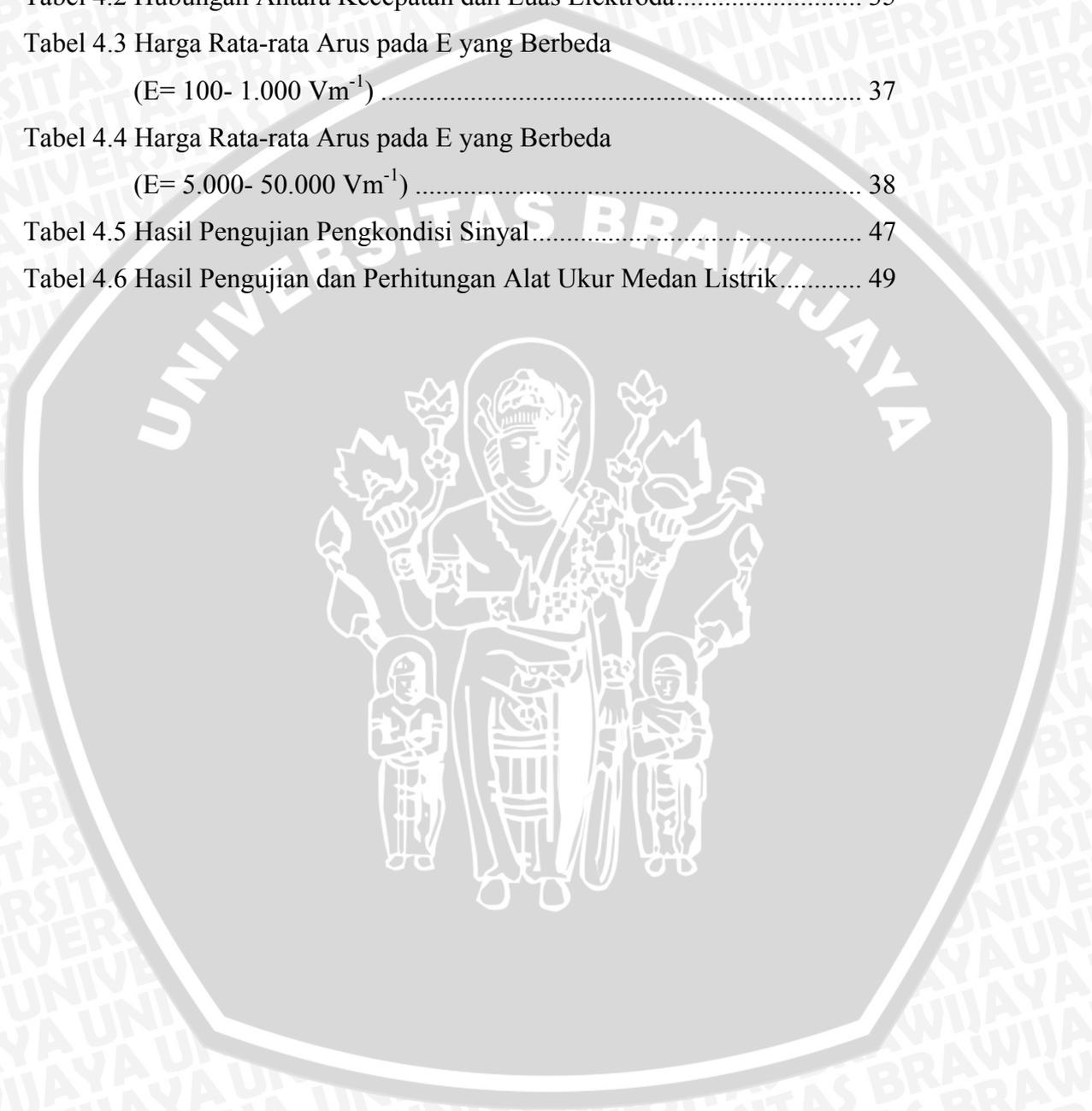
Tabel 4.2 Hubungan Antara Kecepatan dan Luas Elektroda..... 35

Tabel 4.3 Harga Rata-rata Arus pada E yang Berbeda
($E= 100- 1.000 \text{ Vm}^{-1}$) 37

Tabel 4.4 Harga Rata-rata Arus pada E yang Berbeda
($E= 5.000- 50.000 \text{ Vm}^{-1}$) 38

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Pengkondisi Sinyal..... 47

Tabel 4.6 Hasil Pengujian dan Perhitungan Alat Ukur Medan Listrik..... 49



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Muatan listrik pada atmosfer adalah suatu medan yang mudah terdeteksi karena tidak membutuhkan peralatan ukur yang rumit. Berdasarkan observasi, tegangan antara awan petir dan tanah diperkirakan antara 10 – 100 MV. Kuat medan selama kondisi normal (cuaca baik) sekitar 150 V/m dan meningkat pada waktu terjadi badai petir hingga mencapai beberapa ribu volt per meter. Pada waktu pelepasan muatan, kuat medan pada permukaan tanah dapat mencapai 50 – 300 kV/m. Medan listrik dalam atmosfer merupakan medan yang kompleks, meskipun demikian, ketika hal tersebut timbul masih mudah untuk dimengerti dan ditafsirkan. Teknologi sekarang ini mendukung untuk pembuatan suatu instrumen ukur medan dengan akurasi dan respon waktu yang baik. Dengan demikian dimungkinkan untuk membangun elektrometer dan pendeteksi radiasi elektromagnet dengan menggunakan peralatan yang murah.

Besaran kuat medan ini dapat diukur dengan menggunakan Alat Ukur Kuat Medan Elektrik. Keberadaan alat ukur intensitas medan elektrik ini di Indonesia sangat jarang dijumpai. Alat ukur jenis ini yang dibuat oleh pabrik saat ini menggunakan sistem yang rumit dan umumnya berharga mahal meskipun kadangkala juga memiliki banyak kelebihan. Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh alat ukur medan elektrik pabrikan adalah :

- Sensitivitas yang baik dengan range yang luas.
- Mampu mendeteksi kuat medan dalam berbagai frekwensi.
- Peneraan alat ukur yang bersertifikat atau terjaminnya nilai yang terukur.
- Akurasi yang baik.

Meskipun demikian bukan tidak mungkin bahwa pengukuran kuat medan elektrik masih bisa dilakukan dengan peralatan dan prinsip yang relatif lebih sederhana dan kemampuan yang cukup baik dan tentunya dengan biaya pembuatan yang lebih murah.

Maka dari itu dengan skripsi ini akan dilakukan rancang bangun peralatan ukur intensitas medan elektrik sebagai piranti ukur medan listrik statis. Aplikasi alat

ini adalah untuk pengukuran kuat medan elektrik statis diatas permukaan bumi. Disamping itu juga berguna sebagai peralatan penunjang laboratorium tegangan tinggi baik untuk praktikum maupun penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan pokok permasalahan tersebut diatas, maka rumusan masalah meliputi sebagai berikut :

1. Bagaimana rancang bangun sebuah alat ukur kuat medan listrik statis berdasarkan prinsip generator.
2. Seberapa besar tingkat kesalahan dan koreksi yang diperlukan pada hasil rancangan Alat Ukur Medan Listrik Statis dengan rentang pengukuran 0,1 – 99,9 kV/m

1.3 Ruang Lingkup Masalah

Mengacu pada permasalahan yang ada pada rancang bangun alat ukur medan listrik, yaitu :

1. Parameter keberhasilan alat adalah pada kemampuan untuk melakukan pengukuran kuat medan listrik pada suatu titik dengan pembanding alat ukur terkalibrasi atau dengan perhitungan.
2. Sensor yang digunakan adalah kepingan plat dengan mengaplikasikan hukum Coulomb dan hukum Gauss.
3. Alat ini menampilkan kuat medan listrik dengan rentang 0,1 – 99,9 dalam nilai kV/m dengan sistem digital.
4. Pengujian dilakukan dengan menggunakan plat logam bertegangan tinggi di Laboratorium Tegangan Tinggi Universitas Brawijaya.
5. Tidak membahas teori medan listrik secara mendetail.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah melakukan rancang bangun Alat Ukur Medan Elektrik Statis dengan rentang pengukuran 0,1 kV/m sampai dengan 99,9 kV/m.

1.5 Sistematika Penulisan

Penyusunan skripsi ini terbagi dalam beberapa sistematika bab pembahasan yang terdiri dari:

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II : DASAR TEORI

Berisi dasar teori – teori dasar tentang penunjang rancang bangun **Alat Ukur Medan Listrik**.

BAB III : METODOLOGI

Membahas metodologi yang digunakan dalam penulisan dan rancang bangun **Alat Ukur Medan Listrik**.

BAB IV : PERANCANGAN ALAT DAN PERENCANAAN PENGUJIAN

Berisi perancangan elektroda (transduser), hasil pengujian transduser berupa : output tegangan, gelombang keluaran, arus keluaran dan pengkonversian keluaran elektroda menjadi tegangan, perancangan rangkaian pengkondisi sinyal, perencanaan pengujian dan analisis **Alat Ukur Medan Listrik** serta analisis data yang diperoleh dari pengukuran.

BAB V : Berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisis dalam skripsi ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Umum Medan Listrik

Apabila terdapat muatan listrik pada suatu titik yang dimisalkan dengan q dan di titik lain terdapat muatan uji Δq yang bergerak pada jarak r . Muatan q ini menggerakkan muatan listrik kedua yaitu muatan uji Δq . Maka pada muatan uji Δq selalu ada gaya yang bertumpu pada muatan uji tersebut, dengan perkataan lain pada muatan uji Δq selalu menunjukkan medan gaya dan medan inilah yang disebut medan listrik dan gaya yang menggerakkan muatan uji tersebut adalah gaya Coulomb.

Jadi pengertian medan listrik adalah suatu medan atau area yang dapat menimbulkan gaya pada partikel bermuatan listrik yang terdapat di dalam medan tersebut. Kuat medan listrik didefinisikan sebagai besaran dari medan listrik yang menyatakan besar gaya yang bertumpu pada suatu satuan muatan uji yang positif, sehingga satuan dari kuat medan listrik adalah N/C. Definisi lain dari kuat medan listrik adalah gradien atau penurunan dari potensial/tegangan listrik dalam arah menjauhi sumber medan listrik, sehingga satuan yang lain dari kuat medan listrik adalah kV/m atau V/m.

Adapun sifat-sifat muatan listrik sebagai sumber medan adalah sebagai berikut

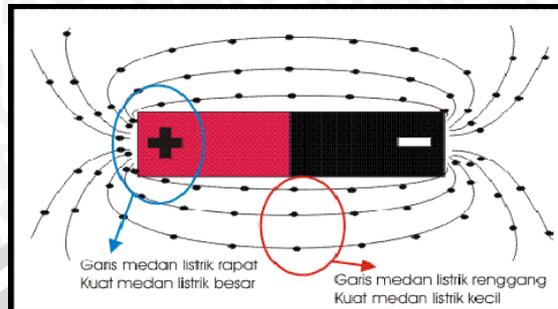
:

- Terdiri dari dua (2) muatan yaitu positif dan negatif
- Bila muatan sejenis (positif dengan positif / negatif dengan negatif) akan tolak menolak tapi muatan yang tidak sejenis akan tarik menarik.
- Muatan listrik adalah diskrit, yaitu muatan listrik selalu merupakan kelipatan bulat dari paket muatan elementer (muatan elektron)
- Gaya interaksi antara dua partikel bermuatan besarnya berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya.

2.2 Gaya dan Garis Gaya Medan Listrik

Komponen lain dari medan listrik adalah garis –garis gaya listrik yang didefinisikan sebagai garis-garis khayal yang menyatakan pola atau bentuk fisik dari

medan listrik. Garis-garis gaya listrik itu juga disebut sebagai garis-garis fluks atau fluks-fluks listrik. Fluks-fluks listrik ini memancar secara simetri dari suatu muatan titik dan bersesuaian dengan garis medannya.



Gambar 2.1 Garis Gaya dan Kerapatan Fluks Medan Listrik
Sumber : Elektro Indonesia

Analogi dari garis-garis fluks muatan listrik sama dengan yang terjadi pada medan magnet. Bila muatan listrik mengalir dari muatan listrik positif (+) ke muatan negatif (-), maka jumlah garis-garis gaya akan sebanding dengan besar muatan listrik dan berbanding terbalik dengan jaraknya. Semakin besar muatan listrik maka garis-garis gaya akan semakin banyak dan rapat yang menunjukkan kuat medan di sekitar muatan tersebut. Akan tetapi semakin jauh dari sumber muatan maka garis-garis gaya berangsur berkurang kerapatannya yang menunjukkan bahwa kuat medan listriknya melemah.

Bila ada dua titik muatan listrik sebesar q_1 dan q_2 pada jarak r dalam medium dielektrik ϵ , maka berlaku hukum Coulomb. Gaya F diantara dua partikel muatan ini adalah :

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \dots\dots\dots(2-1)$$

dengan :

- F = gaya antara dua muatan (Newton)
- q_1 = muatan pertama (Coulomb)
- q_2 = muatan kedua (Coulomb)
- ϵ = permitifitas medium (F/m atau Coulomb² Newton⁻¹ m⁻²)
- r = jarak antara kedua muatan (m)

Apabila terdapat suatu muatan uji (Δq) ditempatkan di sekitar suatu muatan tetap (q), maka muatan uji akan mengalami gaya, besar dan arah gaya tergantung pada



posisi muatan uji terhadap muatan tetap. Di sekitar muatan q dikatakan medan listrik yang berpengaruh dengan besar E , dan besar dari E ini pada setiap titik di sekitarnya secara sederhana diukur sebagai gaya tiap satuan unit muatan pada suatu titik. Dengan demikian besar kuat medan untuk suatu muatan tunggal q pada suatu titik dengan jarak r dapat dituliskan seperti berikut.

$$E = \frac{q}{4 \cdot \pi \epsilon \cdot r^2} \dots\dots\dots (2-2)$$

dimana $E =$ kuat medan listrik (N/C)

$q =$ muatan listrik/muatan sumber medan (Coulomb)

$\epsilon =$ konstanta listrik (permitivitas dielektrik) (F/m atau Coulomb² Newton⁻¹ m⁻²)

$r =$ jarak titik evaluasi kuat medan dengan muatan sumber medan (meter)

Secara umum terdapat hubungan antara gaya dengan kuat medan listrik yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$F = q \cdot E \dots\dots\dots (2-3)$$

Bila jumlah muatan listrik q menghasilkan fluks listrik Ψ , maka menurut percobaan Faraday berlaku :

$$\Psi = q \dots\dots\dots (2-4)$$

Satuan kuat medan bisa juga dinyatakan dalam satuan Vm⁻¹ karena memiliki persamaan dalam rumus dimensi, yang dinyatakan dalam sistem satuan MKS (*Meter KiloGram Second*). Apabila kuat medan dinyatakan dalam satuan yang sama dengan definisi pada persamaan 2-3 yaitu dalam satuan Newton/Coulomb, maka penjabarannya sebagai berikut :

$$\frac{\text{Newton}}{\text{Coulomb}} = \frac{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{C}} = \text{MLT}^{-2}\text{C}^{-1} \dots\dots\dots (2-5)$$

Bila dinyatakan dengan satuan Vm⁻¹ maka penjabarannya adalah sebagai berikut :

$$\frac{V}{m} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{C}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{C}} = \text{MLT}^{-2}\text{C}^{-1} \dots\dots\dots (2-6)$$

Dari persamaan 2-5 dan 2-6 diatas terlihat bahwa kuat medan dapat dinyatakan dalam satuan N/C atau V/m karena memiliki rumus dimensi yang sama yaitu

$MLT^{-2}C^{-1}$ sehingga apabila terdapat suatu muatan dengan kuat medan yang dinyatakan dalam nilai N/C akan memiliki nilai sama bila dinyatakan dalam satuan V/m, akan tetapi satuan yang lebih sering digunakan untuk menyatakan kuat medan pada suatu alat ukur medan adalah V/m.

