



TUGAS AKHIR - SF141501

**RANCANG BANGUN ELECTROSTATIC
PRECIPITATOR SEBAGAI SALAH SATU
SUBSISTEM DALAM PENANGKAPAN HASIL
PARTIKEL SPRAY PYROLYSIS**

**ROZAQ ALFAN WIRANATA
NRP 1113100036**

**Dosen Pembimbing
Dr. Melania Suweni Muntini, M.T
Diky Anggoro M.Si**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - SF141501

**RANCANG BANGUN ELECTROSTATIC
PRECIPITATOR SEBAGAI SALAH SATU
SUBSISTEM DALAM PENANGKAPAN HASIL
PARTIKEL SPRAY PYROLYSIS**

**ROZAQ ALFAN WIRANATA
NRP 1113100036**

**Dosen Pembimbing
Dr. Melania Suweni Muntini, M.T
Diky Anggoro M.Si**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - SF141501

**DESIGN OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR
AS ONE SUBSYSTEM IN COLLECT SPRAY
PYROLYSIS PARTICLE OUTCOME**

**ROZAQ ALFAN WIRANATA
NRP 1113100036**

**Advisor
Dr. Melania Suweni Muntini, M.T
Diky Anggoro M.Si**

**Physics Department
Faculty of Mathematics and Science
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

Rancang Bangun *Electrostatic Precipitator* Sebagai Salah Satu Subsistem dalam Penangkapan Hasil Partikel *Spray Pyrolysis*

TUGAS AKHIR

Disusun untuk memenuhi Syarat kelulusan mata kuliah Tugas Akhir
Program Strata 1

Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ROZAQ ALFAN WIRANATA

NRP. 1113 100 036

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Pembimbing I :

(Dr. Melania Suweni Muntini, MT)

NIP. 196412291990022001

Pembimbing II :

(Diky Anggoro, M.Si)

NIP. 198508092014041003



RANCANG BANGUN ELECTROSTATIC PRECIPITATOR SEBAGAI SALAH SATU SUBSISTEM DALAM PENANGKAPAN HASIL PARTIKEL SPRAY PYROLYSIS

Nama Mahasiswa : Rozaq Alfian Wiranata
NRP : 1113100036
Departemen : Fisika
Dosen Pembimbing: Dr.Melania Suweni Muntini, MT
Diky Anggoro, M.Si

Abstrak

Spray pyrolysis adalah suatu metode yang dapat menghasilkan partikel hingga ukuran submikron. Hasil dari *spray pyrolysis* perlu tangkap. Suatu penyaring khusus diperlukan yang sesuai dengan kebutuhan laboratorium. *Electrostatic precipitator* dapat menangkap partikel-partikel kecil dengan membuat partikel tersebut bermuatan dan bergerak ke elektroda kolektor akibat pengaruh medan listrik. Penelitian ini menggunakan *power supply* tegangan tinggi pada *electrostatic precipitator*. Pembentukan korona oleh tegangan tinggi menyebabkan terbentuknya unipolar ion diantara elektroda. Fenomena partikel *drift* pada *electrostatic precipitator* berguna untuk mengetahui panjang lintasan minimum partikel tertangkap. Luasan dari elektroda kolektor dapat diketahui berdasarkan efisiensi yang diinginkan. Rancang bangun *electrostatic precipitator* tidak terlepas dari parameter-parameter yang telah ditetapkan seperti kecepatan aliran udara, tegangan pada elektroda, jari-jari partikel dan parameter lainnya. Kontrol medan listrik pada *electrostatic precipitator* dapat dilakukan dengan mengatur tegangan pada power supply tegangan tinggi. Didapatkan hasil efisiensi tertinggi pada penelitian ini sebesar 93,8% pada konfigurasi elektroda jenis plat sejajar dengan debit udara 2liter/menit dan tegangan sebesar 50 kilovolt.

Kata Kunci : *electrostatic, medan listrik, tegangan tinggi.*

DESIGN OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR AS ONE SUBSYSTEM IN COLLECT SPRAY PYROLYSIS PARTICLE OUTCOME

Name : Rozaq Alfian Wiranata
NRP : 1113100036
Department : Physics
Advisor : Dr.Melania Suweni Muntini, MT
Diky Anggoro, M.Si

Abstract

Spray pyrolysis is a method that can produce particles up to submicron size. The results of spray pyrolysis need to be collected. Special filters are required to compatible the laboratory's needs. Electrostatic precipitators can filter small particles by making them charged and moving to collector electrodes due to electric field effects. This research uses high voltage power supply in electrostatic precipitator. The formation of corona by high voltage causes the formation of unipolar ions between the electrodes. The drift particle phenomenon in the electrostatic precipitator is used for knowing the length of the minimum trajectory of the collect particle. The area of the collector electrode can be determined based on the desired efficiency. The design of electrostatic precipitator can not be separated from predetermined parameters such as airflow velocity, voltage on the electrode, particle radius and other parameters. Electric field in electrostatic precipitator can be controled by adjusting the voltage on high voltage power supply. The highest efficiency result of this research is 93,8% in parallel plate electrode configuration with flow rate 2liter / min and applied voltage 50 kilovolt.

Keyword : *electrostatic, electric field, high voltage*

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat-Nya , petunjukNya atas nikmat iman, islam, dan ikhsan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Rancang Bangun Electrostatic Precipitator Sebagai Salah Satu Subsisem dalam Penangkapan Hasil Partikel Spray Pyrolysis**” dengan optimal dan tepat waktu. Tugas Akhir (TA) ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas bantuan, dorongan, dan juga bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik. Sehubungan dengan hal tersebut, maka penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis, (Yoni dan Sumiati Mahmudah tercinta) atas semua dukungan dan doa yang telah diberikan kepada penulis.
2. Dr. Melania Suweni Muntini, M.T dan Diky Anggoro, M.Si selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan dosen wali penulis yang telah membagi pengalaman serta memberikan pengarahan selama proses penelitian dan penyusunan laporan.
3. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng. selaku Ketua Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Diky Anggoro, M.Si selaku Ketua Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi yang selalu memberikan dukungan dan motivasinya kepada mahasiswa di lingkungan Laboratorium Elektronika.
5. Seluruh staf pengajar yang telah membimbing dan

memberikan ilmu yang bermanfaat selama masa perkuliahan kepada penulis.

6. Teman-teman angkatan 2013, terutama Farida, Tito, Ira, Bekti, Udin, dan Badri yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam kelancaran penyusunan Tugas Akhir.
7. Serta semua pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas semua bantuan dan doa dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari akan adanya kekurangan dalam penulisan laporan ini karena keterbatasan wawasan dan pengetahuan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak agar lebih baik di masa yang akan datang. Semoga laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat berguna dan dimanfaatkan dengan baik sebagai referensi bagi yang membutuhkan serta menjadi sarana pengembangan kemampuan ilmiah bagi semua pihak yang bergerak dalam bidang Fisika Instrumentasi dan Elektronika. Aamiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, 25 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PAGE TITLE	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Spray Pyrolysis</i>	5
2.2 <i>Electrostatic Precipitator</i>	6
2.3 Korona	9
2.4 Pemuatan Partikel	12
2.5 Partikel <i>Drift</i>	13
2.6 Efisiensi ESP.....	16
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Diagram alir Penelitian	19
3.2 Pembuatan Power Supply High Voltage	20

3.3 Kalibrasi Power Supply High Voltage.....	21
3.4 Perancangan Electrostatic Precipitator	21
3.4.1 Plat sejajar.....	22
3.4.2 <i>Wire To Plate</i>	22
3.4.3 Perhitungan Konfigurasi Elektroda	23
3.5 Pengujian Efisiensi ESP.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Karakterisasi Power Supply High Voltage	29
4.2 Penentuan Rentang Power Supply High Voltage	29
4.3 Pemetaan Linearitas Tegangan Pada Arduino	33
4.4 Hasil Pengukuran Efisiensi Pada ESP	35
4.4.1 Efisiensi ESP Plat Sejajar	35
4.4.2 Efisiensi ESP <i>Wire To Plate</i>	38
BAB V PENUTUP.....	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	47
BIODATA PENULIS.....	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Spray Pyrolysis</i>	5
Gambar 2.2 <i>Electrostatic precipitator</i> pada industri sebagai penyaring gas keluaran	7
Gambar 2.3 <i>Electrostatic precipitator</i> tipe one-stage.....	8
Gambar 2.4 <i>Electrostatic precipitator</i> tipe two-stage.....	9
Gambar 2.5 Fenomena pada <i>electrostatic precipitator</i>	11
Gambar 2.6 Gaya-gaya yang bekerja pada saat partikel drift	14
Gambar 2.7 Partikel bermuatan yang melewati suatu ESP jenis wire-cylinder(tubular).....	16
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	19
Gambar 3.2 Skema rangkaian <i>power supply high voltage</i>	20
Gambar 3.3 Skema rangkaian kalibrasi tegangan tinggi	21
Gambar 3.3 Konfigurasi bentuk elektroda plat sejajar (a) sejajar dengan arah aliran (b) tegak lurus terhadap arah aliran	22
Gambar 3.5 Konfigurasi elektroda <i>wire to plate</i>	23
Gambar 3.6 Diagram alir desain <i>electrostatic recipitator</i>	24
Gambar 3.7 Diagram alir pengujian efisiensi	27
Gambar 4.1 Hasil keluaran tegangan power supply terhadap ADC masukan arduino pada rentang 300bit hingga 500 bit	29
Gambar 4.2 Hasil keluaran tegangan power supply terhadap ADC masukan arduino pada rentang 300bit hingga 380 bit	30
Gambar 4.3. Sinyal tegangan 25KV pada ADC 0 bit	30

Gambar 4.4 Sinyal tegangan 30KV pada ADC 320 bit	31
Gambar 4.5 Sinyal tegangan 50KV pada ADC 380 bit	31
Gambar 4.6 Sinyal tegangan 130KV pada ADC 1023 bit ...	32
Gambar 4.7 Mapping linearitas pada tiap rentang tertentu..	33
Gambar 4.8 Efisiensi plat sejajar tegangan 30KV variasi debit	35
Gambar 4.9 Efisiensi plat sejajar tegangan 40KV variasi debit	35
Gambar 4.10 Efisiensi plat sejajar tegangan 50KV variasi debit	36
Gambar 4.11 Efisiensi plat sejajar debit 2L/menit variasi tegangan.....	37
Gambar 4.12 Efisiensi plat sejajar debit 4L/menit variasi tegangan.....	37
Gambar 4.13 Efisiensi plat sejajar debit 6L/menit variasi tegangan.....	37
Gambar 4.14 Efisiensi <i>Wire To Plate</i> tegangan 30KV variasi debit	38
Gambar 4.15 Efisiensi <i>Wire To Plate</i> tegangan 40KV variasi debit	39
Gambar 4.16 Efisiensi <i>Wire To Plate</i> tegangan 50KV variasi debit	39
Gambar 4.17 Efisiensi <i>Wire To Plate</i> debit 2L/menit variasi tegangan.....	40
Gambar 4.18 Efisiensi <i>Wire To Plate</i> debit 6L/menit variasi tegangan.....	40
Gambar 4.19 Efisiensi <i>Wire To Plate</i> debit 6L/menit variasi tegangan.....	41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengambilan data tegangan terhadap ADC...	47
Lampiran 2. Data hasil pengukuran efisiensi pada plat sejajar	49
Lampiran 3. Data hasil pengukuran efisiensi pada wire to plate	50
Lampiran 4. Pengukuran efisiensi pada ESP	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Spray pyrolysis adalah suatu metode yang dapat menghasilkan partikel hingga ukuran submikron. *Spray pyrolysis* menggunakan prekursor yang diletakkan pada suatu alat *nebulizer* sehingga menjadi bentuk *droplet-droplet* kecil dalam wujud gas. *Droplet-droplet* kecil, yang dinamakan aerosol, kemudian dilewatkan pada suatu pemanas (*furnace*) sehingga terjadi reaksi kimia akibat adanya induksi thermal pada partikel dan menjadikannya kedalam wujud padatan serbuk (*powder*). Hasil dari *spray pyrolysis* ini menghasilkan *powder* yang memiliki komposisi kimia yang sama dikarenakan prekursor dalam kondisi stoikiometri. Penggunaan *spray pyrolysis* juga tidak memerlukan jenis prekursor yang mudah menguap. (Toivo Mark,1999)

Hasil dari *spray pyrolysis* perlu diambil namun diperlukan penyaring khusus karena memiliki ukuran partikel hingga submikron, dan juga partikel yang ditangkap haruslah mudah diambil tanpa mempengaruhi sifat maupun morfologi dari partikel itu sendiri. Sehingga digunakanlah penyaring jenis *Electrostatic Precipitator*(ESP). ESP mulai dikembangkan sejak peristiwa hilangnya asap pada botol kaca yang terdapat muatan listrik didalamnya pada tahun 1824 oleh Hohlfeld. Pada tahun 1880 oleh asosiasi bernama Lodge di Jerman mulailah beragam percobaan terhadap ESP dan mulai dikomersialkan pada tahun 1883. Penyaring jenis ini dapat menangkap partikel-partikel kecil dengan membuat partikel tersebut bermuatan. Tegangan listrik tinggi diperlukan agar tercipta korona yang menyebabkan molekul gas disekitarnya terionisasi dan daerah sekitar korona tersebut dipenuhi oleh *unipolar* ions. Ketika partikel melewati daerah tersebut partikel termuati dan akan mudah menempel pada kolektor yang telah dibumikan (*grounded*). Partikel-partikel bermuatan yang telah menempel pada kolektor akan melepas

muatannya (*discharged*) ke *ground* (potensial nol) akibat sifat dari muatan tersebut. (Straus,1975).