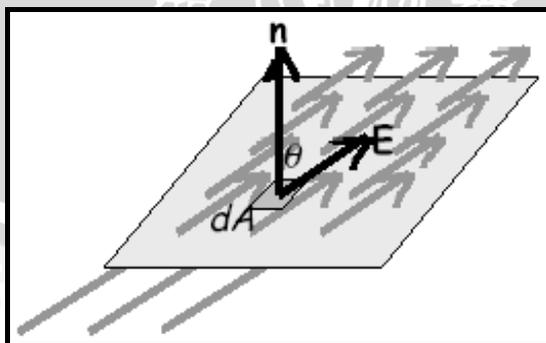
2.3 Hukum Gauss

Bila suatu muatan dilingkupi oleh suatu permukaan dengan luasan tertentu, maka ini akan mendefinisikan kerapatan fluks listrik yang dinyatakan dengan D . Kerapatan fluks listrik ini diukur dalam satuan coulomb per meter kuadrat (Cm^{-2}). Kerapatan fluks ini merupakan besaran vektor yang dikenal juga dengan *electric displacement*. Dalam hal ini terdapat hubungan kuat medan listrik dengan kerapatan fluks yaitu :

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \dots\dots\dots(2-7)$$

Dari persamaan diatas dapat kita ketahui bahwa kuat medan yang timbul dari muatan listrik sebanding dengan kerapatan fluksinya.

Fluks berkaitan dengan besaran medan yang menembus dalam arah yang tegak lurus suatu permukaan tertentu. Fluks listrik menyatakan medan listrik yang menembus dalam arah tegak lurus suatu permukaan. Ilustrasinya akan lebih mudah dengan menggunakan deskripsi visual untuk medan listrik (yaitu penggambaran medan listrik sebagai garis-garis). Dengan penggambaran medan seperti itu (garis), maka fluks listrik dapat digambarkan sebagai banyaknya garis medan yang menembus suatu permukaan.



Gambar 2.2 Kuat Medan Pada Suatu Permukaan Seluas A
Sumber : Elektro Indonesia

Gambar 2.2 tersebut memperlihatkan kuat medan yang menerpa pada permukaan datar dengan luas A . Jumlah garis gaya yang menyatakan besar medan listrik

bergantung pada bidang datar dan arah dari fluks listrik. Sejumlah fluks medan yang sama atau juga bisa dikatakan kuat medan yang sama apabila menerpa permukaan pada arah normal (n), maka muatan pada permukaan akan sesuai dengan jumlah fluksi. Tetapi bila arah fluksi terdistorsi sebesar θ dari arah normal, maka fluks listrik yang dihasilkan oleh medan E pada permukaan yang luasnya dA adalah :

$$d\Psi = D dA \cos \theta \dots\dots\dots (2-8)$$

$$\Psi = \int D dA \cos \theta \dots\dots\dots (2-9)$$

dengan ψ = fluks listrik pada permukaan bidang datar (Coulomb)

D = kerapatan fluks listrik ($\frac{\text{Coulomb}}{m^2}$)

dA = luas permukaan differensial pada arah normal n (m^2)

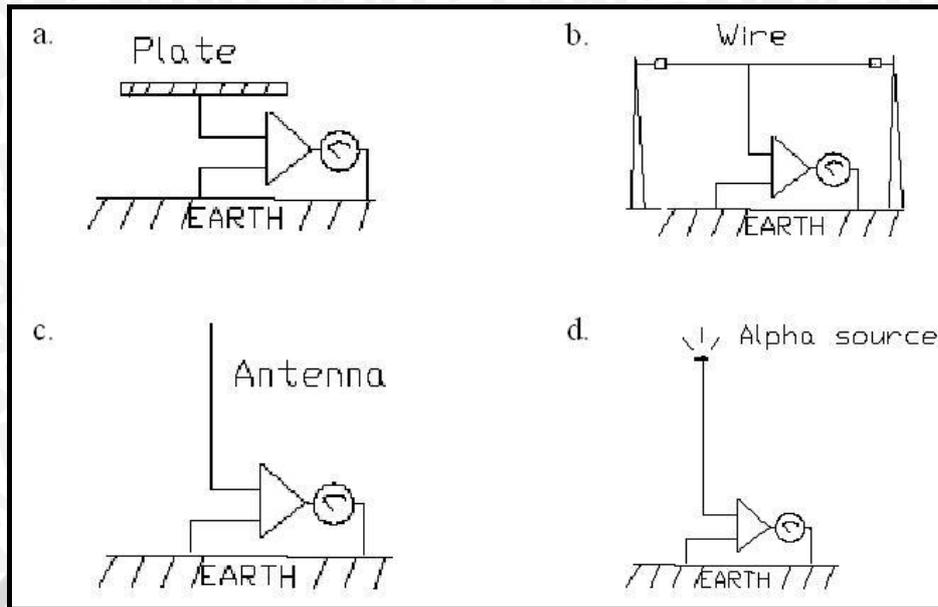
θ = sudut pergeseran arah medan dari arah normal (\dots^0)

2.4 Pengukuran Medan Listrik Statis

Terdapat beberapa cara pengukuran medan elektrik yang bisa dilakukan. Yang membedakan dari berbagai metode ini adalah elektroda yang digunakan untuk transduser. Sesuai dengan gambar dibawah metoda yang digunakan adalah :

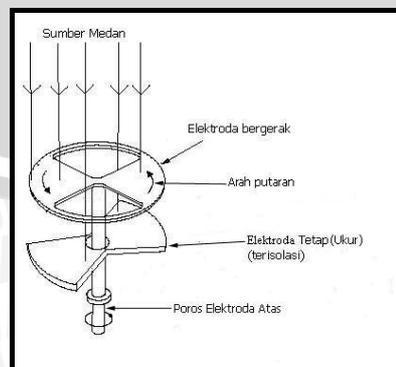
- a. Metode pengukuran dengan menggunakan elektroda plat.
- b. Metode pengukuran dengan menggunakan antena kabel panjang.
- c. Metode pengukuran dengan antena cambuk.
- d. Metode pengukuran dengan antena cambuk yang dilengkapi dengan probe radioaktif.





Gambar 2.3 Macam-macam Metode Pengukuran Medan Elektrik
 Sumber : Situs Ralf Muller, Article for ETZ

Salah satu cara untuk mengukur medan listrik yang akan diterapkan dalam skripsi ini adalah dengan menggunakan elektroda piring/plat. Pengukuran dengan metode ini bertujuan untuk membentuk suatu medan yang homogen menerpa elektroda ukur dalam lingkup ruang tertentu. Medan homogen ini kemudian ditangkap oleh elektroda ukur pada bagian bawah. Elektroda dengan bahan dari plat logam (besi/alumunium, dll) dibentuk menyerupai kipas/baling-baling sebagai upaya mekanik untuk memperoleh keseimbangan gerak. Antara elektroda atas dan bawah tidak terhubung langsung secara elektrik, tetapi elektroda pada bagian atas juga diketanahkan untuk mencegah medan listrik menerpa elektroda ukur bagian bawah pada suatu waktu tertentu. Untuk lebih jelasnya gambaran dari elektroda ini bisa dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.4 Konstruksi Elektroda Ukur
 Sumber : Dieter kind,1993

Prinsip yang dipakai dalam pengukuran dengan metode ini adalah dengan prinsip generator. Medan listrik diumpamakan sebagai medan magnet tetap karena arah medan listrik selalu menuju bumi sebagai titik nol. Elektroda-elektroda kipas sendiri diumpamakan sebagai penampang-penampang kawat yang bergerak melewati medan listrik. Elektroda ukur tersebut memiliki luas A (diandaikan memiliki potensial nol) memiliki rapat muatan permukaan sebesar $\epsilon_0 \cdot E$ akibat dari medan sebesar E . Maka muatan total pada elektroda ukur dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$Q = \int \epsilon_0 E dA = \epsilon_0 \cdot A \cdot E \dots\dots\dots(2-10)$$

dengan Q = jumlah muatan (Coulomb)

ϵ_0 = permitivitas ruang hampa/udara ($\frac{10^{-9}}{36\pi} F/m$)

E = kuat medan ($\frac{V}{m}$)

A = luas permukaan elektroda (m^2)

Karena elektroda bawah dihubungkan ketanah, maka *discharge* dari muatan elektroda inilah yang dimanfaatkan. Munculnya muatan listrik yang mengalir ke bumi dikarenakan perputaran atau perubahan posisi elektroda, sesuai dengan persamaan diatas dimana besar muatan dinyatakan dalam perkalian antara permitivitas medium dengan kuat medan yang diintegrasikan dengan luas permukaan elektroda.

Muatan Q yang timbulpun berubah-ubah antara nilai Q_{mak} dan Q_{min} .

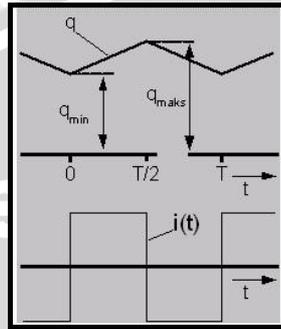
Dari Gambar 2.2 bisa dilihat dengan adanya perputaran elektroda atas maka saat elektroda atas tersebut tidak berimpit dengan baling-baling elektroda bawah, maka pada saat itu nilai dari muatan Q menjadi maksimum. Pada saat kedua baling-baling atas dan bawah tersebut berimpit sempurna maka nilai muatan Q akan menjadi minimum.

Jika pada elektroda bawah diketanahkan, maka karena adanya muatan pada elektroda maka akan timbul arus menuju bumi. Arus ini merupakan arus bolak-balik yang dinyatakan dengan :



$$i(t) = \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots (2-11)$$

Arus ini akan berbentuk kurva-kurva. Setengah perioda dari kurva akan berharga positif dan setengah perioda lagi akan berharga negatif. Jika putaran elektro dilakukan pada kecepatan yang konstan maka kurva-kurva tersebut akan memiliki perioda yang sama pada siklus negatif dan siklus positifnya.



Gambar 2.5 Kurva muatan dan arus
 Sumber: Dieter Kind,1993

Dari besaran arus bolak-balik tersebut bisa didapatkan arus rata – rata antara dua perpotongan adalah :

$$\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \frac{dq}{dt} dt = \frac{2}{T} (q_{maks} - q_{min}) \dots\dots\dots (2-12)$$

- dengan q_{mak} = jumlah muatan maksimum (Coulomb)
- q_{min} = jumlah muatan minimum (Coulomb)
- T = perioda arus yang mengalir (second/s)

Nilai tersebut diatas berhubungan dengan nilai rata-rata I untuk seluruh perioda penyearahan. Jika saat seluruh permukaan elektroda ukur berimpit secara sempurna, maka q_{min} bernilai nol dan akan diperoleh persamaan berikut :

$$\bar{I} = \frac{2}{T} q_{mak} = \frac{2}{T} \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot E \dots\dots\dots (2-13)$$

Nilai tegangan maksimum antara kedua elektroda bisa diketahui dengan persamaan :

$$q_{mak} = C_m \cdot U \dots\dots\dots (2-14)$$

$$q_{min} = 0$$

- dengan : C_m = kapasitansi maksimum elektroda (Farad)
- U = tegangan antara kedua elektroda (Volt)



Dari persamaan diatas bisa juga didapatkan harga arus rata-rata hasil penyearahan yaitu :

$$\bar{I} = \frac{2}{T} \cdot C_m \cdot U \dots\dots\dots(2-15)$$

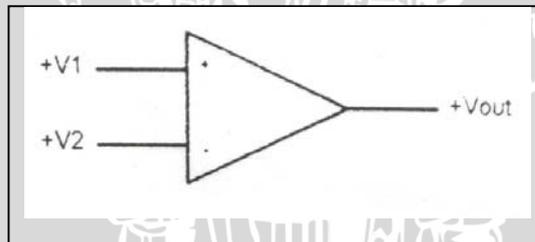
2.5 Penguat Kerja

Penguat kerja (*Operational amplifier, Op-Amp*) adalah rangkaian elektronik yang dirancang khusus sehingga dengan menambahkan komponen luar sedikit saja dapat dipakai untuk berbagai keperluan.

Beberapa karakteristik Op-Amp yang terpenting adalah:

- a. Impedansi input sangat tinggi sehingga arus input dapat diabaikan
- b. Penguat pada rangkaian loop terbuka sangat tinggi
- c. Impedansi input sangat rendah sehingga output penguatan tidak terpengaruh oleh pembebanan.

Penguat kerja mempunyai dua terminal masukan, yaitu terminal masukan membalik (inverting), serta satu terminal keluaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut.