ESP dibedakan dalam 2 jenis yaitu *single-stage* dan *two-stage*. Berdasarkan jenis elektroda yang terdapat pada ESP, dapat dikelompokkan menjadi *plate-plate*, *wire-plate*, dan *wire-cylinder*. Berbagai penelitian tentang ESP menunjukkan adanya pengaruh berbagai variasi yang diantaranya adalah pengaruh suhu, pengaruh ukuran partikel, pengaruh tekanan, pengaruh *air flow rate*, pengaruh *air density* dan lain-lain. Biasanya ESP diaplikasikan pada penyaringan partikel gas dengan volume besar. ESP untuk kepentingan laboratorium perlu adanya rancangan khusus karena ukurannya yang tidak terlalu besar. Tugas akhir ini diharapkan rancang bangun ESP yang dapat menangkap partikel dengan efisiensi tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana membuat rancang bangun *Electrostatic Precipitator* sebagai salah subsistem *Spray Pyrolysis*.
- b. Bagaimana cara mengontrol medan listrik pada *Electrostatic Precipitator* untuk tegangan tertentu.
- c. Bagaimana efisiensi *Electrostatic Precipitator* pada tiap tegangan tinggi tertentu.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

- a. Membangun sebuah *Electrostatic Precipitator* sebagai salah subsistem *Spray Pyrolysis*.
- b. Kontrol medan listrik pada *Electrostatic Precipitator* untuk tegangan tertentu.
- c. Mengetahui efisiensi *Electrostatic Precipitator* pada tiap tegangan tinggi tertentu.

1.4 Batasan Masalah

Pada pembuatan rancang bangun *Electrostatic Precipitator* ini menggunakan beberapa batasan yaitu:

- a. Diameter partikel yang digunakan berada pada ukuran mikro.
- b. Temperatur dan tekanan pada *Electrostatic Precipitator* dianggap sama dan tidak mempengaruhi efisiensi.
- c. Aliran fluida pada *Electrostatic Precipitator* dianggap laminar dan tidak mempengaruhi efisiensi.

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah penelitian ini dilakukan, diharapkan dapat memberikan berbagai manfaat sebagai berikut :

- a. Sebagai subsistem dalam penelitian *Spray Pyrolysis*.
- b. Dapat membuat *Electrostatic Precipitator* dengan efisiensi tinggi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang uraian teori yang mendukung analisis di penelitian ini.

BAB III METODOLOGI

Bab ini berisi tentang alat dan bahan, data penelitian, serta metode-metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan selama penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil analisis dan pembahasan data/informasi serta pembahasan hasil analisis.

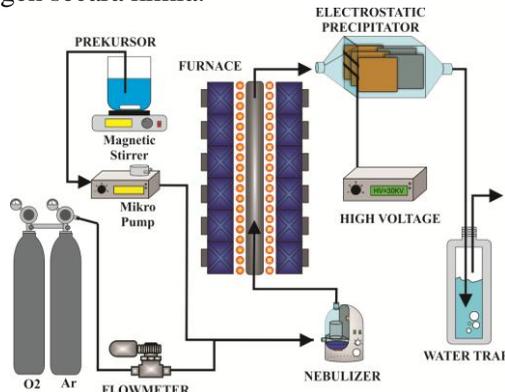
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi hasil penarikan kesimpulan yang didapat dari hasil analisa yang sudah dilakukan pada bab sebelumnya serta saran dari peneliti.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Spray Pyrolysis*

Spray Pyrolysis adalah suatu solusi dari suspensi prekursor yang melewati suatu generator prekursor menjadi bentuk *droplet* pada wujud gas. *Droplet* ini kemudian dipanaskan dengan cara melewati aerosol melewati suatu tabung yang terdapat pemanas atau dilewatkan ke dalam *burner* atau sumber energi panas lain. Dimana terjadi reaksi kimia akibat induksi termal pada partikel atau reaksi dengan gas *coreactant* dan merubah prekursor menjadi *powder*, *powder* ini kemudian dikumpulkan. *Spray pyrolysis* ini adalah termasuk salah satu metode aerosol yang dapat memproduksi *metal oxide* kompleks yang homogen secara kimia.



Gambar 2.1 *Spray Pyrolysis*

Spray pyrolysis memiliki beberapa keuntungan pada generasi teknologi konversi dari gas ke partikel pada material yang multikomponen. Konversi gas ke partikel atau proses nukleasi tidaklah mudah menghasilkan multikomponen material. Berdasarkan tingkat kesulitan dalam mendapatkan prekursor yang mudah mengendap dan mengontrol proses nukleasinya beberapa

aspek dilibatkan. *Spray pyrolysis* dapat membuat partikel dengan komposisi kimia yang sama dari partikel. Karena prekursor ada pada kondisi stoikiometri yang tepat pada tiap *droplet* generator. Maka setiap *droplet* memiliki komponen yang sama dan prekursor yang mudah mengendap tidak dibutuhkan

Beberapa keuntungan dari *Spray pyrolysis* adalah

1. *Powder* hasil *Spray pyrolysis* lebih terkristalisasi dan sedikit terjadi aglomerasi. Hal ini disebabkan karena partikel terpapar langsung oleh temperatur tinggi.
2. Dapat menghasilkan partikel komposit yang mengandung elemen yang sulit untuk dijadikan satu pada ukuran submikro dengan metode lain.
3. Pada reaksi kimia padatan menghasilkan partikel yang lebih kecil dan proses berubah hingga didapatkan material yang homogen.
4. Skala pemisahan tidak lebih besar dari ukuran partikel(biasanya $<1\mu\text{m}$) dan sering kali lebih kecil(biasanya $<0.1\mu\text{m}$).

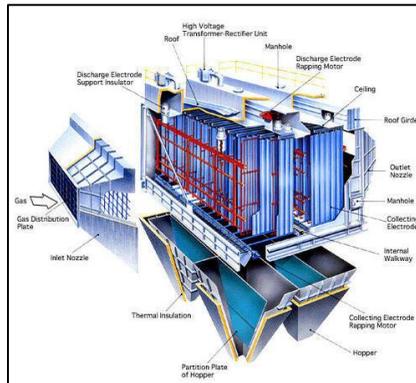
Kekurangan hasil dari *Spray pyrolysis* produksi yang rendah dengan biaya yang besar. Teknologi ini lebih cocok untuk material yang memiliki nilai lebih. *Spray pyrolysis* sangat susah dalam mengontrol bentuk morfologi dari partikel.(Kodas and Hampden-Smith, 1999)

2.2 Electrostatic Precipitator

Electrostatic precipitator (ESP) dikembangkan sejak banyaknya penemuan-penemuan tentang gejala elektrostatis. Penyaring jenis ini dapat menangkap partikel-partikel kecil dengan membuat partikel tersebut bermuatan. ESP sering digunakan untuk menyaring suatu gas yang berukuran sangat besar dan tanpa resiko ledakan. Berikut beberapa keuntungan penggunaan ESP.(Strauss, 1975)

1. *Low-pressure drop*
2. Memiliki efisiensi yang tinggi pada partikel kecil

3. Kemampuan untuk mengatasi gas dan kabut untuk volume yang besar
4. Mudahnya melepas partikel yang terkumpul pada kolektor.

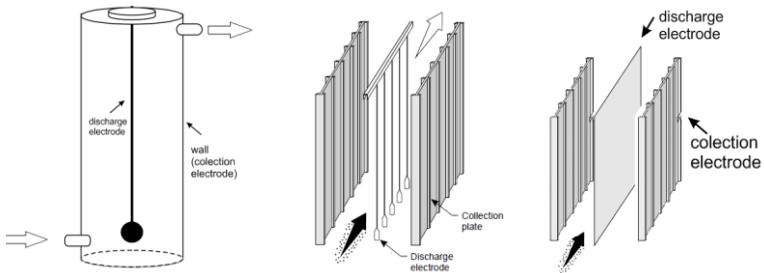


Gambar 2.2 *Electrostatic precipitator* pada industri sebagai penyaring gas keluaran

Secara sederhana ESP dibagi menjadi 4 tahapan yaitu pemberian muatan pada partikel yang ingin di dikumpulkan, ditangkapnya partikel oleh kolektor, partikel bermuatan dinetralisasi pada kolektor dan kemudian diambil atau dibersihkan partikel yang terkumpul dikolektor. Digunakanlah tegangan tinggi (*high voltage*) dengan arus DC dengan rentang 25 kilovolt hingga 100 kilovolt. Pemberian tegangan yang terlalu tinggi ini akan menyebabkan terbentuknya korona. Pemberian tegangan tinggi ini menyebabkan gas sekitar elektroda tersebut terionisasi. Hingga terbentuknya *unipolar* ion pada daerah sekitar elektroda bertegangan tinggi (elektroda *charging*). Partikel yang lewat daerah sekitar elektroda akan termuati dan medan listrik sekitar elektroda akan menyebabkan terjadinya partikel drift yang menuju ke kolektor. (Perkins, 1974)

Electrostatic precipitator memiliki variasi yang beragam tergantung tinjauannya dan pengaplikasiannya. Berdasarkan tipe elektroda kolektor (kolektor) dibagi menjadi tipe silinder dan tipe

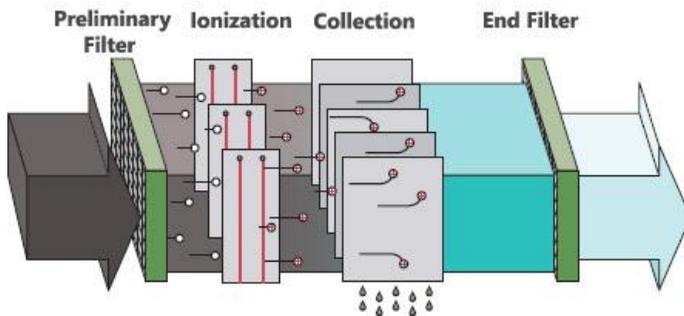
plat. Berdasarkan arah aliran dibagi menjadi aliran gas vertikal dan aliran gas horizontal. Berdasarkan letak geometri elektrodanya dibagi menjadi *one stage* dan *two stage*. Sistem *one stage* didesain dengan cara elektroda *discharging* dan elektroda kolektor berada pada daerah yang sama sehingga proses pemberian muatan dan kolektoran partikel berada pada medan listrik yang sama. Sistem *two stage* didesain dengan peletakan elektroda *discharging* dan elektroda kolektor ditempatkan pada daerah berbeda sehingga proses pemberian muatan dan penangkapan partikel berada pada medan listrik yang berbeda. Pada sistem penyaringan industri sering digunakan *one stage* tipe plat dengan aliran gas horizontal. *One stage* lebih baik digunakan untuk menekan proses kolektoran kembali pada partikel. Sedangkan *two stage* ESP dapat digunakan untuk mengumpulkan kabut partikel dan partikel *adhesive*. Dimana pada tipe ini dapat ditambahkan luasan kolektor dengan cara mengurangi jarak antar elektroda, dan juga ukuran ESP dapat dikurangi. (Mizuno, 2000)



Gambar 2.3 Electrostatic precipitator tipe one-stage

Pada *two stage* ESP terdapat bagian elektroda *discharging* dan elektroda kolektor. Pada saat gas masuk kedalam ESP terlebih dahulu melewati daerah pemuat (bermuatan), dimana terdapat korona pada elektroda *discharging*. Korona positif digunakan pada kebanyakan aplikasi *two stage* ESP, hal ini dikarenakan daerah pemuat lebih kecil dibandingkan korona negatif. Partikel gas tersebut lebih sebentar berada pada daerah pemuatan korona positif, sehingga akan terjadi sedikit sekali

partikel gas yang terkumpul pada daerah ini. Elektroda *discharging* pada *two stage* memang tidak ditunjukkan untuk partikel menempel. Kemudian partikel gas akan melewati daerah elektroda kolektor dimana daerah ini terdapat medan listrik dimana dipengaruhi oleh elektroda *discharging*. Keberhasilan dari suatu ESP ditentukan oleh *supply* ion yang menempel pada partikel dan pengaruh medan listrik sehingga partikel bergerak menuju elektroda kolektor. (Crawford, 1976)



Gambar 2.4 *Electrostatic precipitator tipe two-stage*

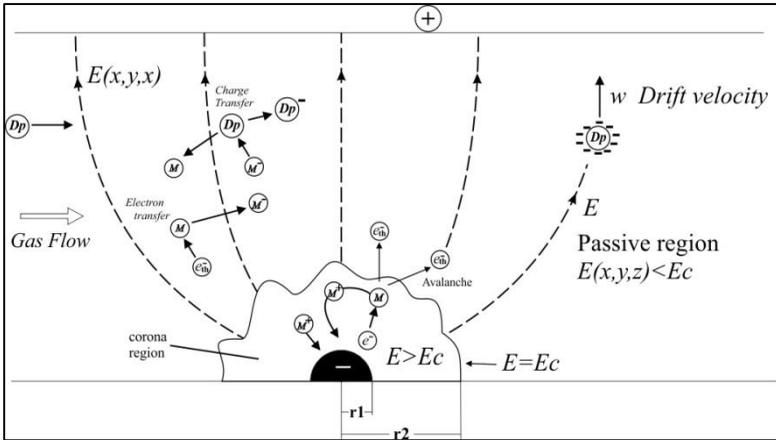
2.3 Korona

Ketika suatu potensial listrik diletakkan pada dua plat sejajar maka akan terbentuk suatu medan listrik yang seragam. Ketika medan listrik tersebut berada pada titik kritisnya sekitar 3MVm^{-1} , maka akan terjadi lompatan listrik menyerupai kilat antara kedua plat dan juga dapat menghasilkan suara sehingga dapat dirasakan melalui penglihatan dan pendengaran. Bagaimanapun medan listrik tidaklah selalu seragam, bisa saja terbentuk akibat dari potensial dari kabel ke suatu plat atau suatu silinder. Hal ini dapat menyebabkan sesuatu berpijar yang disebut sebagai korona, tanpa adanya kilatan. Korona yang dihasilkan dari listrik AC berbeda dengan listrik DC. Karena pada listrik AC potensial pada suatu titik akan berganti-ganti dari positif ke negatif dan berulang seterusnya. Pada listrik DC makan potensial pada suatu titik tersebut akan tetap sehingga menghasilkan korona potensial positif dan korona potensial negatif. Jika dikaitkan

dengan proses pemuatan partikel. Korona AC akan menghasilkan gerak osilasi saat memuati partikel. Korona DC akan menyebabkan partikel termuati bergerak menuju elektroda kolektor.

Berikut mekanisme pembentukan korona negatif. Pembentukan korona dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah korona dan kedua daerah pasif. Daerah korona adalah suatu daerah yang sangat tipis mengelilingi titik potensialnya. Elektroda *discharging* akan melepaskan elektron yang disebut longSORan elektron (*elektron avalanche*) sehingga pada daerah ini suatu elektron mengalami kecepatan yang sangat tinggi, dan ketika elektron tersebut menumbuk suatu molekul gas, elektron tersebut akan mengeluarkan elektron dari molekul. Gas berion positif ini akan bergerak menuju katoda yang bersifat netral. Elektron-elektron yang baru terbentuk bergerak dan mengionisasi molekul-molekul gas lainnya atau bergerak menuju anoda. Daerah korona dibatasi dengan medan listrik yang semakin melemah dimana elektron tidak sanggup lagi untuk mengionisasi molekul gas netral. Ketika ada partikel yang melewati daerah ini maka partikel cenderung termuati secara positif dikarenakan banyak gas yang berion positif dan mobilitas elektron yang tinggi. (Strauss, 1975)

Daerah pasif adalah dimana daerah yang berda diluar daerah korona, dimana elektron tidak sanggup lagi mengionisasi molekul gas netral. Elektron-elektron yang berada daerah ini akan menempelkan dirinya ke molekul gas melewati proses yang disebut transfer elektron. Pada *Electrostatic precipitator* jumlah molekul per unit volumenya jauh lebih besar dibandingkan partikel debu yang dibawa. Sehingga elektron jauh lebih banyak menempel pada molekul gas dan menyebabkan banyaknya produksi ion negatif dibandingkan elektron yang menempel pada partikel debu. Pada perjalannya ion-ion negatif bertemu dengan partikel debu dan memberikan muatan negatifnya ke partikel, hal ini disebut transfer muatan. (Heinsohn and Kabel, 1999)



Gambar 2.5 Fenomena pada *electrostatic precipitator*

Pada ESP terbagi menjadi daerah korona dan daerah pasif. Ion-ion positif lebih banyak pada daerah korona, sedangkan pada daerah pasif berisikan ion-ion negatif dan elektron akibat proses transfer muatan dan *avalanche*. Pada pembentukan korona positif terjadi beberapa perbedaan dibandingkan korona positif. Perbedaan yang paling mencolok adalah hasil dari pendaran koronanya. Elektron bebas akan menuju ke daerah elektroda *charging* yang diberikan tegangan positif. Serta menghasilkan ion-ion positif pada daerah korona ini, dan menuju ke daerah elektroda kolektor. Ketika ada partikel yang melewati daerah ini akan dimuati oleh ion-ion positif, dan menyebabkan pula partikel ini menuju ke daerah elektroda kolektor. Elektron bebas akan menuju ke daerah elektroda *discharging* dan dibawa kedalam menjadinya sebagai arus. Oleh karena itu pada ESP jenis *two stage* lebih sering digunakan korona positif, yang mana partikel lebih sedikit menempel di elektroda *discharging* dibandingkan pemakaian korona negatif. Namun pada ESP *single stage* digunakan korona negatif karena elektroda korona berfungsi juga sebagai elektroda kolektor. (Crawford, 1976)

2.4 Pemuatan Partikel

Partikel yang lewat pada suatu ESP termuati melalui 2 (dua) mekanisme *Field charging* dan *diffusion charging*. Gas-gas ion dan juga elektron pada kasus korona negatif bergerak secara normal melewati aliran partikel gas yang lewat dibawah pengaruh medan listrik. Partikel-partikel tersebut termuati secara transfer muatan maupun tumbukan langsung. Mekanisme ini disebut sebagai mekanisme *field charging*. Mekanisme kedua adalah dengan bertambahnya ion-ion yang tertempel ada partikel gas yang lewat akibat pergerakan thermalnya, hal ini disebut sebagai mekanisme *diffusion charging*. Meskipun mekanisme ini berjalan secara bersamaan, kombinasi kedua hal ini secara teori masih belum dikembangkan. Kedua mekanisme ini biasanya dirumuskan secara terpisah dikarenakan errornya yang tidak terlalu besar. *Field charging* sangat penting untuk menangkap partikel dengan ukuran lebih besar dari 1 μm , sedangkan *diffusion* lebih penting untuk partikel kurang dari 0.2 μm . *Field charging* memiliki arah sesuai dengan medan listrik pada ESP tersebut, sehingga lebarnya permukaan dan juga besarnya potensial listrik yang diberikan menjadi faktor utama dalam mekanisme ini. *Diffusion charging* sangat tergantung dengan jumlah ion-ion yang dihasilkan, mobilitas dari ion tersebut, dan juga karena pergerakan thermal maka temperatur sangat berpengaruh pada mekanisme ini. (Strauss, 1975)

Pada *field charging* pemuatan permukaan maksimum yang dapat terpenuhi dengan menganggap partikel berbentuk bola dan medan listrik yang terjadi tidak terganggu sama sekali. Pemuatan permukaan maksimum pada mekanisme *field charging* dapat dinyatakan sebagai berikut

$$q_{maximum} = 4\pi K_0 P a^2 E_0 \quad (1)$$

Sedangkan pada *diffusion charging* dapat dianalisa berdasarkan teori kinetik gas berdasarkan densitas gas pada suatu medan potensial. Berdasarkan jumlah ion yang menumbuk

partikel perdetiknya. sehingga didapatkan permuatan permukaan partikelnya sebagai berikut.(Wang dkk, 2004)

$$q_d = \frac{4\pi K_0 a k T}{q_i} \ln \left[\frac{a N_0 q_i^2 v_i t}{4 K_0 k T} + 1 \right] \quad (2)$$

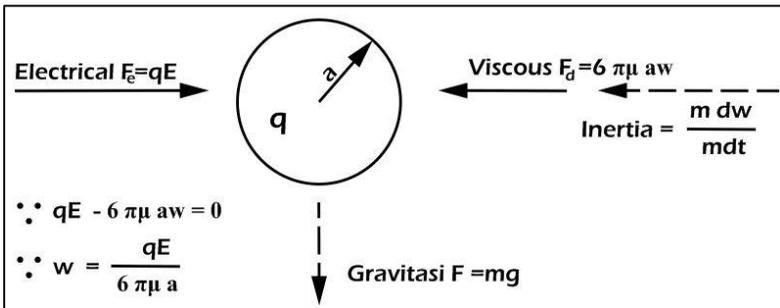
2.5 Partikel *Drift*

Setelah partikel-partikel pada ESP yang lewat termuati. Partikel-partikel tersebut kebanyakan akan bergerak menuju kolektor dibandingkan elektroda *discharging* yang memiliki polaritas yang sama dengan polaritas partikel bermuatan. Sebagian lagi terutama partikel yang sangat dekat dengan elektroda *discharging* dapat menuju ke elektroda *discharging* karena pada daerah korona partikel yang lewat termuati oleh polaritas yang berlainan dengan elektroda *discharging*. Secara garis besar hal ini sangatlah kompleks. Medan listrik akan semakin melemah ketika menjauh korona dan partikel akan semakin termuati seiring partikel tersebut melewati ESP. Pada elektroda kolektor konsentrasi partikel bermuatan juga semakin tinggi. Dan interferensi antar partikel bermuatan yang sama polaritasnya, seiring efek parsial pada layer-layer partikel yang dimuati pada elektroda kolektor. Kalkulasi kecepatan perpindahan atau kecepatan *drift* dapat digunakan untuk memprediksi ukuran ESP dan efisiensi pada desain sederhana dengan mengasumsikan beberapa hal.

1. Partikel dianggap termuati secara penuh tanpa terkecuali pada daerah medan listrik ESP.
2. Aliran gas yang melewati ESP dianggap turbulen.
3. Partikel bergerak menuju elektroda melawan hambatan fluida pada aliran *viscous* dan hukum Stokes dapat diterapkan.
4. Dipertimbangkan tidak ada efek penolakan antara partikel dengan muatan yang sama.
5. Tidak terjadi efek halangan dengan partikel terkonsentrasi dekat dinding.

6. Mengabaikan pergerakan ion-ion yang disebut juga *electric wind*.
7. Kecepatan aliran dianggap tidak memengaruhi kecepatan perpindahan ion-ion.
8. Partikel bergerak dengan kecepatan konstan. (Strauss, 1975)

Gaya pada partikel yang bergerak menuju kolektor adalah resultan dari gaya-gaya yang bekerja pada sistem *presipitator* ini. Partikel bergerak menuju elektroda kolektor akibat pengaruh dari gaya coulomb. Namun terdapat gaya yang menahan yaitu gaya akibat viskositas dan inersia. Sehingga mengakibatkan partikel pada medan presipitasi ini mencapai suatu kecepatan tertentu. Kecepatan ini disebut sebagai partikel *drift* maupun kecepatan partikel berpindah.