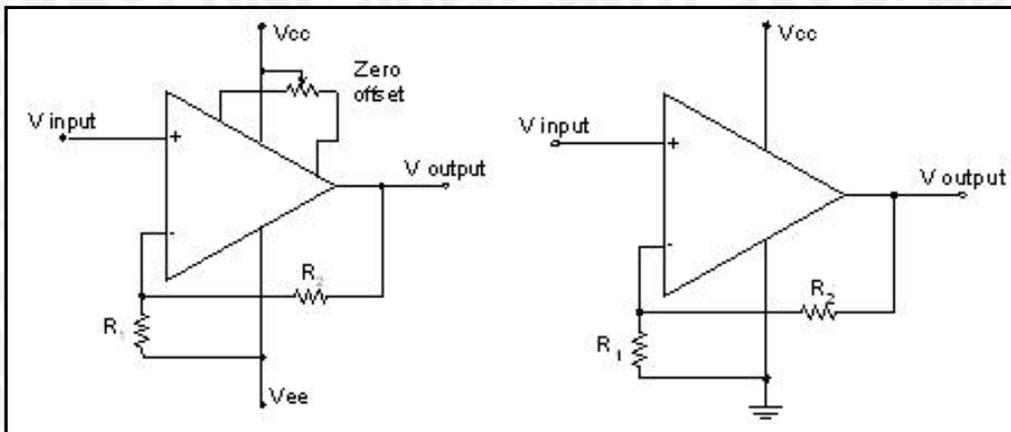
Gambar 2.6 Penguat Kerja
Sumber: Malvino 2, 1990

2.5.1 Op-Amp Sebagai Penguat Non Inverting

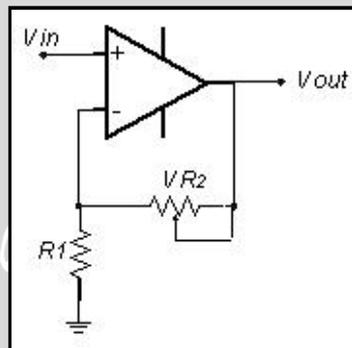
Penguat operasional jenis ini memiliki polaritas *output* yang sama dengan polaritas dari *input*. Penguat jenis ini mempunyai impedansi input yang tinggi, impedansi output yang rendah. Hasil penguatan yang diperoleh mendekati penguat tegangan ideal. Umpan balik yang digunakan adalah umpan balik negatif.

Penguat operasional memiliki konstruksi yang terdiri dari 2 macam ditinjau dari segi tegangan sumber yang diberikan. Terdapat penguat operasional yang menggunakan tegangan sumber positif (+) dan ground sebagai titik netral. Ada juga penguat operasional yang membutuhkan tegangan positif (+) dan negatif (-). Untuk penguat operasional yang kedua ini terdapat pin-pin yang digunakan untuk

mengatur keluaran agar mencapai titik nol pada saat pin-pin input dihubungkan dengan titik netral/nol.



Gambar 2.7 Tegangan Sumber Pada Penguat Operasional
Sumber : Malvino 2, 1990



Gambar 2.8 Penguat dengan Penguatan Variabel
Sumber: Malvino 2, 1990

Pada perancangan alat ukur ini penulis menggunakan R_2 berjenis variabel untuk memudahkan pengaturan penguatan dan mendapatkan penguatan yang fleksibel. Adapun penguatannya diberikan oleh persamaan berikut :

$$A_{cl} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{VR_2}{R_1} + 1$$

dengan V_{out} = tegangan keluaran (volt)

V_{in} = tegangan masukan (volt)

R_1 = resistansi Thevenin (Ohm)

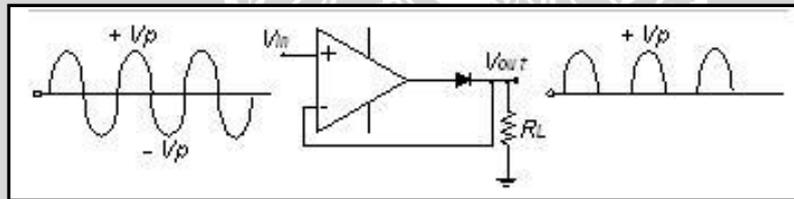
VR_2 = resistansi pengali (Ohm)

A_{cl} = faktor penguatan

2.5.2 Penyearah Setengah Gelombang

Penggunaan dioda pada penyearah untuk rangkaian catu daya selalu dipakai karena sangat sederhana dalam perhitungan dan rangkaianannya. Akan tetapi dalam pembuatan skripsi ini berbeda. Dioda yang mempunyai potensial barier atau tegangan *knee* yang harus dilampaui agar arus dapat lewat dengan mudah. Pada perancangan instrumen ukur ini, tegangan yang dibangkitkan oleh elektroda sangat kecil, meskipun pada awalnya telah dikuatkan. Untuk itulah perlu digunakan *Op-Amp* sebagai komponen tambahan.

Jika sinyal *input* positif, maka *output* yang sudah dikuatkan akan positif juga dan mampu melewati dioda. Jadi rangkaian berkerja sebagai pengikut tegangan, dan setengah periode positif muncul pada resistor beban. Dipihak lain, jika *input* menjadi negatif maka *output* dari penguat operatif menjadi negatif dan mematikan dioda. Karena dioda terbuka tidak ada tegangan yang muncul pada resistor beban. Penguatan tinggi dari penguat operatif sebenarnya menghilangkan efek dari tegangan offset dioda.



Gambar 2.9 Aplikasi *Op-Amp* pada Penyearah Setengah Gelombang
Sumber: Malvino 2, 1990

Tegangan *knee* pada dioda secara umum bernilai antara 0,3 volt untuk dioda jenis germanium dan untuk dioda jenis silikon potensial bariernya sekitar 0,7 volt. Pada penyearah setengah gelombang seperti gambar diatas perhitungan dilakukan tidak seperti pada penguatan biasanya. Penguatan yang digunakan secara umum adalah faktor *A* yang besarnya berkisar pada nilai 100.000. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut :

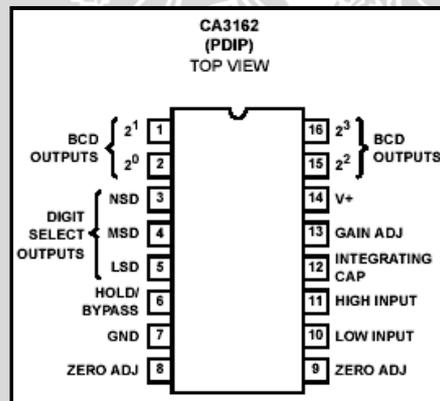
$$V_{in} = \frac{\text{Tegangan Knee}}{100.000}$$

dengan V_{in} = Tegangan masukan penyearah (volt)
Tegangan *Knee* = Tegangan keluaran penyearah (volt)

2.6 AD Converter

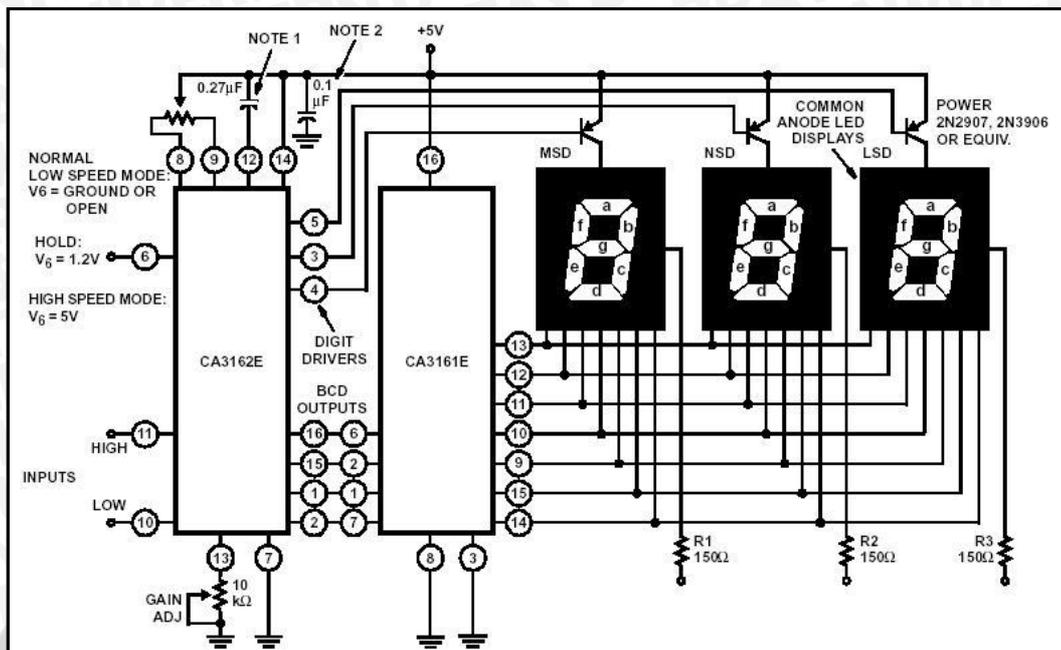
AD converter (ADC) adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk meubah suatu *input* analog ke dalam bentuk *digital*. *Input* dari ADC ini adalah suatu variabel tegangan dalam bentuk tunggal. Misalnya tegangan tersebut bervariasi dari -99 – 999 mV. Maka keluaran ADC ini adalah dalam bentuk biner. ADC ini menterjemahkan suatu tegangan *input* analog kedalam bentuk bilangan biner 4 bit. Pada perancangan Alat Ukur Medan Listrik ini penulis menggunakan IC jenis CA3162. IC ini memiliki beberapa keunggulan antar lain tidak memerlukan komponen external yang banyak, pengaturan yang mudah dan memiliki banyak fasilitas lainnya. Fasilitas tambahan lainnya pada IC ini antara lain adalah sebagai berikut.

1. *Hold Mode* berfungsi untuk menghentikan nilai pengukuran pada satu nilai tertentu apabila nilai dari pengukuran cenderung berubah-ubah.
2. High Speed Conversion Rate. Perubahan nilai tampilan yang cepat sesuai dengan perubahan *input*. Pada mode ini konversi berjalan pada frekwensi 96 Hz.



Gambar 2.10 Bentuk Fisik dan Susunan Pin CA3162
Sumber : Data Sheet CA3162

Dari *data sheet*, IC jenis ini juga disertai dengan skematik yang menggunakan komponen standart pasaran yang bisa diperoleh dengan mudah ditoko. Dengan begitu IC ini memungkinkan untuk digunakan sebagai ADC untuk aplikasi umum. Untuk lebih jelasnya skematik tersebut bisa dilihat pada gambar berikut.

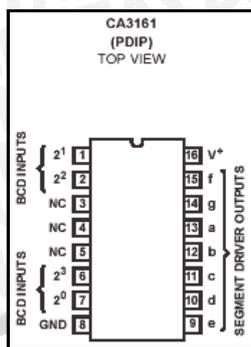


Gambar 2.11 Rangkaian ADC dengan CA3161-CA3162
 Sumber : Data Sheet CA3162

2.7 Decoder Seven Segment

Decoder seven segment ini adalah suatu peralatan yang berbentuk IC yang memiliki masukan berupa bilangan biner dan keluaran juga berupa bilangan biner yang terdiri dari 7 bit yang berfungsi untuk memberikan suplai daya pada LCD *seven segment* sesuai dengan informasi yang diterima dari masukannya. Hasil akhir dari *Decoder* ini adalah tampilan berupa angka-angka dalam bentuk desimal.

Dalam perancangan Alat Ukur Medan Listrik ini penulis memakai IC jenis CA3161. IC ini mampu memberikan *output* arus yang konstan untuk mengendalikan lampu *seven segment*. Jika IC tipe ini digunakan bersama-sama dengan IC tipe CA3162 maka IC ini dapat memberikan keluaran digital yang lengkap dengan hanya menggunakan sedikit komponen pendukung diluar IC jenis ini.



Gambar 2.12 Gambar Fisik dan Pin CA3161
 Sumber : Data Sheet CA3162

Untuk dapat memeriksa apakah data keluaran dan masukan sudah sesuai dan ADC maupun *driver seven segment* sudah dapat bekerja dengan baik maka diperlukan tabel kebenaran dari *driver* yang digunakan. Berikut ini adalah tabel kebenaran untuk IC tipe CA3161.

Tabel 2.1 Tabel Kebenaran CA3161

BINARY STATE	INPUT				OUTPUT							DISPLAY
	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	a	b	c	d	e	f	g	
0	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	0
1	L	L	L	H	H	L	L	H	H	H	H	1
2	L	L	H	L	L	L	H	L	L	H	L	2
3	L	L	H	H	L	L	L	L	H	H	L	3
4	L	H	L	L	H	L	L	H	H	L	L	4
5	L	H	L	H	L	H	L	L	H	L	L	5
6	L	H	H	L	L	H	L	L	L	L	L	6
7	L	H	H	H	L	L	L	H	H	H	H	7
8	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	8
9	H	L	L	H	L	L	L	L	H	L	L	9
10	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	-
11	H	L	H	H	L	H	H	L	L	L	L	E
12	H	H	L	L	H	L	L	H	L	L	L	H
13	H	H	L	H	H	H	H	L	L	L	H	L
14	H	H	H	L	L	L	H	H	L	L	L	P
15	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	blank

Sumber : Data sheet CA3161

2.8 Karakteristik Kerja Alat Ukur

Ada beberapa karakteristik statis dari alat ukur yang harus diperhatikan antara lain adalah :

1. Ketelitian. Ketelitian juga dikenal sebagai reproduksibilitas. Ketelitian pembacaan merupakan kecocokan antara pembacaan-pembacaan itu sendiri. Jika nilai yang sama dari peubah yang terukur, diukur beberapa kali dan memberikan hasil yang kurang lebih sama, maka alat ukur tersebut dikatakan mempunyai ketelitian atau reproduksibilitas tinggi, dan juga berarti alat ukur tidak mempunyai penyimpangan. Penyimpangan ini hanya dapat diketahui melalui pemeriksaan secara berkala kalibrasi alat ukur.
2. Ketepatan. Ketepatan didefinisikan sebagai tingkat perbedaan yang sekecil-kecilnya antara nilai pengamatan dengan nilai sebenarnya. Untuk memperoleh ketepatan yang diharapkan, kalibrasi alat ukur perlu dilakukan secara berkala dengan menggunakan standar konstan yang diketahui.
3. Kepekaan. Kepekaan alat ukur secara umum mengacu pada dua hal. Pada beberapa kasus kepekaan menyatakan perubahan terkecil nilai peubah yang diukur dimana alat ukur memberikan tanggapan sementara aliran pemikiran lain menganggap kepekaan sebagai ukuran perubahan yang dihasilkan oleh alat ukur untuk suatu perubahan peubah yang diukur.
4. Jangkauan (rangeability). Jangkauan dari alat ukur biasanya diartikan perbandingan pembacaan meter maksimum ke pembacaan meter minimum., dimana kesalahan kurang dari harga yang dinyatakan.

BAB III

METODOLOGI PERANCANGAN

Metodologi perancangan alat yang dilakukan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut :

3.1 Studi Literatur

Studi kepustakaan dilakukan untuk mempelajari materi pendukung perancangan **Alat Ukur Medan Listrik**. Materi pendukung yang diperlukan untuk menyelesaikan skripsi ini antara lain adalah hukum Coulomb, hukum Gauss, cara-cara pengukuran medan dengan menggunakan elektroda plat, pengkondisi sinyal, dan konversi dari bentuk analog ke bentuk digital (ADC).

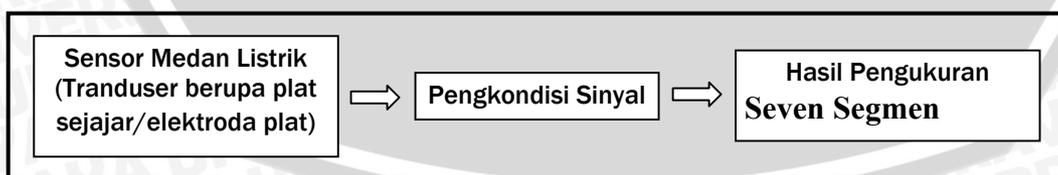
3.2 Perancangan Alat Ukur Medan Listrik

3.2.1 Tinjauan Umum

Sebagaimana telah diketahui bahwa untuk bisa merancang suatu sistem yang baik dan benar serta efektif dan efisien, maka terlebih dahulu proses dari keseluruhan sistem mulai dari gambar blok, deskripsi kerja hingga kebutuhan input dan output perlu direncanakan.

3.2.2 Blok Diagram alat

Alat ukur medan listrik dalam skripsi ini terdiri dari beberapa bagian blok yang masing-masing mempunyai fungsi khusus. Adapun bagian-bagiannya antara lain yaitu bagian sensor, pengkondisi sinyal dan bagian penampil/*display*. Untuk lebih jelasnya bagian-bagian tersebut bisa dilihat pada gambar dibawah ini.

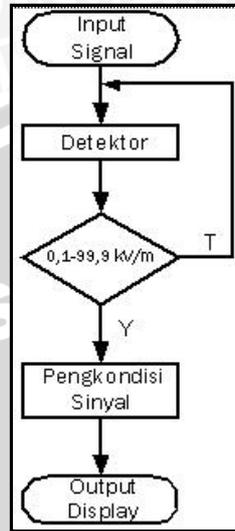


Gambar 3.1 Blok Diagram Alat Ukur Medan listrik

Sumber : Penulis

3.2.3 Diagram Alir Kerja Alat Ukur Medan Listrik

Alat Ukur Medan Listrik yang akan dirancang mempunyai prinsip kerja pengukuran seperti terlihat pada diagram alir kerja seperti ditunjukkan pada gambar *flowchart* berikut ini:



Gambar 3.2 Diagram Alir Kerja Instrumen Pengukur Medan Listrik
Sumber : Penulis

3.2.4 Deskripsi Kerja

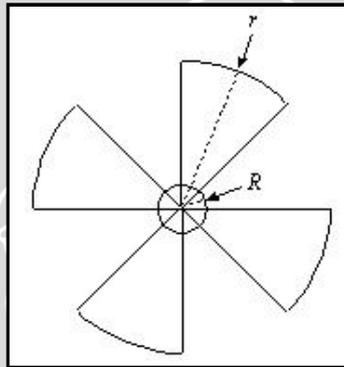
Elektroda ukur dari instrumen ukur medan listrik ini diposisikan pada suatu titik yang akan diukur kuat medannya. Piringan elektroda atas diputar untuk membuka-tutup elektroda bawah dengan sumber medan, semakin besar putaran akan semakin baik sensitivitas pengukurannya karena dihasilkan frekwensi pengukuran yang lebih besar. Apabila terdapat medan listrik di udara maka sesuai hukum Coulomb dan Gauss, fluksi dari medan listrik tersebut akan mempengaruhi muatan di udara bebas dengan akibat muatan tersebut akan terpolarisasi. Apabila digambarkan dengan metoda muatan bayangan (metode santir), maka seolah-olah terdapat muatan yang sama nilainya dibawah permukaan bumi, akan tetapi memiliki tanda muatan yang berbeda. Berkaitan dengan yang telah dijelaskan dalam Bab 2 maka akan timbul garis gaya dari muatan positif ($q(+)$) menuju muatan negatif ($q(-)$) di bawah permukaan bumi. Garis-garis gaya tentunya cenderung untuk melalui elektroda ukur karena posisi yang lebih tinggi daripada tanah. Dengan demikian sesuai dengan hukum Gauss maka timbul muatan pada permukaan elektroda tersebut. Apabila

terjadi perubahan muatan tiap satuan ($\frac{dq}{dt}$) maka timbul arus yang mengalir menuju bumi yang memiliki potensial yang lebih rendah.

Output arus ini dikonversikan dulu menjadi tegangan dengan sebuah resistor, beda potensial yang timbul antara kedua ujung resistor tersebut kemudian diproses dalam pengkondisi sinyal untuk dikuatkan sampai hasil penguatan sesuai dengan yang dibutuhkan oleh rangkaian ADC, kemudian hasilnya ditampilkan melalui LCD *seven segment* dengan satuan kV/m.

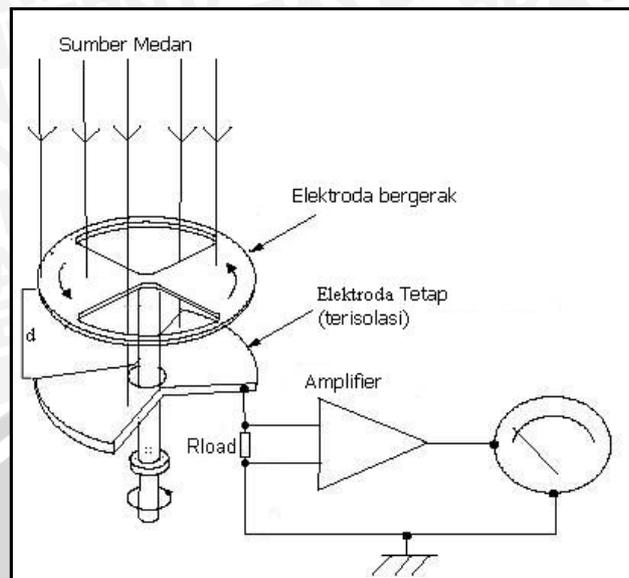
3.3 Perancangan Tranduser

Perancangan elektroda ini meliputi dimensi, kecepatan putaran dan arus keluaran pada penghantar yang dihubungkan ke ground untuk rentang ukur yang telah ditentukan sebelumnya.



Gambar 3.3 Jari-jari Elektroda dan Holder
Sumber : Dieter kind,1993

Keterangan gambar :
 r : Jari-jari elektroda ukur (cm)
 R : Jari-jari penumpu (Holder) elektroda (cm)



Gambar 3.4 Susunan Bagian Alat Ukur Medan Listrik

Sumber : <http://www.jci.co.uk>

Dimensi elektroda yang menentukan adalah luas permukaan. Masing-masing elektroda diatas merupakan setengah lingkaran yang merupakan luasan total dari elektroda dan masih dikurangi dengan luasan penumpu/holder elektroda pada sumbu kipas yang tidak ikut berubah posisinya.

Perancangan ini meliputi perhitungan :

- Kecepatan putar elektroda dinotasikan dengan n dengan satuan rpm/rps . Kecepatan putaran ini digunakan untuk mengetahui frekwensi pengukuran (f) sebagai dasar untuk perbandingan antara pengukuran dan perhitungan serta acuan dalam perancangan elektroda. Selain frekwensi yang besar juga memperbesar arus rata-rata keluaran (\bar{I}) dari elektroda. Akan tetapi perancangan kecepatan mekanik ini harus disesuaikan dengan kekuatan mekanik dan ketersediaan bahan.
- Jari-jari elektroda dinotasikan dengan r dengan satuan meter (m). Jari-jari elektroda ini menentukan luasan efektif (A_{ef}) dari elektroda yang digunakan sebagai sensor. Parameter tersebut menentukan muatan maksimum yang bisa diterima oleh elektroda ukur.

3.3.1 Perancangan Dimensi dan BahanTranduser

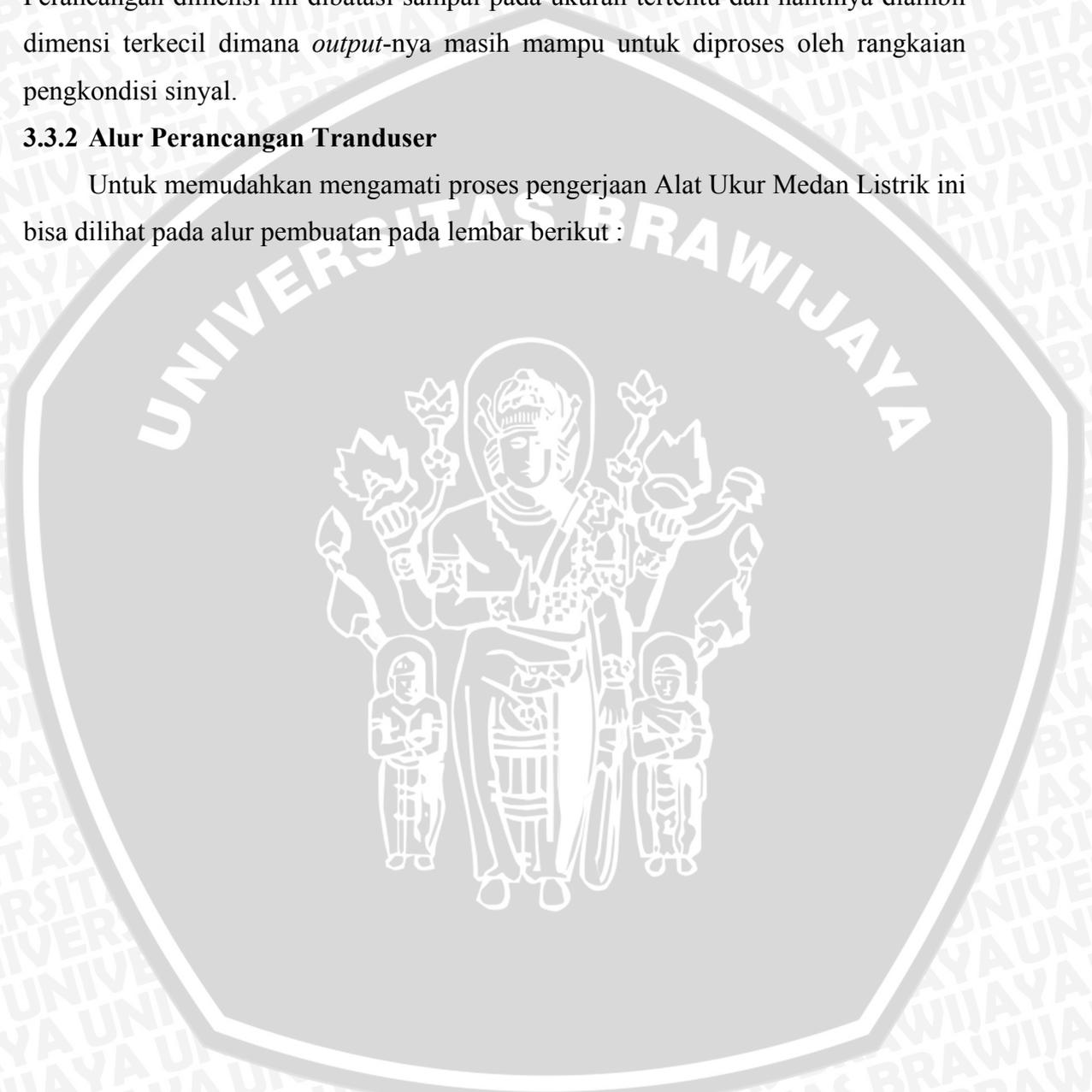
Dalam perancangan ini, tranduser yang digunakan adalah plat alumunium dengan ketebalan 1 mm. Plat alumunium ini dipilih karena harga yang relatif murah

dan mudah dalam pengerjaannya selain memiliki sifat mekanik yang cukup bagus dan tergolong logam yang ringan.

Dimensi tranduser dirancang tidak terlalu besar untuk memudahkan dalam pengukuran, selain itu untuk mendukung definisi pengukuran suatu titik. Perancangan dimensi ini dibatasi sampai pada ukuran tertentu dan nantinya diambil dimensi terkecil dimana *output*-nya masih mampu untuk diproses oleh rangkaian pengkondisi sinyal.

3.3.2 Alur Perancangan Tranduser

Untuk memudahkan mengamati proses pengerjaan Alat Ukur Medan Listrik ini bisa dilihat pada alur pembuatan pada lembar berikut :





Gambar 3.5 Diagram Alir Perancangan Transduser/Elektroda
Sumber : Penulis

3.4 Perancangan Pengkondisi Sinyal

Karena *output* dari elektroda sangat kecil dan sulit untuk diukur secara langsung, maka diperlukan rangkaian pengkondisi sinyal. Untuk tujuan tersebut penulis menggunakan IC dengan tipe LF355 yang merupakan IC *Operational Amplifier*. Rangkaian pengkondisi sinyal ini terdiri dari rangkaian penguat tegangan, penyearah setengah gelombang. Dengan demikian diharapkan nantinya *ouput* pengukuran bisa terbaca sesuai dengan yang diharapkan. Apabila diinginkan untuk mereduksi *noise* pada saat pengukuran bisa juga digunakan rangkaian filter dengan menggunakan Op-amp ini.

3.5 Perencanaan Pengujian

Pengujian ini secara umum bertujuan untuk memperoleh data berupa *output* dari alat ukur dan dibandingkan hasilnya antara perhitungan, alat ukur terkalibrasi dan hasil dari pengujian. Hal-hal yang dilakukan dalam pengujian antara lain adalah sebagai berikut :

3.5.1 Pengujian Rangkaian Pengkondisi Sinyal.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah rangkaian pengkondisi sinyal mampu memberikan keluaran seperti yang diharapkan dan mengetahui kesalahan pada pengukuran. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan tegangan keluaran dari transduser medan listrik. Keluaran transduser ini diuji dengan peningkatan kuat medan pada nilai tertentu. Hasilnya dibandingkan dengan perhitungan ataupun juga dibandingkan dengan alat ukur medan terkalibrasi. Dengan demikian dapat diketahui apakah rangkaian pengkondisi sinyal yang terdiri dari penyearah setengah gelombang dan pengali tegangan bisa berfungsi sesuai dengan yang diharapkan.