Gambar 2.6 Gaya-gaya yang bekerja pada saat partikel drift

Berdasarkan hukum newton kedua gaya total yang bekerja pada suatu benda bermassa sebanding dengan percepatan benda tersebut. Pada sistem ini gaya gravitasi yang mempengaruhi partikel sangatlah tidak signifikan sehingga dapat diabaikan. Oleh karena itu gaya total yang bekerja dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$m \frac{dw}{dt} = F_e - F_d \quad (3)$$

Dimana m adalah massa, w adalah partikel drift, F_e dan F_d adalah gaya coulomb dan gaya gesek viskositas. Dengan menganggap

aliran yang terjadi adalah laminar dan partikel dianggap berbentuk bola hukum stokes menyatakan bahwa $F_d = 6 \pi \mu a w$, dimana μ adalah viskositas gas. Sehingga

$$m \frac{dw}{dt} = qE_p - 6\pi\mu a w \quad (4)$$

Didapat hasil integral untuk partikel *drift* adalah

$$w = \left(\frac{qE_p}{6\pi\mu a} \right) \left[1 - \exp\left(\frac{-6\pi\mu a t}{m} \right) \right] \quad (5)$$

Karena kondisi exponential dapat diabaikan dengan syarat $t > 0.01$ detik. Sehingga partikel *drift* dapat dirumuskan kembali menjadi

$$w = \left(\frac{qE_p}{6\pi\mu a} \right) \quad (6)$$

Pada mekanisme *field charging*, hasil partikel bermuatan pada persamaan 1 dapat disubstitusi dengan persamaan 6 menjadi

$$w = \left(\frac{2K_0 P a E_c E_p}{3\mu} \right) \quad (7)$$

Dimana E adalah kuat medan listrik untuk *one-stage* precipitator. Kuat medan E_c dan E_p adalah sama, karena pada *one-stage* proses pemberian muatan dan pengumpulan partikel berada pada wilayah yang sama. Akibat medan listrik yang dihasilkan oleh elektroda *discharge* E_p sama dengan elektroda kolektor E_c .

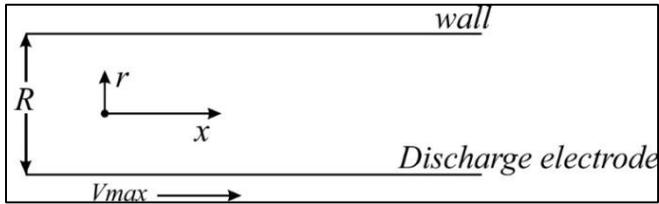
Kecepatan partikel *drift* pada perumusan diatas sangat jarang aliran laminar terpenuhi sehingga perlu pendekatan aliran nonlaminar. Jika ukuran partikel mendekati jarak bebas rata-rata molekul gas ($\lambda = 6.8 \times 10^{-8}$ m pada tekanan atmosfer pada suhu 25°C) maka harus dikalikan dengan factor koreksi chunningham.

$$C = 1 + \left(\frac{\lambda}{a} \right) \left[1.26 + 0.40 \exp\left(-1.10 \frac{\lambda}{a} \right) \right] \quad (8)$$

Hal ini berarti terjadi penambahan kecepatan partikel *drift*. Untuk partikel berjari-jari $0.5\mu\text{m}$ pada tekanan atmosfer dan pada suhu 25°C , faktor koreksi chunningham adalah 1.17, terjadi penambahan kecepatan sebesar 17%.(Wang dkk., 2004)

2.6 Efisiensi ESP

ESP memiliki efisiensi tinggi dibandingkan penyaring jenis lain, efisiensinya lebih dari 90%, dan juga perawatannya mudah. Perhitungan dimensi ESP yang baik perlu mempertimbangkan beberapa hal agar didapatkan efisiensi yang tinggi pula. Perhitungan awal ditinjau berdasarkan kecepatan *driftnya*, ω , dimana pada perhitungan dianggap konstan, diameter elektroda jika berbentuk silinder/kabel, luasan dari elektroda kolektor, potensial yang dikenai pada elektroda, dan jarak relatif antar elektroda.



Gambar 2.7 Partikel bermuatan yang melewati suatu ESP jenis wire-cylinder(tubular)

Dimisalkan terdapat suatu jenis ESP berbentuk tubular seperti pada gambar 2.6. elektroda *discharge* adalah kawat dan dinding atau elektroda kolektor adalah silinder. Jika diambil secara memotong dan analisa pada salah satu bagian saja. Aliran laminar terjadi pada ESP ini, namun memiliki pola *parabolic* sehingga kecepatan reratanya sama dengan setengah dari kecepatan maksimum. Maka kecepatan aliran dapat dirumuskan terhadap waktu dan jari-jari

$$\frac{dx}{dy} = v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

$$\frac{dx}{dy} = 2v_{av} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (9)$$

Kecepatan *drift* pada jari-jari r adalah

$$\omega = \frac{dr}{dt} \quad (10)$$

Sehingga didapatkan persamaan lintasan dari partikel tersebut

$$\frac{dx}{dr} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dt}{dr} = \frac{2v_{av}}{\omega} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (11)$$

Jika dianggap kecepatan *drift* konstan ketika partikel menuju ke kolektor. Maka dx/dr dapat diintegrasikan agar didapatkan jarak lintasan maksimal partikel

$$x = \frac{2Rv_{av}}{\omega} \left\{ \frac{r}{R} - \frac{1}{3} \left(\frac{r}{R}\right)^3 \right\} + Constanta \quad (12)$$

Nilai dari *constant*a adalah 0 ketika $r=0$ dan $x=0$ untuk partikel pada daerah tengah silinder. Ketika artikel bergerak maka perlu perpindahan sejauh R saat partikel tersebut tertangkap. Sehingga panang dari ESP itu haruslah lebih panjang dari

$$x = \frac{4Rv_{av}}{3\omega} \quad (13)$$

Dan jika aliran pada ESP berbentuk silinder tersebut adalah turbulen maka jarak lintasan maksimal partikel dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$x = Rv_{av}/\omega \quad (14)$$

Dengan menggunakan cara yang sama panjang maksimum partikel bergerak pada ESP jenis elektroda plat sejajar dapat dirumuskan, sehingga didapatkan persamaan pada saat aliran laminar dan tubular sama, dimana L adalah panjang dari plat elektroda.

$$x = \frac{Lv_{av}}{\omega} \quad (15)$$

Dengan menggunakan persamaan Deutsch dapat dicari besar efisiensinya dengan menggunakan persamaan jarak lintasan maksimal partikel tertangkap. Serta mempertimbangkan tidak ada partikel yang tertangkap terlebih dahulu pada kolektor.

Didapatkan

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2\omega x}{RV_{av}}\right) \quad ; \text{ jenis tubular} \quad (16)$$

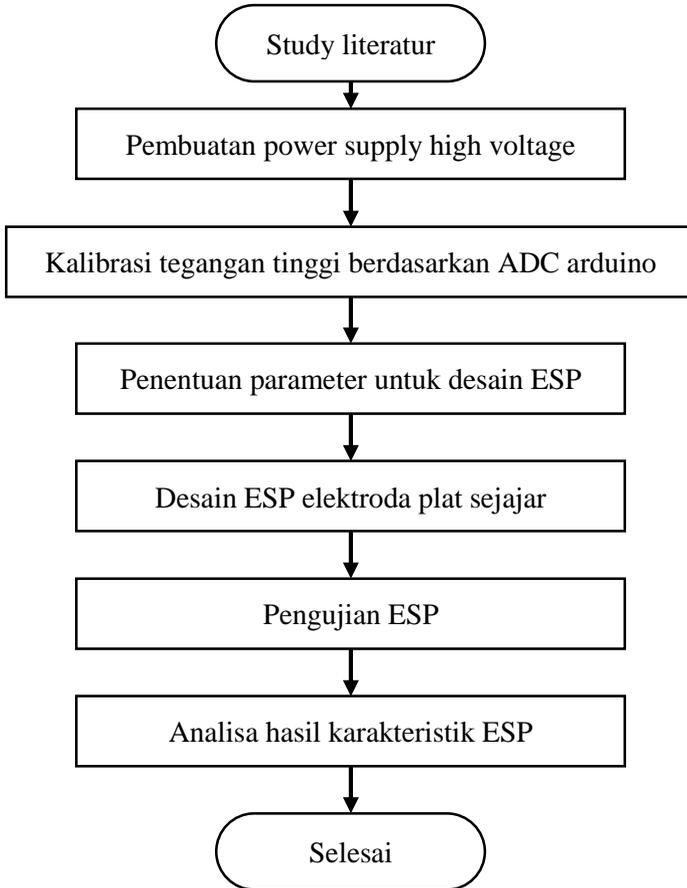
$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-\omega x}{LV_{av}}\right) \quad ; \text{ jenis plat sejajar} \quad (17)$$

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-\omega A}{Q}\right) \quad : \text{ jenis lain} \quad (18)$$

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

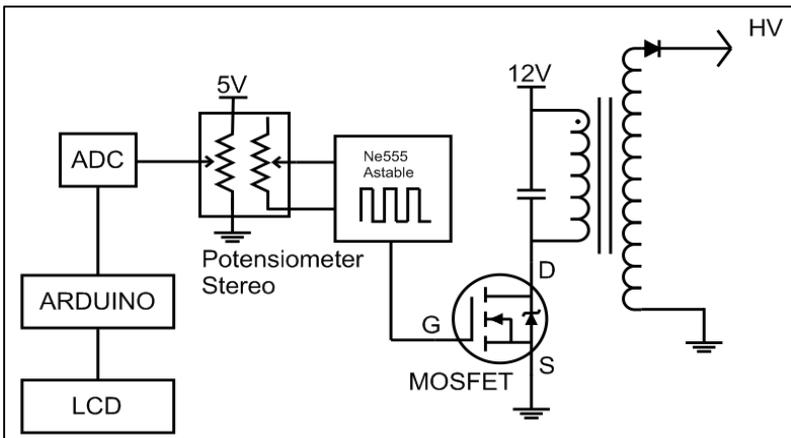
Tahapan penelitian yang telah dilaksanakan adalah



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Pembuatan *Power Supply High Voltage*

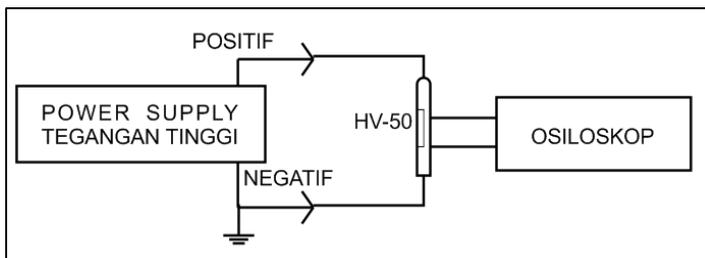
Pada pembuatan *power supply high voltage* digunakan *transformer step up* yang cukup besar perbandingannya, hingga diperoleh *step up* yang sesuai dengan keperluan berupa *transformer flyback* yang mampu bekerja hingga tegangan 70KV. Oleh karena itu perlu adanya pengontrol *flyback* yang selanjutnya dapat mengontrol tegangan yang sesuai dengan kebutuhan pada range 10KV hingga 70KV. *Power supply* ini menggunakan driver *flyback* berbasis pulse timer NE555 astable yang nantinya mengatur mosfet untuk mengatur lebar pulsa yang dikirim pada *transformer step up*. Pengaturan lebar pulsa diatur menggunakan potensiometer. Agar hasil dari dari fungsi tegangan keluaran pada *flyback* dapat diketahui dengan mudah. Maka dari itu digunakan arduino jenis pro mini yang dapat tersambung dengan tampilan LCD. Fungsi dari arduino hanya bertugas dalam membaca ADC dan menampilkan data ADC yang telah diolah ke tampilan LCD dan perlu adanya kalibrasi terhadap tegangan keluaran berdasarkan ADC tersebut.



Gambar 3.2 Skema rangkaian power supply high voltage

3.3 Kalibrasi *Power Supply High Voltage*

Pada proses kalibrasi ini perlu digunakan alat dan metode khusus dalam pengukuran tegangan tinggi ini. Digunakan probe HV-50 buatan sanwa yang mana menggunakan metode pembagi tegangan dengan perbandingan 1:1000. Pembacaannya dapat menggunakan multimeter digital maupun analog biasa. Karena sifatnya yang sangat berbahaya perlu kehati-hatian dalam pengambilan data. Salah satu syarat yang perlu terpenuhi adalah dekat dengan *ground* dan tidak terlalu dekat dengan kabel yang memiliki potensial tegangan tinggi dan selalu kosongkan muatan setelah dipakai pada tiap keluaran tegangan tinggi dengan cara menghubungkan kedua keluaran positif dan negatif menjadi satu. Berikut skema kalibrasi power supply high voltage.