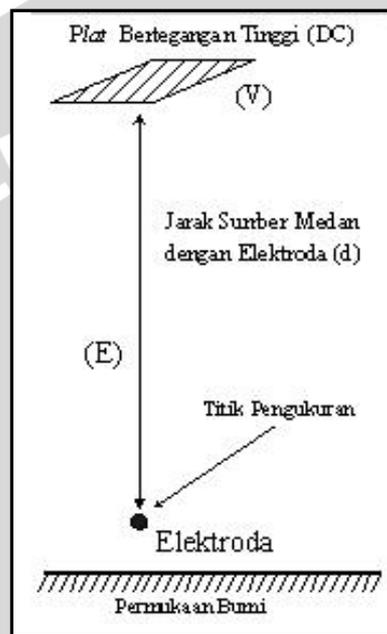
Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah :

1. Multimeter digital.
2. Oscilloscope.
3. Tacho meter.

3.5.2 Pengujian Elektroda

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah output dari elektroda sesuai hasil perhitungan ataukah tidak. Output dari elektroda diukur dengan menggunakan *oscilloscope* untuk mengetahui bentuk gelombang keluaran pengukuran. Nilai yang

terbaca pada *oscilloscope* nantinya akan menentukan perubahan yang diperlukan pada rangkaian pengkondisi sinyal. Pengujian dilakukan dengan cara menempatkan elektroda pada suatu titik, dimana titik tersebut dipengaruhi oleh medan listrik yang homogen dan besaran medan tersebut terukur dengan alat ukur medan yang terkalibrasi. Hal ini bertujuan untuk mengetahui besaran kuat medan pada skala terendah yang masih bisa terukur oleh elektroda yang dibuat dan juga bertujuan untuk mengetahui perubahan arus terhadap peningkatan kuat medan.



Gambar 3.6 Pengujian Elektroda
Sumber : Penulis

3.5.3 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performa dari keseluruhan sistem yang dibuat. Yaitu mulai bagian dari detektor (elektroda), pengkondisi sinyal maupun tampilan digital. Cara pengujiannya yaitu dengan menempatkan elektroda ukur pada suatu titik dimana besaran kuat medan telah diketahui dengan alat ukur terkalibrasi ataupun dengan perhitungan. Pengujian ini dilakukan beberapa kali dengan nilai kuat medan yang berbeda-beda, dan hasil pembacaan dari *display seven segmen* dicatat untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan. Dari hasil pengujian ini bisa diketahui tingkat kesalahan pengukuran dari seluruh bagian dari alat ukur medan yang dibuat.

3.6 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran dalam perancangan transduser ini diperoleh dari hasil analisa proses pembuatan, pengujian per-blok dan pengujian rangkaian secara keseluruhan.



BAB IV

PERANCANGAN DAN PENGUJIAN ALAT UKUR MEDAN LISTRIK SERTA ANALISIS HASIL PENGUKURAN

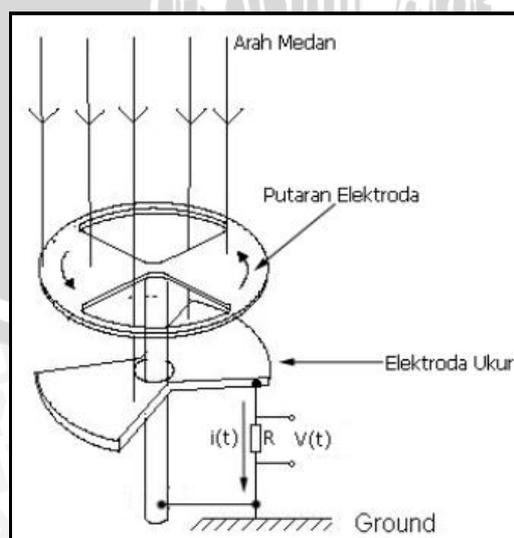
Pada perancangan elektroda ini ukuran fisik elektroda sangat berpengaruh pada arus keluaran yang akan diukur. Untuk itu perhitungan yang cermat harus dilakukan karena tidak memungkinkan untuk melakukan eksperimen dengan semua bentuk, bahan dan ukuran elektroda.

Perancangan elektroda direncanakan dibuat dengan elektroda yang menggunakan dua (2) segmen atau elektroda dengan empat (4) segmen. Perancangan ini meliputi :

1. Perancangan dimensi elektroda.
2. Perancangan kecepatan/konstruksi mekanik elektroda.
3. Perancangan pengkonversian arus keluaran elektroda.
4. Perancangan pengkondisi sinyal.
5. Perancangan ADC dan display.

4.1 Perancangan Dimensi Elektroda

Pengukuran dengan metode elektroda piring ini menggunakan arus sebagai parameter yang diukur. Arus ini dikonversikan menjadi tegangan dengan perantara sebuah resistor.



Gambar 4.1 Konversi Arus ke Tegangan
Sumber : Penulis

Dimensi elektroda ini selain ditentukan oleh skala terendah juga ditentukan oleh ketersediaan komponen pengkondisi sinyal dipasaran. Untuk tujuan tersebut maka komponen-komponen utama yang digunakan adalah :

1. Untuk bagian pengkondisi sinyal penulis menggunakan IC tipe LF 355 yang menggunakan transistor jenis efek medan yang memiliki kepresisian yang tinggi dan arus masukan tipikal sampai pada 30 pA (*data sheet* terlampir).
2. ADC dan *seven segmen driver* menggunakan IC CA3162 dan CA 3161 (*data sheet* terlampir).
3. Motor DC dengan tegangan dan kecepatan nominal 30 Volt dan kecepatan 5000 rpm.

4.1.1 Perancangan Arus Keluaran Elektroda

Sesuai dengan persamaan (2-10) dalam Bab II arus rata-rata (I_{rt}) keluaran elektroda didapatkan dari :

$$\begin{aligned} \blacksquare I_{rt} &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \frac{dq}{dt} dt \\ &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} dq \\ &= \frac{2}{T} \left| q \right|_0^{T/2} \\ &= \frac{2}{T} \left| q_{mak} - q_{min} \right| \end{aligned}$$

I_{rt} tersebut adalah harga arus rata-rata pada setengah periode. Nilai muatan maksimum (q_{mak}) dan muatan minimum (q_{min}) bisa diperoleh dengan :

$$\begin{aligned} \blacksquare q_{mak} &= \epsilon_0 \times E \times A \\ \blacksquare q_{min} &= 0 \end{aligned}$$

Jadi arus rata-rata (I_{rt}) bisa dicari dengan persamaan :

$$\blacksquare I_{rt} = \frac{2}{T} \times \epsilon_0 \times E \times A \quad (\text{persamaan 2-11})$$

Agar dapat dilakukan perhitungan maka harus ditentukan beberapa parameter yaitu :

1. Range pengukuran adalah antara 0,1 – 99,9 kVm⁻¹ maka penunjukkan skala terendah adalah 0,1 kVm⁻¹ atau 100 Vm⁻¹. Ditentukan nilai kuat medan terendah yang masih dapat diukur $E_{\min} = 100 \text{ Vm}^{-1}$.
2. Dalam skala ukur terendah yaitu saat $E_{\min} = E = 100 \text{ Vm}^{-1}$ ditentukan arus keluaran terendah $I_{rt} = \bar{I}_{\min} = 10 \text{ nA}$.
3. Resistor untuk meubah arus menjadi tegangan dengan nilai $R = 100 \Omega$.

Untuk lebih jelasnya persamaan diatas disusun kembali dengan notasi-notasi perancangan yaitu sebagai berikut :

- $$I_{rt} = \frac{2}{T} \times \epsilon_0 \times A_{eff} \times E$$

$$= \frac{2}{T} \times q_{mak}$$
- $$q_{mak} = \epsilon_0 \times A_{eff} \times E$$

dari persamaan ini terlihat bahwa parameter yang mempengaruhi arus rata-rata pada setengah gelombang keluaran elektroda adalah :

1. A_{eff} : luas permukaan elektroda yang terpajan oleh medan listrik (m²).
2. T : periode *output* arus dari elektroda ukur (s)
3. E : kuat medan pada *range* minimum terukur (Vm⁻¹)

dengan memasukkan parameter yang telah ditentukan diatas maka persamaan arus rata-rata skala terendah (\bar{I}_{\min}) adalah menjadi :

- $$10^{-8} = \frac{2}{T} \times (8,84 \times 10^{-12}) \times A_{eff} \times 100$$

$$10^{-8} = \frac{1,77 \times 10^{-9} \times A_{eff}}{T}$$

(persamaan 4-1)

Dari persamaan diatas terdapat dua (2) parameter yang belum diketahui untuk menentukan A_{eff} . Parameter periode (T) bisa diperoleh dengan menghitung kecepatan putar motor. Untuk memenuhi hal tersebut perlu dilakukan dulu perhitungan kecepatan dan konstruksi elektroda.

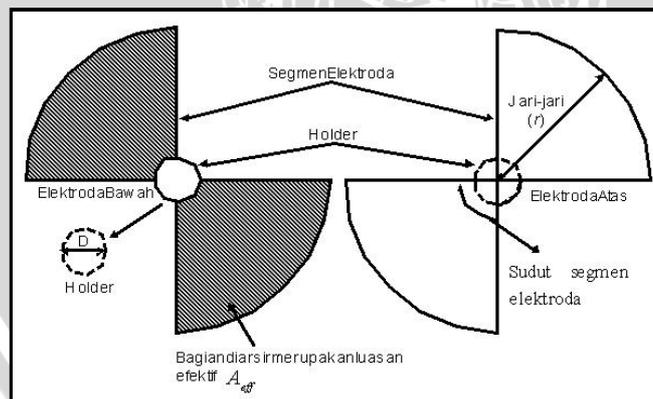
4.1.2 Perancangan Konstruksi dan Kecepatan Elektroda

Elektroda dirancang dan diupayakan memiliki dimensi yang kecil. Untuk memperoleh hasil pengukuran berupa gelombang arus/tegangan yang simetris maka masing-masing segmen elektroda haruslah sama luasnya dan menempati posisi yang saling berlawanan dalam suatu susunan lingkaran.

Pada perancangan dimensi elektroda ini perlu adanya pendefinisian beberapa notasi dimensi dan satuan antara lain :

- A_{maks} : merupakan luas elektroda keseluruhan dari elektroda ukur, dimana luasnya merupakan luas setengah lingkaran dengan notasi jari-jari r dalam satuan meter. Satuan luas yang digunakan adalah m^2 .
- A_{eff} : adalah luas elektroda maksimum (A_{maks}) dikurangi dengan luas penumpu (holder) elektroda. Satuannya adalah m^2 .
- A_{holder} : adalah luas holder segmen elektroda yang merupakan luas setengah lingkaran. Satuannya adalah m^2 .

A_{maks} yang mampu dicapai untuk memenuhi tujuan diatas adalah sebesar luas setengah lingkaran. Disini berarti untuk memperoleh perubahan posisi elektroda seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 sudut elektroda harus dibagi sebagai berikut :



Gambar 4.2 Elektroda dengan Dua Segmen
Sumber : Dieter Kind; 1993

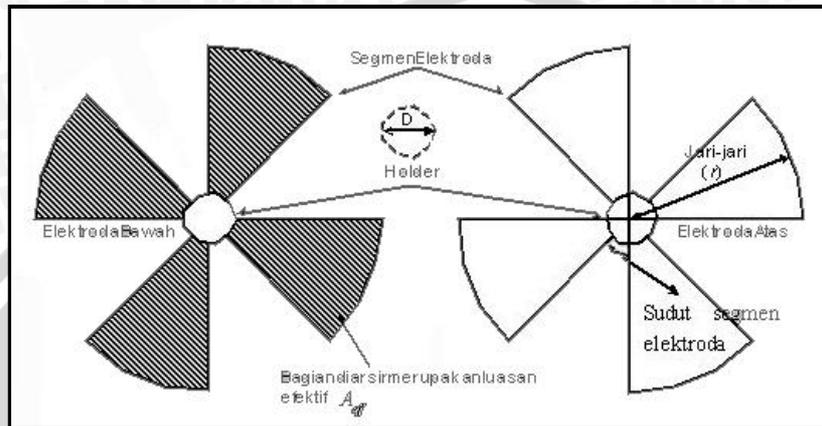
Untuk elektroda dengan dua (2) segmen, sudut pada setiap segmen dinotasikan sebagai θ bisa didapatkan dengan perhitungan sebagai berikut :

- Sudut pusat = 360°

- $$\theta = \frac{\text{Sudut Pusat}}{4}$$

$$= \frac{360}{4} = 90^\circ$$

Jadi elektroda dua (2) segmen masing-masing segmen mempunyai sudut 90° .



Gambar 4.3 Elektroda dengan Empat Segmen
 Sumber : Dieter Kind; 1993

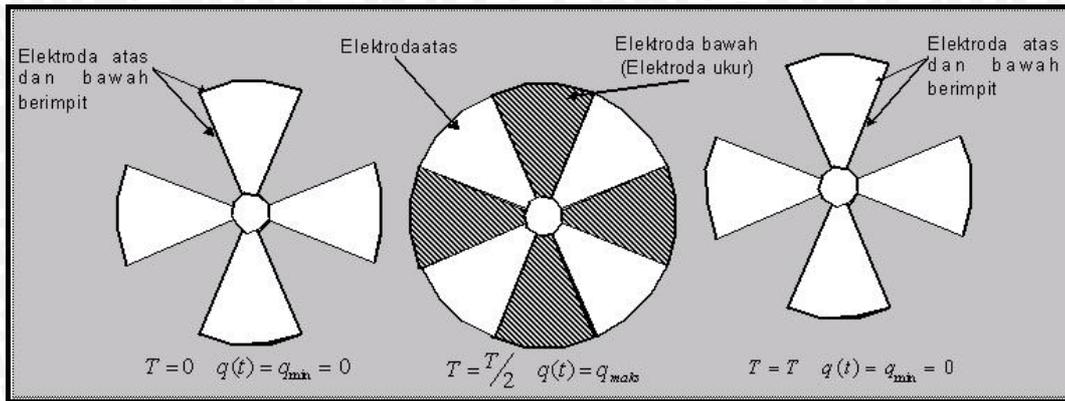
Untuk elektroda dengan empat (4) segmen θ adalah :

- $$\text{Sudut masing-masing segmen} = \frac{360}{8}$$

$$= 45^\circ$$

Jadi masing-masing segmen mempunyai sudut pusat sebesar 45° .

Dalam perancangan alat ukur medan ini, kecepatan mekanik sebagaimana telah dijelaskan dalam persamaan diatas menentukan besar keluaran dari elektroda karena berpengaruh pada periode (T). Elektroda yang akan dibuat direncanakan terdapat dua (2) macam yaitu elektroda dengan dua (2) segmen dan empat (4) segmen. Perubahan posisi elektroda dari keadaan tidak berimpit, kemudian berangsur-angsur berubah ke keadaan berimpit sempurna dan kembali tidak berimpit sama sekali memiliki keluaran satu periode.



Gambar 4.4 Posisi dan Periode Elektroda
 Sumber : Dieter Kind; 1993

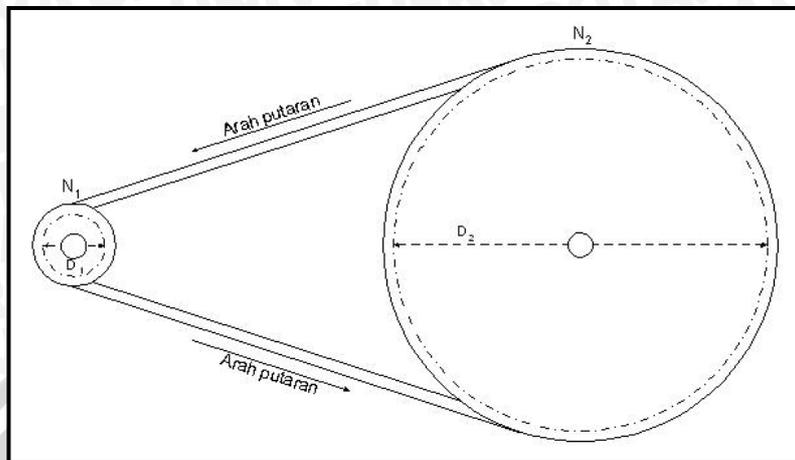
Sebagai contoh adalah gambar elektroda dengan elektroda ukur yang memiliki empat (4) segmen elektroda.

- Gambar paling kiri menjelaskan saat elektroda pada posisi awal, yaitu saat sebelum berputar dan menutupi elektroda ukur sehingga muatan yang diterima elektroda ukur adalah nol ($q_{\min} = 0$).
- Gambar ditengah menjelaskan saat elektroda ukur yang diarsir terbuka sempurna terhadap medan listrik dan didapatkan muatan maksimum q_{\max} . Muatan maksimum ini didapatkan saat $t = T/2$.
- Gambar paling kanan menjelaskan saat satu siklus terjadi dan elektroda ukur tertutupi secara sempurna oleh elektroda atas. Muatan kembali berharga nol ($q_{\min} = 0$).

Hal yang sama juga berlaku pada elektroda dengan dua (2) segmen. Yang membedakan adalah jumlah periode pengukuran pada tiap putaran. Apabila elektroda dengan empat segmen dalam satu putaran terdapat empat periode, maka untuk elektroda dengan dua (2) segmen hanya terdapat dua (2) periode saja.

Elektroda dalam pengukuran ini dirancang dengan kecepatan yang bisa diubah-ubah. Motor yang digunakan sebagai penggerak adalah motor DC dengan kecepatan nominal 5000 rpm pada tegangan 30 volt. Antara poros elektroda dengan poros motor dihubungkan dengan sabuk penggerak. Rasio perubahan kecepatan antara poros elektroda dan poros motor adalah rasio dari garis tengah katrol/puli. Rasio antara diameter puli dengan kecepatan adalah sebagai berikut :

- $\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$



Gambar 4.5 Roda Penggerak Elektroda

Sumber : Sharon, D; 1992

Bila perbandingan antara puli motor dan puli elektroda adalah 2 : 6, maka kecepatan putaran elektroda maksimum yang bisa dicapai adalah :

- $\frac{N_1}{5000} = \frac{6}{2}$
- $N_1 = \frac{5000 \times 6}{2} = 15.000 \text{ rpm}$
- $N_1 = \frac{15.000}{60} = 250 \text{ rps}$

Dengan demikian bisa didapatkan periode pengukuran yang tinggi untuk memperoleh arus keluaran elektroda yang lebih tinggi. Pada saat pengukuran putaran elektroda ini diukur dahulu dengan menggunakan tachometer agar bisa diketahui frekwensi pengukuran yang sedang dilakukan. Perubahan kecepatan dan besar periode yang bisa diperoleh dan akan dilakukan pada pengujian :

- $N_{\min} = 10 \text{ rps} = 600 \text{ rpm}$ (kecepatan minimum)
- $N_{\max} = 250 \text{ rps} = 15.000 \text{ rpm}$ (kecepatan maksimum)

untuk memperoleh dimensi A_{eff} maka ditentukan kecepatan terendah yang akan dimasukkan dalam perhitungan adalah :

- $N_{\min} = 10 \text{ rps}$

nilai dari frekwensi pengukuran dapat dicari dengan persamaan berikut :

- $f = \text{Kecepatan}(rps) \times \text{jumlah segmen}$

Dengan kecepatan maksimum 15.000 *rpm* atau 250 *rps* maka dapat diperoleh frekwensi pengukuran maksimum yaitu :

$$\bullet f = 250 \times 4 = 1.000 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$$

dengan cara yang sama maka dilakukan perubahan kecepatan elektroda untuk memperoleh perioda pengukuran yang bervariasi dan diperoleh perubahan hasil seperti pada tabel berikut.

Tabel 4.1 Perhitungan Frekwensi dan Kecepatan Putar Elektroda

$N_{\text{elektroda}}$ (<i>rps</i>)	$N_{\text{elektroda}}$ (<i>rpm</i>)	Elektroda 2 segmen		Elektroda 4 segmen	
		f (Hz)	T (s)	f (Hz)	T (s)
20	1.200	40	0,025	80	0,0125
40	2.400	80	0,0125	160	0,0063
60	3.600	120	0,0083	240	0,0042
80	4.800	160	0,0063	320	0,0031
100	6.000	200	0,005	400	0,0025
120	7.200	240	0,0042	480	0,0021
140	8.400	280	0,0036	560	0,0018
160	9.600	320	0,0031	640	0,0016
180	10.800	360	0,0028	720	0,0014
200	12.000	400	0,0025	800	0,0013

Sumber : Perhitungan

Dari hasil perhitungan diatas terlihat bahwa dengan kecepatan yang rendah saja maka elektroda dengan empat (4) segmen menghasilkan frekwensi (f) yang lebih besar sehingga menghasilkan periode pengukuran (T) yang lebih kecil.

4.1.3 Perhitungan Dimensi

Dengan memasukkan harga T pada Tabel 4.1 pada persamaan 4-1 maka didapat harga luas efektif (A_{eff}) sebagai berikut.

1. Perhitungan A_{eff} untuk elektroda 2 Segmen :

$$\bullet \text{ Pada } N = 20 \text{ rps} ; T = 0,025 \text{ s}$$

$$\bullet A_{\text{eff}} = \frac{10^{-8} \times 0,025}{1,77 \times 10^{-9}} = 0,14 \text{ m}^2$$

$$\bullet A_{\text{maks}} = A_{\text{eff}} + A_{\text{holder}}$$

- $A_{holder} = \frac{1}{2} \times \pi \times r_{holder}^2$ $r = 1,5 \text{ cm} = 1,5 \times 10^{-2} \text{ m}$
- $= \frac{1}{2} \times \pi \times (1,5 \times 10^{-2})^2$
- $= 3,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- $A_{maks} = 0,14 + 3,5 \times 10^{-4}$
- $= 0,14 \text{ m}^2$

Dengan luas *holder* A_{holder} diperoleh harga A_{maks} yang hampir mendekati harga A_{eff} ($A_{mak} \approx A_{eff}$). Maka dari itu luas *holder* ini diabaikan dan hasil perhitungan persamaan 4-1 dianggap sebagai nilai luas efektif A_{eff} .

- $A_{maks} = \frac{1}{2} \times \pi \times r_{elektroda}^2$
- $r_{elektroda} = \sqrt{\frac{2 \times A_{mak}}{\pi}}$
- $= \sqrt{\frac{2 \times 0,14}{\pi}}$
- $= 0,3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$

Dengan jari-jari seperti hasil diatas maka ukuran elektroda dengan dua (2) segmen terlalu besar. Alat ukur medan ini didesain memiliki dimensi relatif kecil untuk memudahkan pemakaian.

2. Perhitungan A_{eff} untuk elektroda 4 Segmen :

- Pada N $= 20 \text{ rps}$; T $= 0,025 \text{ s}$
- $A_{eff} = \frac{10^{-8} \times 0,0125}{1,77 \times 10^{-9}}$
- $= 0,07 \text{ m}^2$
- $A_{maks} = 0,07 + 3,5 \times 10^{-4}$
- $r_{elektroda} = \sqrt{\frac{2 \times A_{mak}}{\pi}}$
- $= \sqrt{\frac{2 \times 0,07}{\pi}}$
- $= 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$

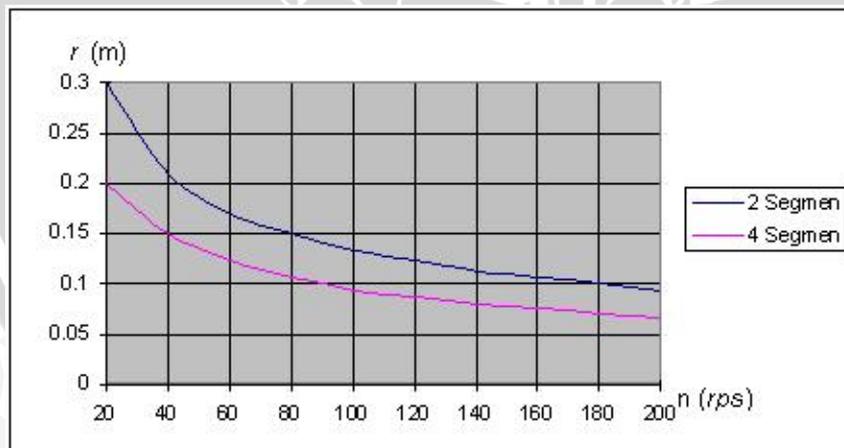
Dengan cara yang sama untuk elektroda dengan dua (2) dan empat (4) didapat hubungan karakteristik jari-jari dengan kecepatan putaran yang ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 4.2 Hubungan Antara Kecepatan dan Luas Elektroda

N (<i>rps</i>)	E_{\min} (Vm^{-1})	\bar{I}_{\min} (nA)	r Elektroda 2 Segmen (m)	r Elektroda 4 Segmen (m)
20	100	10	0,3	0,2
40			0,21	0,15
60			0,17	0,124
80			0,15	0,107
100			0,134	0,094
120			0,124	0,087
140			0,113	0,08
160			0,107	0,076
180			0,101	0,071
200			0,094	0,067

Sumber : Perhitungan

Dari Tabel 4.2 diatas bisa dibuat grafik hubungan antara kecepatan dengan jari-jari elektroda untuk kedua jenis elektroda yaitu sebagai berikut.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Kecepatan dan Jari-jari

Sumber : Perhitungan

Dari Grafik 4.6 diatas terlihat bahwa pada medan dan arus keluaran yang sama, bila kecepatan diperbesar maka jari-jari elektroda bisa semakin diperkecil. Elektroda dirancang dengan dimensi sekecil mungkin, akan tetapi bila kecepatan terlalu tinggi akan sangat berpengaruh pada konstruksi mekanik elektroda, baik pada kekuatan

mekanik maupun bising yang ditimbulkan pada waktu pengukuran. Untuk itu maka berdasarkan perhitungan diatas dipilih elektroda dengan jari-jari $r = 0,094 \text{ m} = 9,4 \text{ cm}$ yang diputar pada kecepatan 6000 rpm .

Untuk mengetahui apakah hasil pengukuran ini linier atau tidak maka perlu dilakukan perhitungan lebih lanjut. Perhitungan ini melibatkan parameter sebagai berikut :

- Jenis elektroda = elektroda 4 segmen
- N = 6.000 rpm ; T = $0,0025 \text{ s}$
- Jari-jari = $0,094 \text{ m}$; $A_{eff} = 0,014 \text{ m}^2$

Karakteristik antara kuat medan (E) dengan arus rata-rata (\bar{I}) keluaran bisa diketahui dengan persamaan :

- $I_{rt} = \frac{2}{T} \times \epsilon_0 \times A_{eff} \times E$

$$I_{rt} = E \times \left[\frac{2 \times \epsilon_0 \times A_{eff}}{T} \right]$$

$$k = \left[\frac{2 \times \epsilon_0 \times A_{eff}}{T} \right]$$

Dengan memasukkan T, A_{eff} untuk setiap perubahan bisa diperoleh I_{rt} untuk setiap perubahan E pada nilai antara $100 - 1000 \text{ Vm}^{-1}$ yaitu dengan perhitungan sebagai berikut :

- $k = \left[\frac{2 \times \epsilon_0 \times A_{eff}}{T} \right]$
 $= \left[\frac{2 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,014}{0,0025} \right]$
 $= 9,9 \times 10^{-11} \text{ Fms}^{-1}$.