Gambar 3.3 Skema rangkaian kalibrasi tegangan tinggi

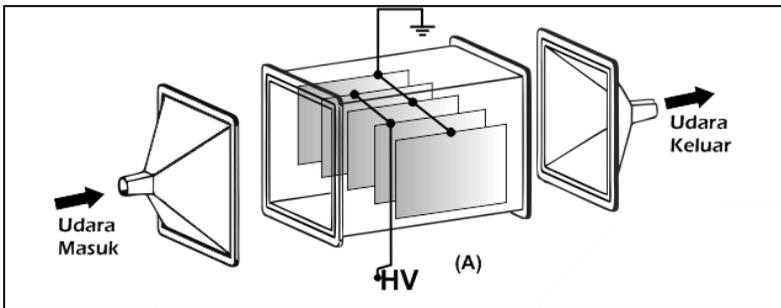
3.4 Perancangan *Electrostatic Precipitator*

Bentuk geometri yang digunakan pada perancangan *electrostatic precipitator* digunakan ada 2 bentuk dengan jenis plate sejajar dan *wire to plate*. Pada perancangan ini digunakan bentuk wadah yang dapat ditempati kedua macam konfigurasi elektroda, sehingga kedua jenis tersebut dapat digunakan. Namun pada wadah ini tidak dapat digunakan pada jenis tubular karena bentuk wadah seperti balok. Bagian penempatan konfigurasi elektroda pada ESP memiliki ukuran dimensi bagian dalam yaitu 30cm x 17cm x 17cm. Hal penting yang perlu diperhatikan dalam pemasangan ESP adalah antar elektroda tidak boleh besentuhan karena akan terjadi hubungan arus pendek pada *power supply*

tegangan tinggi. Selain itu kedua penutup haruslah rapat sehingga tidak ada gas yang keluar dari celah-celah tersebut. Hasil udara keluar haruslah terlebih dahulu melewati *water trap* karena masih ada partikel yang lolos dan berbahaya jika masuk ke paru-paru. Berikut bentuk geometri tiap bentuk beserta ukurannya.

3.4.1 Plat Sejajar

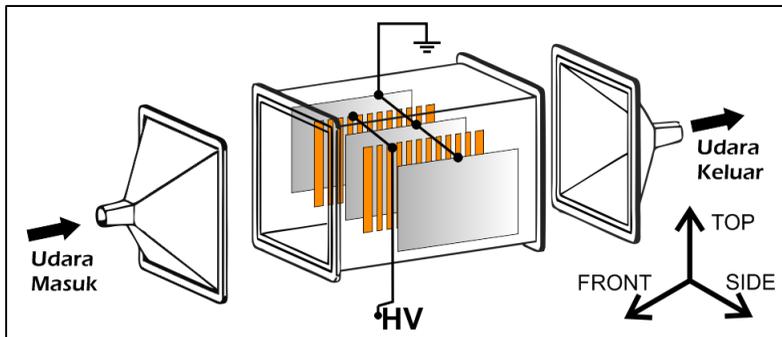
Pada jenis ini digunakan konfigurasi elektroda plat sejajar antara elektroda discharge dan elektroda kolektor. Berikut desain bentuk geometri dari kedua ESP. Terdapat 5 plat pada bagian dalam ESP, 3 plat sebagai elektroda kolektor dan 2 plat sebagai elektroda *discharging*. Jarak antar plat sejauh 5cm dengan panjang plat 25cm dan lebar 15cm.



Gambar 3.4 Konfigurasi bentuk elektroda plat sejajar (a) sejajar dengan arah aliran (b) tegak lurus terhadap arah aliran

3.4.2 Wire To Plate

Pada jenis ini digunakan konfigurasi *elektroda wire to plate*. Dimana terdapat 3 plat sebagai elektroda kolektor dan *wire* sebagai elektroda *discharge*. Jarak antar elektroda sejauh 5cm dengan panjang plat 25cm dan lebar 15cm. Wire sebagai pengganti plat *discharge* pada model sebelumnya. Berikut bentuk ESP berdasarkan konfigurasi tersebut.

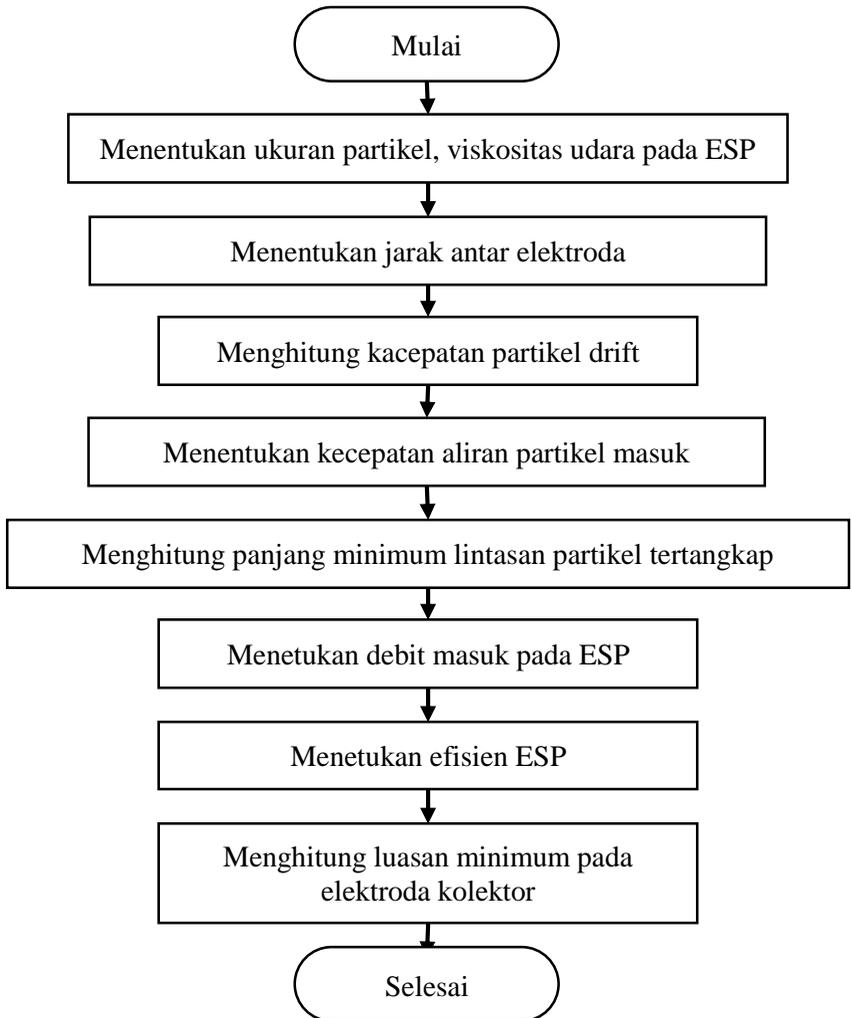


Gambar 3.5 Konfigurasi elektroda *wire to plate*

3.4.3 Perhitungan Konfigurasi Elektroda

Konfigurasi elektroda yang digunakan menggunakan konfigurasi plat sejajar dan *wire to plate*. Dimana kedua jenis konfigurasi ini menggunakan tinjauan yang sama sehingga dalam merancang bangun kedua bentuk ESP pada penelitian ini dapat digunakan satu perhitungan desain saja, pada panjang ESP diperhitungkan berdasar kecepatan partikel *drift* pada persamaan 7 dan luasan ESP berdasarkan perhitungan efisiensi pada persamaan 18. Pada konfigurasi plate sejajar panjang dan luasan yang dicari adalah plat elektroda *discharge* dan plat elektroda kolektor. Sedangkan pada konfigurasi *wire to plate* panjang dan luasan bidang yang digunakan pada kawat tembaga sebanding dengan elektroda kolektornya.. Berikut diagram alir desain ESP.

Parameter yang digunakan harus disesuaikan dengan kebutuhan dari penangkapan hasil partikel *spray pyrolysis*. debit udara masuk *spray pyrolysis* umumnya sangat rendah hanya 2liter/ menit. Sehingga kecepatan partikel masuk dapat dibuat slambat mungkin. Kuat medan listrik pun juga dapat diperbesar hingga lebih dari 600KV/m sehingga ukurannya dapat lebih diperkecil dan dapat disesuaikan rancang bangun yang sesuai. Luasan juga mempengaruhi efisisensi sehingga kesemua itu perlu penyesuaian dengan parameter-parameter lain.



Gambar 3.6 Diagram alir desain *electrostatic recipitator*

Dalam rancang bangun ESP terlebih dahulu ditentukan parameter-parameter yang digunakan. Adapun parameter yang digunakan sebagai berikut.

Permitivitas pada vakum = 8.85×10^{-18} F/m

Tekanan (P) = 1 atm

Jari-jari partikel (a) = $0.5 \mu\text{m}$

Voltage (V) = 30KV

Jarak antar plat = 5 cm

Viskositas udara 100°C = 2.1×10^{-5} N.S/m²

Kuat medan listrik (E) = $V/d = 30\text{KV}/5 \times 10^{-2}\text{m} = 600\text{KV/m}$

debit udara masuk = 6L/menit = 10.2×10^{-5} m³/detik

Lebar pipa masuk = 1inch = $2.54 \times 10^{-2}\text{m}$

Luasan ESP = 17cm x 17cm = $2.89 \times 10^{-2}\text{m}^2$

Luas pipa masuk = $5.06 \times 10^{-4}\text{m}^2$

Kecepatan aliran udara = $Q/A = 10.2 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{detik} \div 2.89 \times 10^{-2}\text{m}^2 = 3.54 \times 10^{-3}\text{m/s}$

Pada single stage electrostatic precipitator besar E_c dan E_p adalah sama, dengan menggunakan persamaan 7 didapatkan besar kecepatan partikel drift sebesar

$$w = \left(\frac{2 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m} \times 0.5 \times 10^{-6} \text{m} \times (600000 \text{V})^2}{3 \times 2.1 \times 10^{-5} \text{N.S/m}^2} \right)$$

$$w = 50.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$$

Karena aliran tersebut tidak laminar maka dikalikan dengan faktor koreksi chunningham pada persamaan 8. Pada tinjauan ini digunakan factor chunimgham sebesar 1.17 dengan peningkatan kecepatan sebesar 17%. Sehingga didapatkan kecepatan *drift*.

$$w = 50.5 \times 10^{-3} \text{m/s} \times 1.17$$

$$w = 59.1 \times 10^{-3} \text{m/s}$$

Dalam mencari panjang lintasan minimum digunakan persamaan 15 untuk konfigurasi elektroda plat sejajar.

$$x = \frac{Lv_{av}}{\omega}$$

$$x = \frac{5 \times 10^{-2} m \times 3.54 \times 10^{-3} m/s}{59.1 \times 10^{-3} m/s}$$

$$x = 0.299 \times 10^{-2} m$$

$$x = 0.3 \text{ cm}$$

Untuk mencari luasan plat elektroda minimum digunakan persamaan 18 dengan estimasi efisiensi tertangkapnya partikel 98%