- $I_{rt} = k \times E$
 $= 9,9 \times 10^{-11} \times 100$
 $= 9,9 \times 10^{-9} \text{ A}$
 $= 9,9 \text{ nA}$

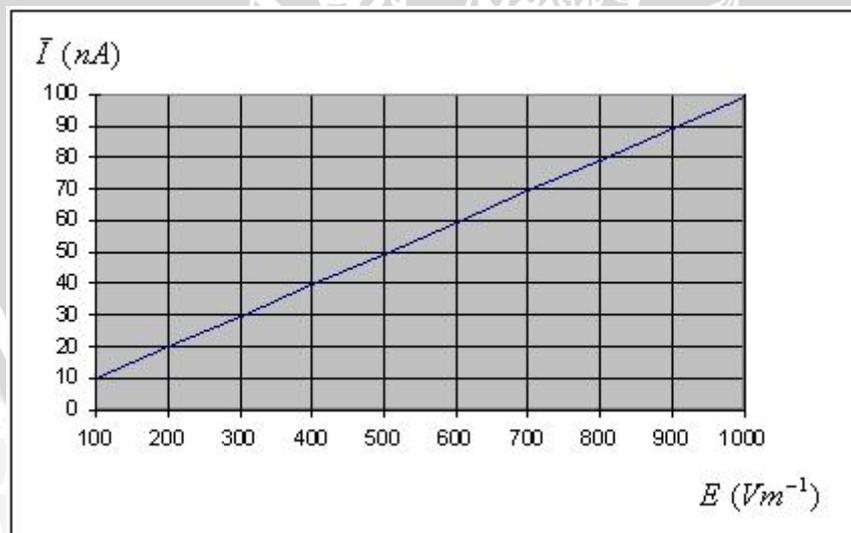
harga arus rata-rata untuk nilai E yang lain untuk cara yang sama terlihat pada tabel berikut :

Tabel 4.3 Harga Rata-rata Arus pada E yang Berbeda ($E= 100 -1.000 \text{ Vm}^{-1}$)

Kuat Medan (E) (Vm^{-1})	Konstanta (Fms^{-1})	Arus Rata-rata (nA)
100	$9,9 \times 10^{-11}$	9,9
200		19,8
300		29,7
400		39,6
500		49,5
600		59,4
700		69,3
800		79,2
900		89,1
1.000		99

Sumber : Perhitungan

Dari Tabel 4.3 diatas didapatkan grafik hubungan antara kuat medan dan arus keluaran elektroda sebagai berikut :



Gambar 4.7 Grafik Hubungan $E \text{ (Vm}^{-1}\text{)}$ dan $\bar{I} \text{ (nA)}$

Sumber : Tabel Hasil Perhitungan

Pada grafik 4.7 diatas terlihat bahwa setiap kenaikan kuat medan yang menerpa elektroda ukur maka arus rata-rata yang mengalir juga semakin besar. Kenaikan arus rata-rata ini linier dan sebanding dengan kuat medan dikalikan dengan konstanta ($E \times k$).

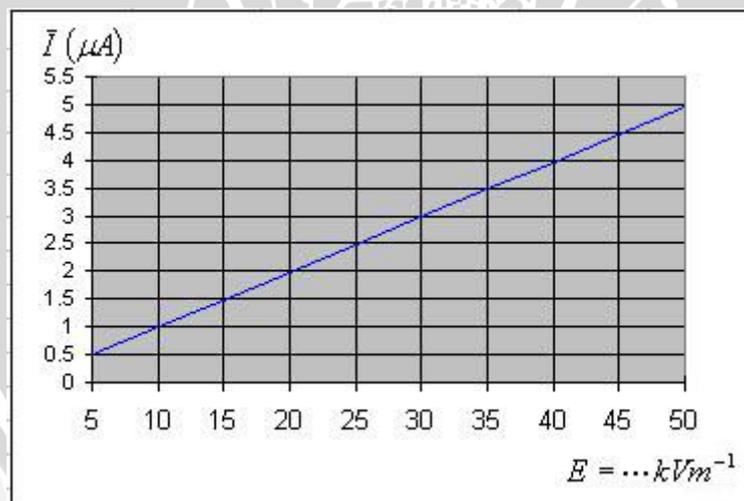
Untuk harga-harga kuat medan yang lebih besar, grafik hubungan antara kuat medan dengan arus keluaran rata-rata diperoleh sebagai berikut :

Tabel 4.4 Harga Rata-rata Arus pada E yang Berbeda ($E= 5.000 - 50.000 \text{ Vm}^{-1}$)

Kuat Medan (E) (Vm^{-1})	Konstanta (Fms^{-1})	Arus Rata-rata (μA)
5.000	$9,9 \times 10^{-11}$	0,5
10.000		0,99
15.000		1,49
20.000		1,98
25.000		2,48
30.000		2,97
35.000		3,47
40.000		3,96
45.000		4,46
50.000		4,95

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.4 diatas didapatkan grafik hubungan antara kuat medan dan arus keluaran elektroda sebagai berikut :



Gambar 4.8 Grafik Hubungan E (kVm^{-1}) dan \bar{I} (μA)

Sumber : Tabel Hasil Perhitungan

Dari gambar grafik diatas terlihat bahwa pada kuat medan yang tinggi yaitu pada kuat medan 5 kV sampai 50 kV arus keluaran linier. Semakin besar kuat medan maka semakin besar arus keluaran. Apabila arus ini diubah menjadi tegangan , maka

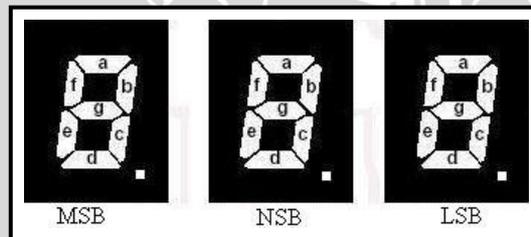
tegangan berubah secara linier dan apabila dikuatkan akan menghasilkan keluaran penguatan yang linier juga.

4.2 Perhitungan Tegangan *Input* ADC

Keluaran parameter kuat medan akan ditampilkan dalam satuan kVm^{-1} . Dengan menggunakan IC tipe CA3161 dan CA3162 yang merupakan ADC 10 bit, data masukan berupa tegangan dikonversi menjadi data digital dengan tampilan 3 digit. Apabila tegangan referensi ADC tersebut adalah 1 volt maka resolusi ADC tersebut adalah :

$$\begin{aligned} \text{Resolusi ADC} &= \frac{1}{2^{10}} \\ &= \frac{1}{1024} \\ &= 0,001 \text{ Volt atau } 1 \text{ mV} \end{aligned}$$

Jadi ADC tersebut berubah tampilannya apabila terdapat perubahan step tegangan sebesar 1 mV. *Input* dari ADC ini terdiri dari dua (2) pin, yaitu *ground* dan V_{input} . Apabila masukan (*input*) tersebut diberi tegangan 1 mV, maka tampilan LSB (Low Significant Bit) akan menunjukkan angka 1, sedangkan NSB dan MSB menunjukkan nol (0). Demikian seterusnya untuk setiap step perubahan tegangan masukan.



Gambar 4.9 Display Seven Segment
Sumber : Data Sheet CA3162/CA3162

Penunjukkan skala terendah membutuhkan tegangan masukan 1 mV. Tegangan ini harus merupakan tegangan searah karena ADC hanya bisa mengolah tegangan searah. Tegangan input ADC pada skala terendah (V_{min}) adalah :

$$\text{Resolusi ADC} = 1 \text{ mV}$$

Pada gelombang dengan bentuk persegi maka tegangan puncak (V_p) sebelum dan sesudah penyearahan adalah tetap. Sedangkan yang berubah adalah tegangan efektif

(V_{ef}) dan tegangan rata-rata (V_{rt}). Faktor puncak (f_p) serta faktor bentuk (f_b) tegangan setengah gelombang adalah :

- $f_p = \sqrt{(f_p')^2 \cdot 2}$ (f_p' = faktor puncak pada gelombang penuh)
- $f_b = 2 \times f_b'$ (f_b' = faktor bentuk pada gelombang penuh)

Hubungan antara V_p , V_{ef} dan V_{rt} dengan faktor puncak (f_p) dan faktor bentuk (f_b) adalah sebagai berikut :

- $f_p = \frac{V_p}{V_{ef}}$ (f_p' dan f_b' untuk gelombang penuh = 1)
- $f_b = \frac{V_{ef}}{V_{rt}}$

Apabila V_{min} adalah tegangan rata-rata dari tegangan masukan penyearah setengah gelombang maka tegangan puncak (V_p) masukan penyearah adalah :

- $V_{ef} = 2 \times 1$
 $= 2 mV$
- $V_p = 1,41 \times 2$
 $= 2,8 mV$

Jadi tegangan masukan dari penyearah adalah merupakan tegangan bolak-balik dengan nilai puncak

- $V_p = 2,8 mV$

tegangan efektif (V_{ef}) masukan penyearah sama dengan tegangan puncak karena faktor puncak (f_p) adalah 1 :

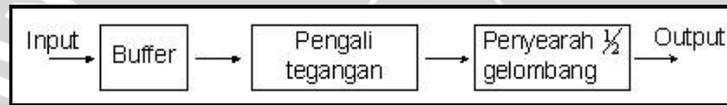
- $V_{ef} = 2,8 mV$

Dalam Gambar 4.1 telah dijelaskan bahwa arus yang akan diukur dikonversikan menjadi tegangan. Untuk menimbulkan beda potensial yang cukup besar untuk dapat dikuatkan, maka digunakan nilai resistansi $R = 100 \Omega$. Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.3 didapatkan pada skala terendah arus keluaran yang merupakan nilai efektif adalah 9,9 nA. Maka tegangan efektif diantara resistor (V_R) adalah :

- $$\begin{aligned}
 V_R &= I \times R \\
 &= 9,9 \text{ nA} \times 100 \\
 &= 990 \text{ nV} = 0.99 \text{ } \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

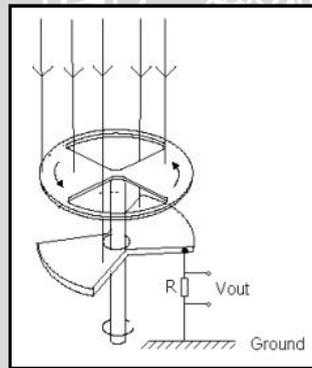
4.3 Perancangan dan Pengujian Rangkaian Pengkondisi Sinyal

Arus keluaran dari transduser menurut perhitungan sangatlah kecil, yaitu dalam orde *nA* (nanoAmpere). Dengan alat-alat ukur yang tersedia maka tidak dapat dilakukan pengukuran secara langsung pada keluaran elektroda yang diketanahkan karena *range* alat ukur hanya berkisar pada nilai miliAmpere. Jadi untuk bisa melakukan pengukuran harus dilakukan penguatan. Adapun susunan dan bagian dari rangkaian pengkondisi sinyal ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.10 Blok Diagram Pengkondisi Sinyal
 Sumber : Penulis

Output dari elektroda yang berupa arus bolak-balik yang bernilai sangat kecil yaitu dalam orde nanoAmpere dikonversikan terlebih dahulu menjadi tegangan melalui perantara sebuah resistor dengan suatu nilai tertentu.

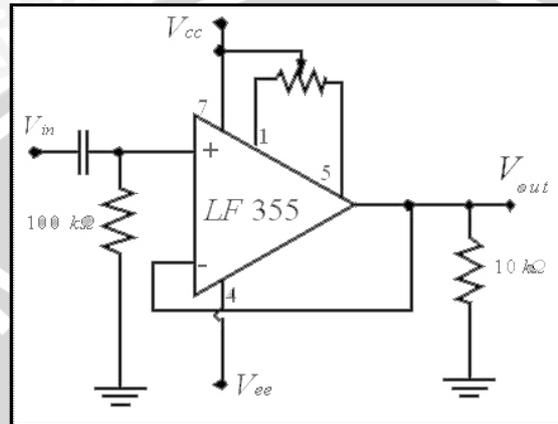


Gambar 4.11 Konversi Arus ke Tegangan
 Sumber : Penulis

4.3.1 Perancangan Rangkaian Buffer

Rangkaian buffer ini memiliki komponen pokok berupa penguat operasi (*operational-Amplifier*). Dalam sebuah pengukuran yang dibutuhkan untuk diukur adalah berupa sinyal saja sehingga dalam pengukuran diusahakan untuk tidak membawa pengaruh penurunan besaran listrik pada subyek yang akan diukur. Untuk

itu digunakan rangkaian buffer yang merupakan Op-Amp dengan penguatan satu (1). Penguat operasional yang digunakan untuk rangkaian buffer ini menggunakan IC tipe LF 355. Pemilihan IC tipe ini didasarkan pada kemampuan masukan yang meliputi arus masukan dan tegangan masukan. IC tipe ini memiliki kemampuan masukan dalam satuan yang sangat kecil karena menggunakan transistor jenis efek medan (FET).



Gambar 4.12 Rangkaian Buffer
Sumber : Penulis

4.3.2 Perancangan Penguat Tegangan

Dengan menggunakan elektroda yang memiliki $r = 9,4$ cm, maka dengan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya pada medan listrik yang diukur dengan skala terendah adalah 100 Vm^{-1} , maka arus output adalah $9,9 \text{ nA}$ pada putaran elektroda 6.000 rpm dengan periode pengukuran $T = 0,0025 \text{ s}$. Sesuai dengan konstruksi yang telah direncanakan bahwa arus keluaran dari elektroda diubah menjadi tegangan dengan nilai $V_R = 0,99 \mu\text{V}$

Maka penguatan yang diperlukan untuk menaikkan tegangan agar sesuai dengan input ADC adalah :

$$\begin{aligned}
 \blacksquare A &= \frac{V_{out}}{V_{in}} \\
 &= \frac{2,8 \text{ mV}}{0,99 \mu\text{V}} \\
 &= \frac{2800 \mu\text{V}}{0,99 \mu\text{V}} \\
 &= 2828,3
 \end{aligned}$$

Untuk memperoleh penguatan yang diinginkan maka dilakukan penguatan secara kaskade dengan dua (2) tingkat penguatan.

Penguatan tingkat pertama :

- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$
- $A = 100$
- $A = \frac{R_2}{R_1} + 1$
- $R_2 = (100 - 1) \times 10.000$
 $= 99.000 \Omega = 99 \text{ k}\Omega$

Nilai yang tersedia dipasaran adalah 100 k Ω maka resistor yang dipasang adalah nilai tersebut. Nilai penguatan pertama akan berubah dengan perhitungan sebagai berikut :

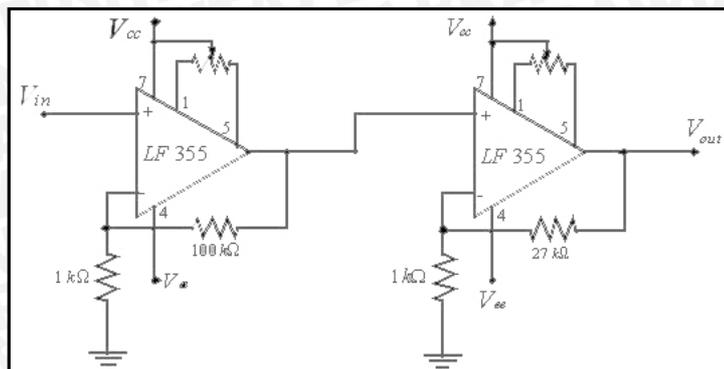
- $A = \frac{100.000}{1.000} + 1$
 $= 101$

Penguatan tingkat kedua :

- A tingkat kedua $= \frac{2828,3}{A \text{ tingkat pertama}}$
 $= \frac{2828,3}{101}$
 $= 28$
- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = (28 - 1) \times 1000$
 $= 27.000 \Omega = 27 \text{ k}\Omega$

nilai yang tersedia dipasaran yang paling mendekati adalah 27 k Ω - 33 k Ω . Untuk penguatan kedua ini dipakai resistor jenis variabel dengan nilai 50 k Ω untuk memudahkan melakukan *setting*. Penguatan total adalah :

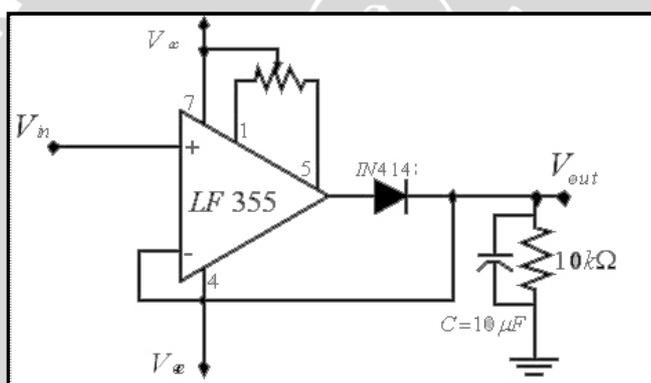
- $A = A_{\text{tingkat pertama}} \times A_{\text{tingkat kedua}}$
 $= 101 \times 28$
 $= 2828$



Gambar 4.13 Rangkaian Penguat Tegangan
Sumber : Penulis

4.3.3 Perancangan Penyearah Setengah Gelombang

Pada dasarnya yang dapat diubah kedalam bentuk digit oleh konverter analog-digital hanyalah tegangan searah. Karena itu untuk mengukur tegangan bolak-balik diperlukan penyearahan.



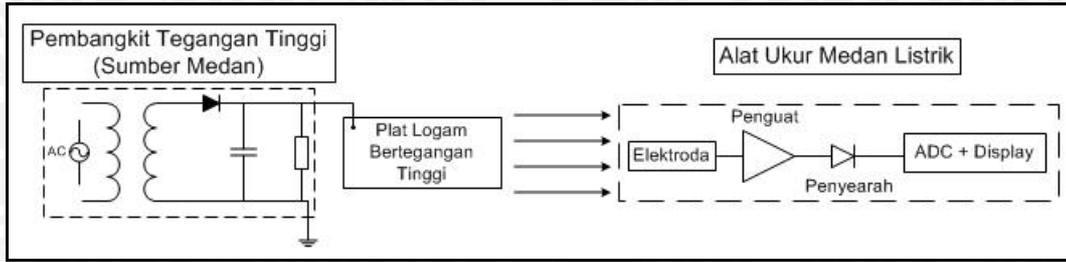
Gambar 4.14 Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang
Sumber : Penulis

4.4 Pengujian Pengkondisi Sinyal dan Elektroda

Pengujian pengkondisi sinyal dan elektroda ini dilakukan dengan peralatan sebagai berikut :

- *Oscilloscope* Philips (tipe PM 3365 A)
- *Multimeter* Digital Sunwa (tipe DT 890 B)

Secara umum, pengujian yang dilakukan meliputi banyak hal yang mencakup seluruh sistem. Blok diagram pengujian bisa dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.15 Blok Diagram Pengujian Sumber : Penulis

Perincian hal-hal yang dilakukan dalam pengujian adalah sebagai berikut.

4.4.1 Pengujian Pengkondisi Sinyal

Pengujian pengkondisi sinyal ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan rangkaian pengkondisi sinyal dalam jangkauan $1 \mu\text{V}$ s/d $999 \mu\text{V}$ dengan faktor penguatannya $A = 2828$. Dengan menghitung selisih antara tegangan *output* hasil perhitungan dan hasil pengukuran maka bisa diketahui *error* (keliru) yang berasal dari rangkaian pengkondisi sinyal. Perhitungan *error* (keliru) adalah sebagai berikut :

- $\% \text{ error} = \left| \frac{\text{Hsl Perhitungan} - \text{P.dg Pengkondisi Sinyal}}{\text{Hsl Perhitungan}} \right| \times 100\%$
- $\% \text{ error Rata - Rata} = \left| \frac{\sum \text{Kesalahan}}{n} \right|$

Karena range *input* yang terlalu luas maka untuk pengujian ini dibatasi pada nilai *input* tegangan antara $0,99 \mu\text{V} - 9,9 \mu\text{V}$. Dengan memasukkan persamaan diatas maka bisa diperoleh *error* untuk masing-masing nilai tegangan adalah sebagai berikut :

- $\% \text{ error} = \left| \frac{0,993 - 0,9}{0,993} \right| \times 100\%$
 $= 9,37 \%$

Dengan cara yang sama bisa diperoleh *error* yang terjadi pada masing-masing masukan pengkondisi sinyal seperti yang tercantum pada tabel berikut.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Pengkondisi Sinyal

V_{input} (μV)	V_{out} Perhitungan (mV)	V_{out} Pengukuran (mV)	Error %
0,99	0,993	0,9	9,37
1,98	1,986	1,9	4,33
2,97	2,978	2,9	2,62
3,96	3,971	3,9	1,79
4,95	4,964	4,9	1,29
5,94	5,957	5,9	0,96
6,93	6,95	6,9	0,72
7,92	7,942	7,9	0,53
8,91	8,935	8,9	0,39
9,9	9,928	9,9	0,28

Sumber: Perhitungan dan Pengukuran

Error rata-rata bisa dicari yaitu dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{■ } \% \text{ error Rata - Rata} &= \frac{22,28}{10} \\ &= 2,23 \% \end{aligned}$$

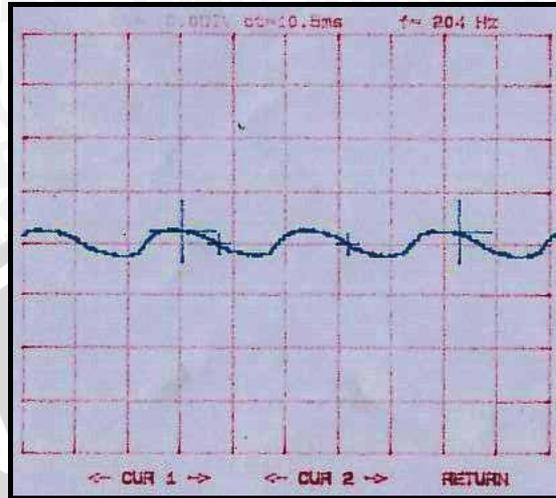
4.4.2 Pengujian Elektroda

Pengujian elektoda ini bertujuan untuk mengetahui bentuk gelombang keluaran dengan menggunakan osiloskop. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan tegangan tinggi AC yang disearahkan setengah gelombang pada siklus positif yang dilengkapi dengan pengatur tegangan.

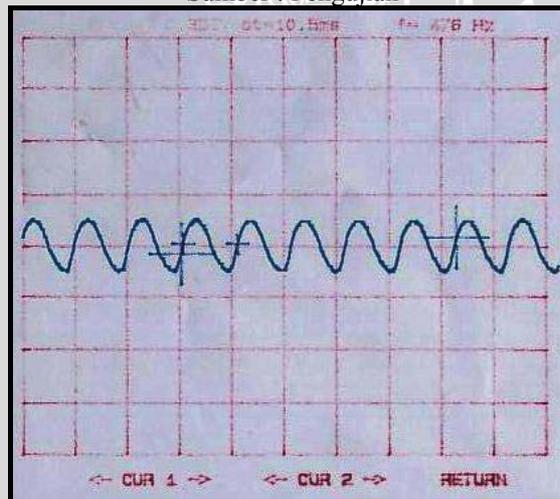


Gambar 4.16 Susunan Pengujian Elektroda
Sumber : Pengujian

Bentuk gelombang keluaran elektroda ini diukur dengan osiloskop. Pengukuran ini dilakukan pada tegangan yang sama tetapi dengan putaran yang berbeda. Hasil pengukurannya adalah sebagai berikut.



Gambar 4.17 Hasil Pengukuran Pada $V = 30,1$ kV dan $f = 204$ Hz
Sumber : Pengujian



Gambar 4.18 Hasil Pengukuran Pada $V = 30,1$ kV dan $f = 476$ Hz
Sumber : Pengujian

Pengukuran diatas dilakukan pada :

- V/div = 0,2 V
- $Time/div$ = 2 ms
- d = 1 m
- R = 100 Ω

Dari kedua hasil pengujian dengan osiloskop diatas terlihat bahwa dengan tegangan yang sama dan kecepatan putaran yang berbeda maka dengan kecepatan putaran

yang lebih besar, frekwensi yang dihasilkan juga semakin besar. Periode pengukuran terlihat semakin kecil dengan demikian arus rata-rata penyearahan setengah gelombang akan menjadi lebih besar.

4.4.3 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem yang telah dibuat dalam pengukuran kuat medan listrik statis. Pengujian ini dilakukan dengan cara yang sama dengan pengujian elektroda yaitu dengan menempatkan elektroda dengan jarak d (m) dari sumber medan. Kuat medan pada elektroda ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut:

- $V = E \times d$

Dengan V : Tegangan pada plat pengujian (kV)

E : Kuat medan listrik pada titik d (V/m)

d : Jarak plat bertegangan dengan elektroda (meter)

Hasil pengujian dan perhitungan keliru (error) untuk keseluruhan alat ukur medan ini adalah sebagai berikut.

- $$\% \text{ error} = \left| \frac{\text{Hsl Perhitungan} - \text{Hsl Pengukuran}}{\text{Hsl Perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$= \left| \frac{5 - 4,9}{5} \right| \times 100\%$$

$$= 2\%$$

Tabel 4.6 Hasil Pengujian dan Perhitungan Alat Ukur Medan Listrik

Tegangan Plat (V)	Kuat Medan E Perhitungan (kV/m)	Kuat Medan E Pengukuran (kV/m)	Error (%)
5.000	5	4,9	2
10.000	10	9,8	2
15.000	15	14,7	2
20.000	20	19,6	2
25.000	25	24,5	2
30.000	30	29,7	2
35.000	35	34,3	2
40.000	40	39,2	2
45.000	45	44,1	2
50.000	50	49,0	2

Sumber : Pengujian

- $\% \text{ error Rata - Rata} = \left| \frac{20}{10} \right|$

= 2 %

Dari hasil pengujian didapatkan kesimpulan bahwa kesalahan pengukuran pada kuat medan yang semakin besar dengan bukti pengukuran pada kuat medan 5 – 50 kV/m maka *error* pengukuran akan cenderung konstan yaitu sebesar 2 %.



BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran tentang analisa perancangan dan hasil pengujian Alat Ukur Medan Listrik yang dibuat.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap alat ini baik pengujian perblok maupun pengujian secara keseluruhan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Alat Ukur Medan Listrik ini mempunyai bentuk gelombang keluaran yang sesuai dengan referensi yaitu dengan bentuk gelombang keluaran kotak (*Square*) dan merupakan arus bolak-balik.
2. Rangkaian pengkondisi sinyal mampu menguatkan keluaran dari elektroda pada skala terendah yaitu 1 μV hingga pada skala tertinggi yaitu 999 μV dengan tingkat kesalahan rata-rata 9,37 % pada penguatan sebesar 2828 kali.
3. Dari perbandingan antara hasil pengujian dan pengukuran maka diperoleh *error* (keliru) rata-rata adalah sebesar 2 %.
4. Spesifikasi alat ukur :

▪ <i>Range</i> pengukuran	: 0,1 – 99,9	
▪ Satuan	: kVm^{-1}	
▪ Catu daya	: <i>Op-Amp</i>	: ± 15 Volt DC
	: ADC	: 5 Volt DC
	: Motor	: 0 – 30 Volt
▪ Sensitivitas	: 1 mV / 100 Vm^{-1}	
▪ Dimensi	: Elektroda	: 30 × 15 × 20
	: Peng. Sinyal	: 30 × 22 × 10

5.2 Saran

Dalam rancang bangun Alat Ukur Medan Listrik ini ada beberapa untuk dijadikan pertimbangan demi pengembangan lebih lanjut yaitu antara lain :

1. Alat Ukur Medan ini bisa juga diaplikasikan untuk pengukuran medan yang berubah terhadap waktu dengan meniadakan putaran elektroda atas dan memposisikan elektroda bawah terbuka sempurna terhadap sumber medan serta melakukan kalibrasi dan *setting* ulang terhadap pengkondisi sinyal.
2. Untuk memperbesar range pengukuran untuk ukuran elektroda yang sama ukurannya bisa dilakukan dengan merubah putaran pada panel yang telah tersedia dan dilakukan *setting* ulang pengkondisi sinyal dan dikalibrasi lagi.
3. Dalam pengukuran benda-benda yang bisa menimbulkan distorsi medan harus diperhatikan. Sebagai contoh benda-benda tersebut adalah pohon, mesin-mesin, kendaraan dan lain-lain.



DAFTAR PUSTAKA

Anonymous. 1997. CA3161 *Data Sheets*

Anonymous. 2002. CA3162 *Data Sheets*

Anonymous. 2000. LF355 *Data Sheets*

D Sharon, J Harstein dan G Yantian. 1987. *Robotic and Automated Manufacturing*. London : Pitman Publishing.

Hermagasantos, Ir, M. Sc. *Teknik Tegangan Tinggi*. Cetakan pertama. Jakarta:PT Rosda Jayaputra

KIND, Dieter.1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan KT Sirait. Bandung: Penerbit ITB

Malvino, Albert Paul. 1981. *Electronic Principles 2nd Edition*. Cetakan kedua. Terjemahan Hanapi Gunawan. Jakarta: Erlangga

SUDIRHAM, Sudaryatno. 2002. *Analisis Rangkaian Listrik*. Bandung : Penerbit ITB

Wasito S. 1992. *Data Sheet Book 1*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo

Wasito S. 1985. *Teknik Ukur dan Peranti Ukur Elektronik* . Jakarta: PT Gramedia