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-\omega A}{Q}\right)$$

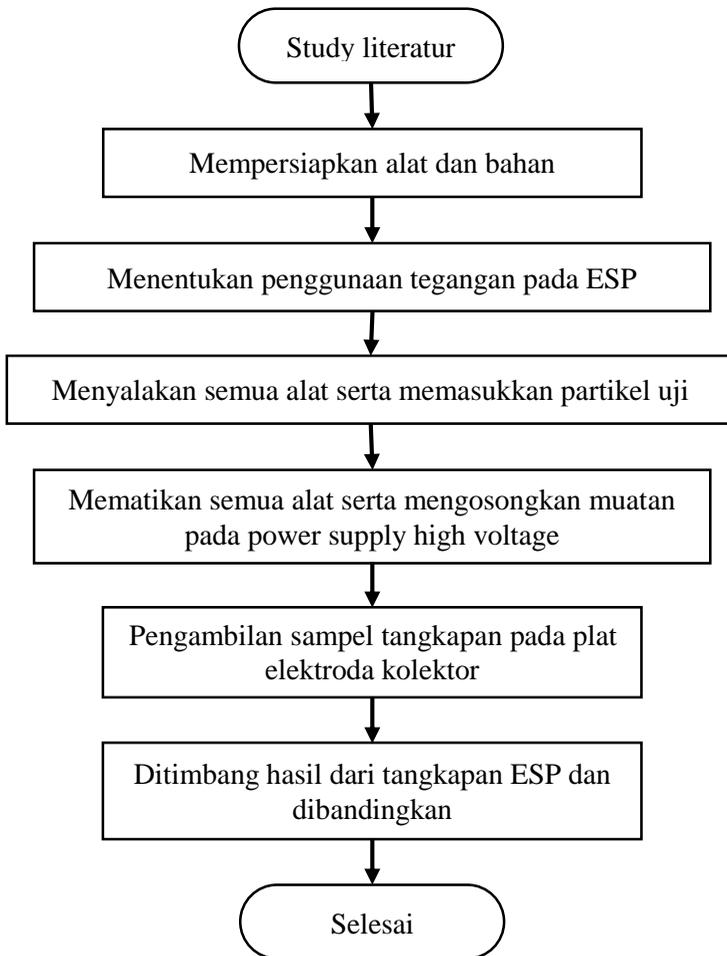
$$99\% = 1 - \exp\left(\frac{-59.1 \times 10^{-3} m/s A}{10.2 \times 10^{-5} m^3/detik}\right)$$

$$A = 0.79 \times 10^{-2} m^2$$

3.5 Pengujian Efisiensi ESP

Efisiensi pada sistem ESP dapat diketahui dengan perbandingan partikel yang masuk dan partikel yang keluar. Pada *spray pyrolysis* tidak dapat diketahui secara langsung jumlah partikel yang masuk maupun yang keluar. Sehingga digunakan perbandingan berat partikel yang masuk dan yang keluar. *Spray pyrolysis* menggunakan prekursor yang berbentuk liquid dimana campuran material yang digunakan sangat beragam, sehingga perlu penentuan berat partikel yang masuk berdasarkan volume prekursor.

Pada pengujian efisiensi ini digunakan uji validasi tanpa memperhitungkan morfologi. Sehingga digunakan partikel yang memenuhi karakteristik partikel yang dihasilkan *spray pyrolysis* dimana diameter partikel berukuran antara $0.5\mu m$ hingga $5\mu m$. Berikut diagram alir pengujian efisiensi.



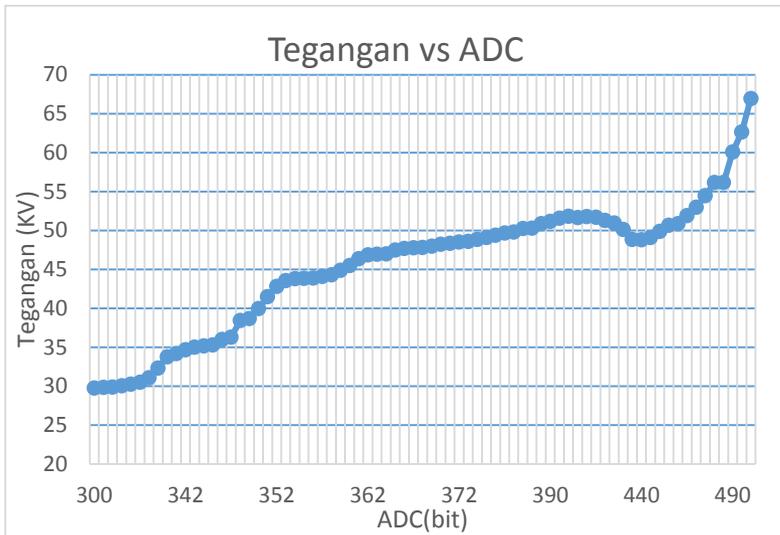
Gambar 3.7 Diagram alir pengujian efisiensi

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi *Power Supply High Voltage*

Proses karakterisasi *power supply* dilakukan dengan pengambilan data untuk tegangan efektif terhadap ADC pada Arduino. Selanjutnya dapat digunakan untuk mengatur tegangan keluaran tanpa lagi perlu melakukan uji tegangan secara manual menggunakan probe HV-50. Adapun data yang diperoleh dari proses ini adalah sebagai berikut.

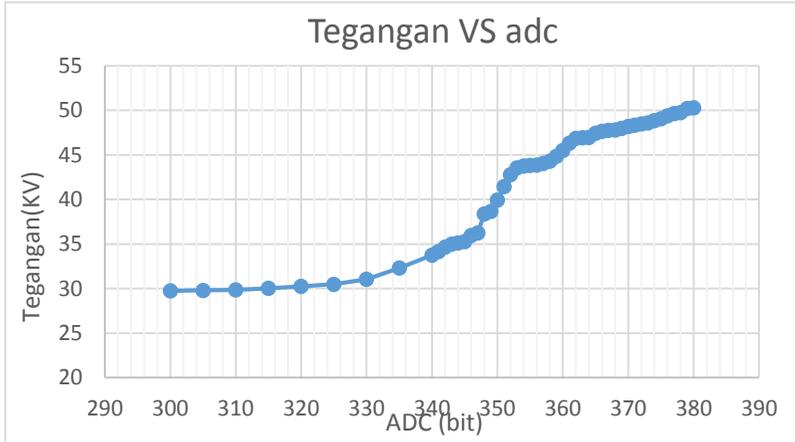


Gambar 4.1 Hasil keluaran tegangan *power supply* terhadap ADC masukan arduino pada rentang 300bit hingga 500 bit

4.2 Penentuan Rentang *Power Supply High Voltage*

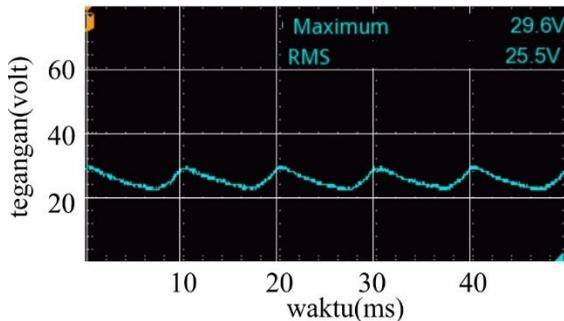
Rentang pengukuran yang diuji untuk data diatas ada pada rentang bit 300 hingga 500. potensiometer stereo sebagai kontrol tegangan. Dimana pada satu sisi terhubung dengan timer pulse

NE555 Astable dan pada satu sisi yang lain dihubungkan dengan ADC masukan arduino.

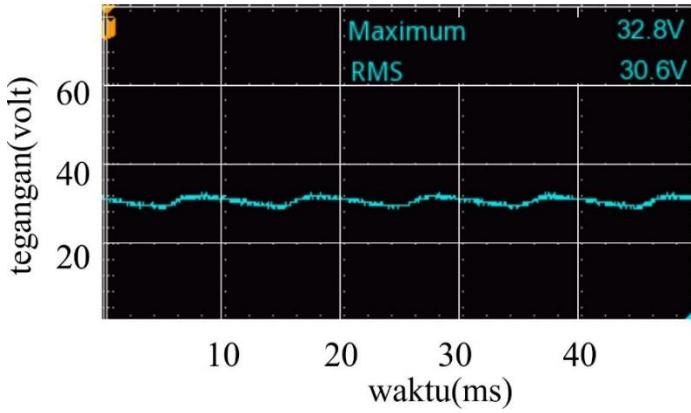


Gambar 4.2 Hasil keluaran tegangan *power supply* terhadap ADC masukan arduino pada rentang 300bit hingga 380 bit

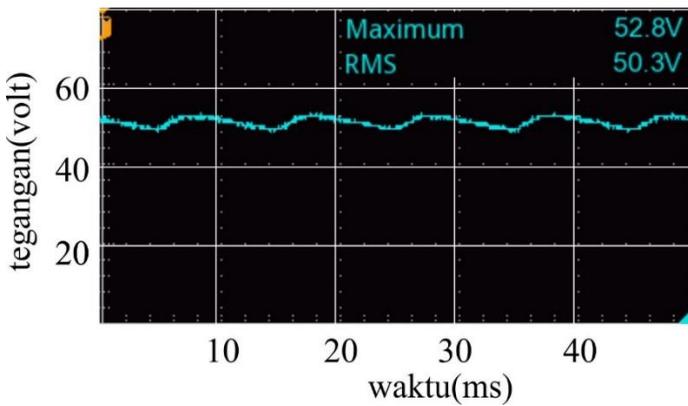
Penentuan rentang antara bit 300 hingga bit 380 selain ditentukan kenaikan dan penurunan grafik data tegangan keluaran terhadap ADC. Ditentukan pula berdasarkan sinyal tegangan yang terbaca oleh osiloskop. Hasil keluaran sinyal haruslah DC dan memiliki noise yang kecil.



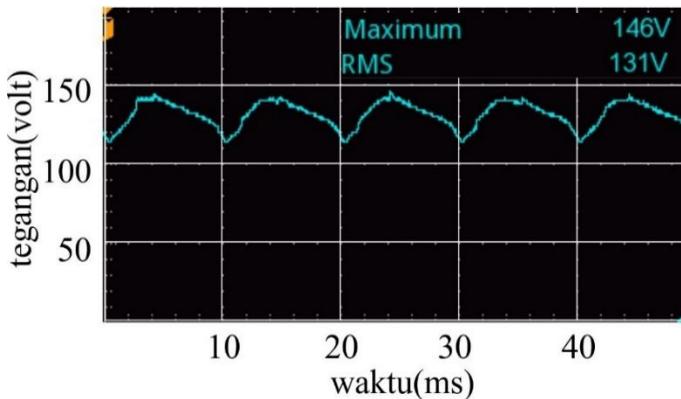
Gambar 4.3. Sinyal tegangan 25KV pada ADC 0 bit



Gambar 4.4 Sinyal tegangan 30KV pada ADC 320 bit



Gambar 4.5 Sinyal tegangan 50KV pada ADC 380 bit



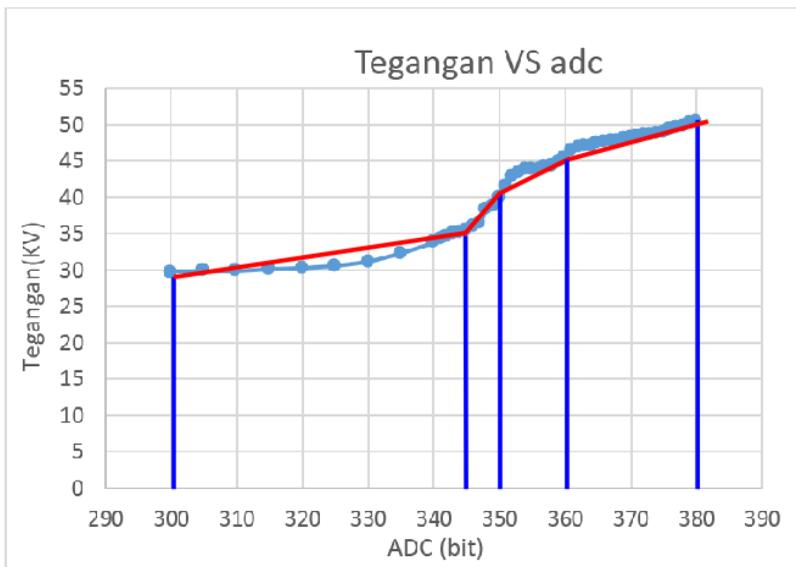
Gambar 4.6 Sinyal tegangan 130KV pada ADC 1023 bit

Batasan dipilih dari rentang 30KV hingga 50KV, karena pada sinyal keluaran yang terbaca dari osiloskop memiliki hasil keluaran yang penyearahan paling bagus dibanding hasil penyearahan pada tegangan diluar rentang tersebut. Pada gambar 4.3 terlihat bentuk gelombang yang lebih runcing dibanding sinyal pada tegangan 30KV dan 50KV. Terdapat perbedaan 4KV antara maksimum dan tegangan efektifnya. Sedangkan pada gambar 4.6 terlihat noise pada tiap gelombangnya, terdapat perbedaan 15KV antara tegangan maksimum dan tegangan efektifnya. Oleh karena itu dipilihlah rentang tegangan 30KV hingga 50KV pada ADC bit 300 hingga 380. Selain itu pada ESP pada umumnya digunakan tegangan antara rentang 30KV hingga 50KV Pada gambar 4.4 dan 4.5 terlihat perbedaan antara tegangan maksimum dengan tegangan efektif hanya sebesar 2KV.

Pembacaan tegangan pada osiloskop terlihat hasil sinyal tegangan yang beresilasi. Pada *transformator step up* hasil keluaran seharusnya berupa arus bolak balik. Namun karena terdapat *diode internal* pada *transformator flyback*, hasil keluaran tersebut berupa arus DC. Arus DC yang searah ini menyebabkan potensial pada kedua potensial selalu sama yaitu positif dan negatif. Tidak adanya regulator menyebabkan masih adanya osilasi. Oleh karena itu pemilihan rentang dipilih yang terkecil.

4.3 Pemetaan Linearitas Tegangan Pada Arduino

Pada rentang bit 300 hingga 380 maka perlu dilakukan data pada tiap bitnya. Didapatkan grafik pada gambar 4.2. Hasil dari grafik tidak menunjukkan linearitas yang bagus sehingga perlu adanya pembenahan pada sistem pengukuran pada ADC. Diperlukan penyesuaian rentang tegangan yang diinginkan. Sistem ESP pada penelitian ini digunakan 30 KV, 40KV dan 50 KV. Penyesuaian yang digunakan pada *power supply* ini digunakan linearitas tiap antara rentang tertentu menggunakan fungsi *mapping* pada arduino . fungsi *mapping* digunakan pada tiap kenaikan yang linear dari rentang 30KV hingga 50KV. Hal ini dikarenakan terjadi penurunan tegangan pada bit 400 dan naik kembali pada bit 440.



Gambar 4.7 *mapping* linearitas pada tiap rentang tertentu

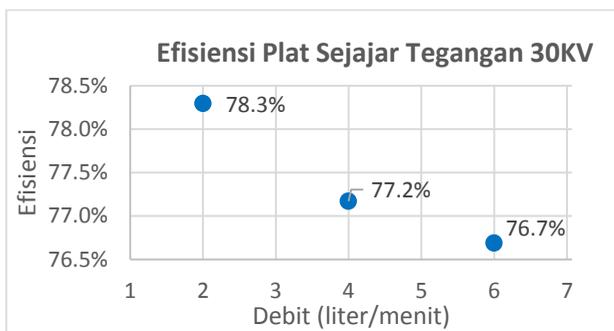
Berikut code arduino yang digunakan dalam fungsi *mapping*.

```
int volt;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
void loop(){
  lcd.clear();
  int analogValue = analogRead(A1);
if (analogValue>=300 && analogValue<=343){
  volt = map(analogValue, 320, 343, 30, 35);
}
if (analogValue>=343 && analogValue<=350){
  volt = map(analogValue, 343, 350, 35, 40);
}
if (analogValue>=350 && analogValue<=360){
  volt = map(analogValue, 350, 359, 40, 45);
}
if (analogValue>=360 && analogValue<=380){
  volt = map(analogValue, 360, 380, 45, 50);
}
  Serial.print("v= ");
  Serial.println(volt);
  lcd.print(volt);
delay(1000);}
```

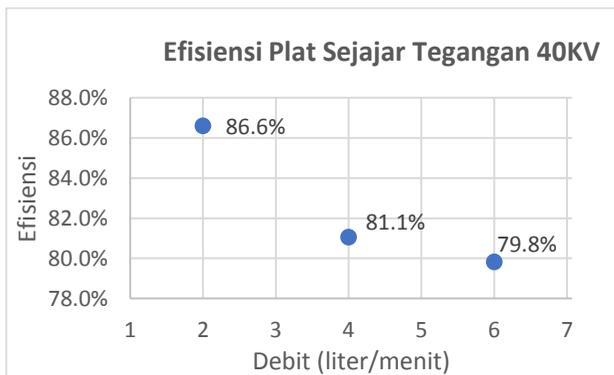
4.4 Hasil Pengukuran Efisiensi Pada ESP

4.4.1 Efisiensi ESP Plat Sejajar

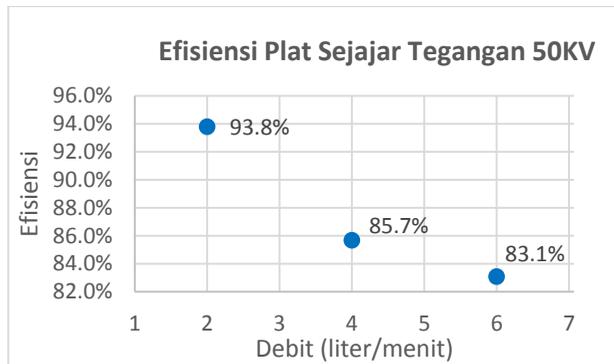
Pada konfigurasi elektroda ini didapatkan pengaruh efisiensi pada tiap variasi tegangan dan debit udara masuk. Data hasil pengukuran ditampilkan pada lampiran 2. Berikut grafik hubungan antara efisiensi pada tegangan tetap dengan variasi debit masuk.



Gambar 4.8 Efisiensi plat sejajar tegangan 30KV variasi debit



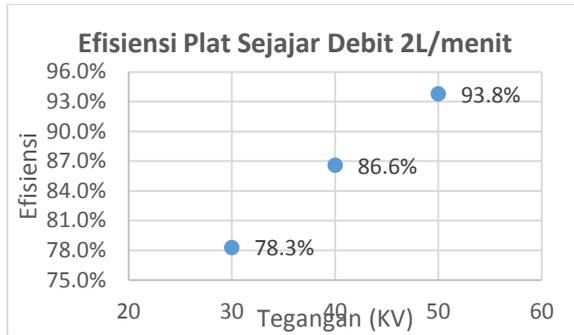
Gambar 4.9 Efisiensi plat sejajar tegangan 40KV variasi debit



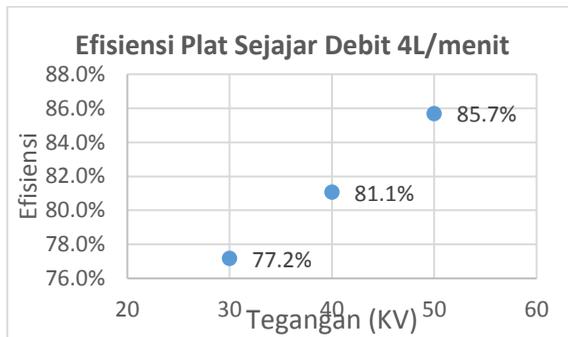
Gambar 4.10 Efisiensi plat sejajar tegangan 50KV variasi debit

Debit yang digunakan pada penelitian ini adalah 2L/menit, 4L/menit, dan 6L/menit. Pemilihan debit ini disesuaikan dengan kebutuhan dalam penangkapan hasil partikel pada spray pyrolysis. Rancang bangun ESP yang digunakan pun disesuaikan dengan debit. Pada gambar 4.8 hingga gambar 4.10 menunjukkan adanya penurunan efisiensi pada saat besar debit masuk dinaikkan. Efisiensi tertinggi dari ketiga grafik tersebut diperoleh pada saat debit 2L/menit. Dan ketiga-tiganya menunjukkan efisiensi terendah pada saat debit 6L/menit. Rancang bangun sangat berpengaruh pada debit. Pada rancang bangun ini pipa udara masuk berdiameter 1 inch dan luas penampang pada ESP adalah 17cmx17cm. Sehingga kecepatan masuk dipengaruhi oleh luas penampang dari pipa tersebut. Ketika aliran udara masuk kedalam sistem ESP terjadi penurunan kecepatan akibat meluasnya luas penampang ESP. Kecepatan inilah yang sebenarnya mempengaruhi besar efisiensi dari ESP.

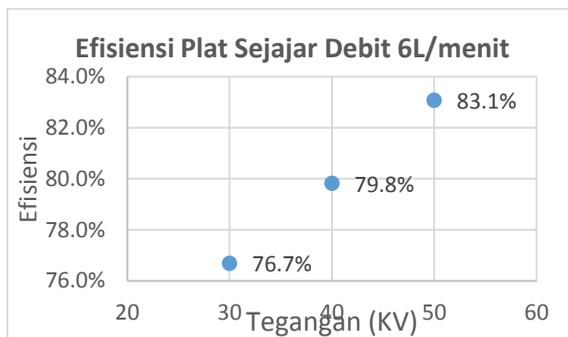
Dengan data yang sama pada elektroda plat sejajar dibuatlah grafik hubungan antara efisiensi pada debit masuk tetap dengan variasi tegangan sebagaimana berikut .



Gambar 4.11 Efisiensi plat sejajar debit 2L/menit variasi tegangan



Gambar 4.12 Efisiensi plat sejajar debit 4L/menit variasi tegangan

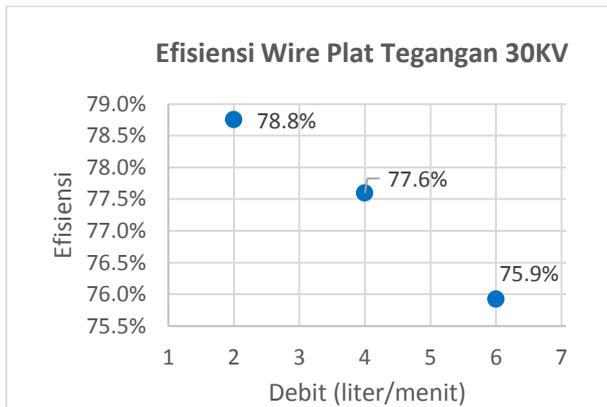


Gambar 4.13 Efisiensi plat sejajar debit 6L/menit variasi tegangan

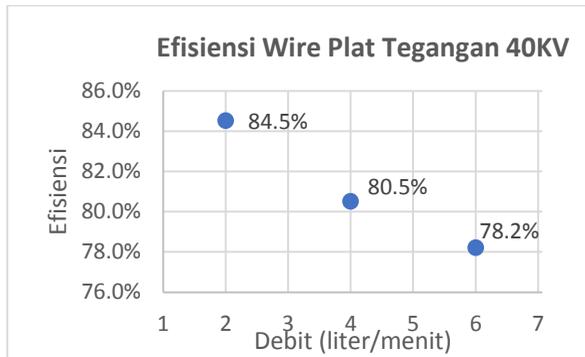
Grafik hasil dari hubungan efisiensi dengan variasi tegangan pada debit masuk tetap menunjukkan kenaikan efisiensi ketika tegangan dinaikkan. Hal ini disebabkan oleh kenaikan tegangan mengakibatkan kenaikan kuat medan listrik. Pada ESP faktor yang paling mempengaruhi pada proses penangkapan partikel adalah besar kecepatan partikel *drift*. Besar kecepatan ini sangat tergantung dari besar medan listrik dan juga jumlah muatan pada permukaan partikel. Tegangan tinggi tidak hanya sebagai pembentuk medan listrik yang kuat saja. Namun juga sebagai penghasil unipolar ion pada sekitar elektroda. Unipolar ion inilah yang bertanggung jawab dalam memuati partikel dengan mekanisme field charging dan diffusion charging. Dari hasil grafik ketiga-tiganya menunjukkan efisiensi tertinggi berada pada tegangan 50KV dan ketiga-tiganya pula menunjukkan efisiensi terendah pada saat tegangan 30KV.

4.4.2 Efisiensi ESP Wire To Plate

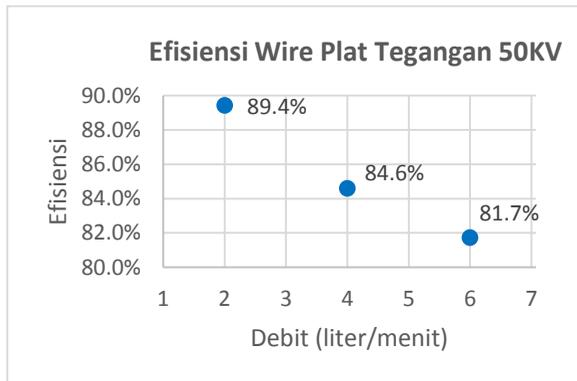
Pada konfigurasi elektroda ini didapatkan pengaruh efisiensi pada tiap variasi tegangan dan debit udara masuk. Data hasil pengukuran ditampilkan pada lampiran 3. Berikut grafik hubungan antara efisiensi pada tegangan tetap dengan variasi debit masuk.



Gambar 4.14 Efisiensi Wire To Plate tegangan 30KV variasi debit



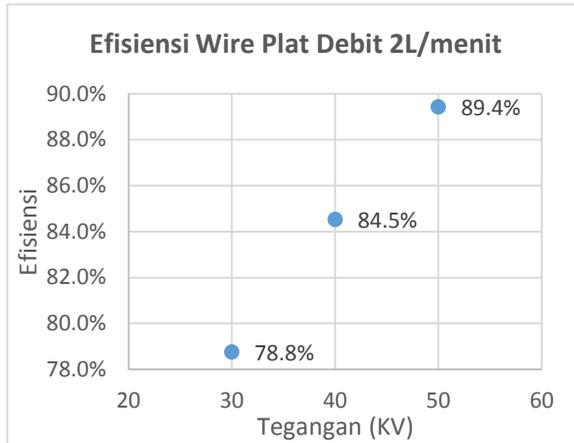
Gambar 4.15 Efisiensi *Wire To Plate* tegangan 40KV variasi debit



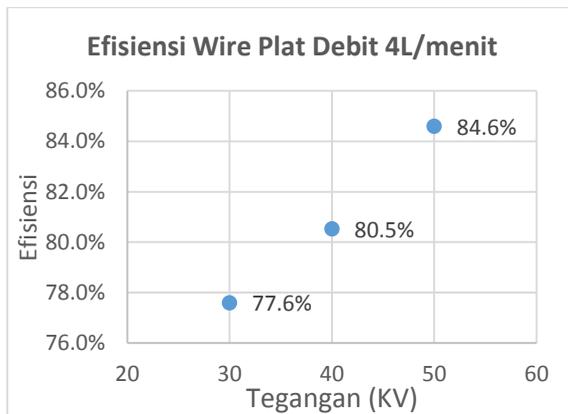
Gambar 4.16 Efisiensi *Wire To Plate* tegangan 50KV variasi debit

Pada gambar 4.13 hingga gambar 4.15 ketiganya menunjukkan terjadi penurunan efisiensi seiring bertambahnya debit masuk. Ketiganya menunjukkan efisiensi tertinggi terjadi pada debit 2l/menit dan ketiganya pula menunjukkan efisiensi terendah terjadi pada debit 6L/menit. Hal ini terjadi juga pada konfigurasi elektroda plat sejajar. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa efisiensi dapat dipengaruhi oleh debit karena yang mempengaruhi sebenarnya adalah kecepatan aliran udara

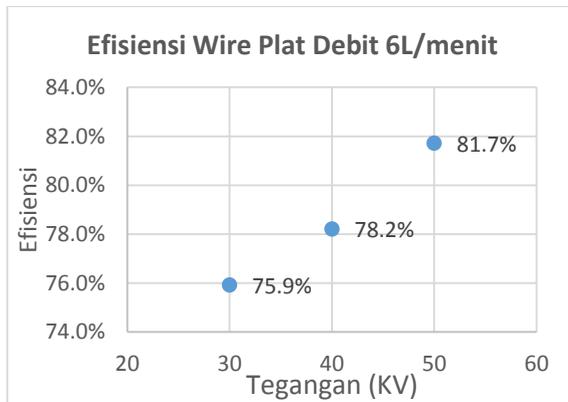
masuk. Hal ini juga tergantung dari luasan penampang ESP itu sendiri. Debit memiliki hubungan antara kecepatan aliran dan luasan penampang aliran udara



Gambar 4.17 Efisiensi *Wire To Plate* debit 2L/menit variasi tegangan



Gambar 4.18 Efisiensi *Wire To Plate* debit 6L/menit variasi tegangan



Gambar 4.19 Efisiensi *Wire To Plate* debit 6L/menit variasi tegangan

Grafik hasil dari hubungan efisiensi dengan variasi tegangan pada debit masuk tetap menunjukkan kenaikan efisiensi ketika tegangan dinaikkan. Dari hasil grafik ketiganya menunjukkan efisiensi tertinggi berada pada tegangan 50KV dan ketiga-tiganya pula menunjukkan efisiensi terendah pada saat tegangan 30KV. Hal serupa terjadi pada konfigurasi elektroda plat sejajar. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa hal ini disebabkan oleh kenaikan kuat medan listrik akibat kenaikan tegangan.

Dari hasil data percobaan pada ESP jenis konfigurasi elektroda plat sejajar dan konfigurasi elektroda wire to plate. Didapatkan hasil pengukuran akibat pengaruh tegangan dan debit masuk. Kedua konfigurasi elektroda menunjukkan bahwa semakin besar tegangan semakin besar pula efisiensinya sedangkan semakin rendah debit masuk semakin besar pula efisiensinya. Hal ini berlaku sebaliknya. Variasi tegangan yang digunakan adalah 30KV, 40KV dan 50 KV. Variasi debit yang digunakan adalah 2L/menit, 4L/menit dan 6/menit. Yang kesemua variasi tersebut disesuaikan dengan kebutuhan dalam proses penangkapan hasil partikel spray pyrolysis. pemilihan 30KV sebagai minimal tegangan dikarenakan dengan jarak plat adalah 5cm maka kuat medan listrik yang dihasilkan adalah sebesar 600KV/meter. Secara

perhitungan dengan menggunakan partikel bermuatan berjari-jari $0.5 \mu\text{m}$ mampu bergerak hingga mendekati kecepatan $5,9\text{cm/detik}$ bergerak menuju elektroda kolektor. Semakin besar medan juga semakin besar pula kecepatan partikel tersebut.

Dari kedua jenis ESP juga menunjukkan semakin besar debit semakin kecil efisiensinya. Sudah dijelaskan sebelumnya bahwa yang berpengaruh adalah kecepatan partikel melewati ESP. Dimana kecepatan ini tergantung dari luas penampang aliran pada ESP dan debitnya, karena luasannya tetap yaitu sebesar 289cm^2 sehingga yang mempengaruhi kecepatan adalah debitnya. Besar maksimum 6L/menit dipilih disesuaikan dengan kebutuhan spray pyrolysis. Jika debit sebesar 6L/menit dan luasan penampang aliran sebesar 289cm^2 maka kecepatan aliran secara perhitungan adalah $0,35\text{cm/detik}$. Kecepatan sebesar ini lebih kecil dibanding kecepatan dari partikel *drift*. Dengan persamaan 15 didapatkanlah panjang minimum sebesar $0,3\text{cm}$ dan panjang plat kolektor yang digunakan adalah 25cm . Hal ini seharusnya lebih dari cukup. ESP pada berbagai percobaan memiliki efisiensi bahkan mencapai 99% . Sehingga digunakan presentase tersebut sebagai penentuan luasan plat kolektor yang digunakan. Secara perhitungan didapatkan luasan minimum sebesar 79cm^2 . Dan plat kolektor digunakan berukuran $25\text{cm} \times 15\text{cm}$ sebanyak 3 buah.

Berdasarkan hasil percobaan kedua jenis ESP memiliki efisiensi tertinggi terjadi pada tegangan 50KV dan debit 2L/menit . Pada konfigurasi plat sejajar didapatkan efisiensi tertinggi sebesar $93,8\%$ dan pada konfigurasi *Wire To Plate* adalah sebesar $89,4\%$. Kedua jenis ESP memiliki efisiensi terendah pada tegangan 30KV dan debit 6L/menit . Pada konfigurasi plat sejajar didapatkan efisiensi terendah sebesar $76,7\%$ dan pada konfigurasi *Wire To Plate* adalah sebesar $75,9\%$. Efisiensi tertinggi didapatkan ESP dengan jenis konfigurasi elektroda plat sejajar pada tegangan 50KV dan debit 2L/menit . Efisiensi sebesar $93,8\%$ sudah sesuai sebagai subsistem dalam menangkap hasil partikel *spray pyrolysis*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa.

1. Rancang bangun Electrostatic Precipitator yang telah dilakukan dapat digunakan sebagai penangkapan hasil partikel pada Spray Pyrolysis.
2. Medan listrik pada sistem *electrostatic precipitator* dapat dikontrol dengan menggunakan *power supply* tegangan tinggi dan dapat diatur tegangan keluarannya. Semakin besar tegangan semakin besar medan listrik yang dihasilkan dan berlaku sebaliknya.
3. Efisiensi dipengaruhi oleh tegangan pada elektroda ESP dan dipengaruhi oleh kecepatan partikel masuk pada ESP. Semakin besar tegangannya semakin besar pula efisiensi yang didapatkan. Semakin kecepatan udara masuk semakin rendah efisiensi yang didapatkan. Efisiensi tertinggi yang didapatkan pada jenis ESP plat sejajar dengan efisiensi 93,8% saat tegangan 50KV dan debit udara sebesar 2L/menit.

5.2 Saran

Pembacaan untuk ADC sebaiknya memiliki resolusi lebih dari 10bit. karena pada ADC 10 bit sudah terjadi beda tegangan yang cukup besar pada tiap bitnya. Penulis sangat menyarankan untuk mempelajari tingkat keselamatan pada penggunaan tegangan tinggi. Dan pastikan selalu mengosongkan muatan pada *power supply* tegangan tinggi dengan menyentuhkan kedua ujung antara positif dan negatif,

karena *power supply* tersebut masih menyimpan muatan walau sudah dimatikan. Dan juga mengetahui resiko penggunaan tegangan tinggi. Penggunaan *water trap* sangat penting untuk pemasangan setelah udara keluar dari ESP. Karena partikel berukuran hingga submikron tersebut dapat dengan mudah masuk ke paru-paru dan mengganggu kesehatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Crawford, M., 1976. Air pollution control theory. McGraw-Hill, New York Düsseldorf.
- Heinsohn, R.J., Kabel, R.L., 1999. Sources and control of air pollution. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Kodas, T.T., Hampden-Smith, M.J., 1999. Aerosol processing of materials. Wiley-VCH, New York, NY.
- Mizuno, A., 2000. Electrostatic precipitation. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 7, 615–624. doi:10.1109/94.879357
- Perkins, H.C., 1974. Air Pollution. McGraw-Hill, New York.
- Strauss, W., 1975. Industrial gas cleaning: the principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions, 2. ed. ed, International series in chemical engineering. Pergamon Press, Oxford.
- Wang, L.K., Pereira, N.C., Hung, Y.-T. (Eds.), 2004. Air pollution control engineering, Handbook of environmental engineering. Humana Press, Totowa, N.J.

Lampiran 1

Pengambilan data tegangan terhadap ADC

byte	Tegangan (KV)										Rata-rata
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
300	29.7	29.8	29.8	29.8	29.7	29.7	29.7	29.8	29.8	29.7	29.75
305	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
310	29.9	29.9	29.9	29.8	29.8	29.8	29.8	29.9	29.8	29.9	29.85
315	30.1	30.1	30	30	30	30.1	30	30	30.1	30	30.04
320	30.2	30.3	30.3	30.3	30.2	30.2	30.2	30.3	30.3	30.2	30.25
325	30.4	30.5	30.5	30.5	30.5	30.4	30.5	30.6	30.5	30.5	30.49
330	31.2	31.1	31	31	31	31	31.1	31	31	31.1	31.05
335	32.2	32.3	32.3	32.3	32.4	32.4	32.3	32.3	32.3	32.3	32.31
340	33.8	33.8	33.8	33.8	33.8	33.7	33.7	33.7	33.7	33.8	33.76
341	34.2	34.2	34.1	34.1	34.1	34.2	34.1	34.1	34.2	34.2	34.15
342	34.6	34.7	34.6	34.7	34.7	34.6	34.6	34.6	34.6	34.8	34.65
343	35.1	35.1	35	34.9	34.9	35	35	34.9	35	34.9	34.98
344	35.2	35.2	35.1	35.2	35.1	35.1	35.2	35.1	35.1	35.1	35.14
345	35.3	35.2	35.4	35.3	35.3	35.2	35.3	35.3	35.3	35.3	35.29
346	36	36	36	36	35.9	36	36	35.9	36	36	35.98
347	36.3	36.3	36.3	36.3	36.3	36.2	36.2	36.2	36.3	36.3	36.27
348	38.4	38.4	38.4	38.3	38.3	38.4	38.5	38.5	38.4	38.4	38.4
349	38.6	38.6	38.7	38.7	38.7	38.7	38.7	38.6	38.7	38.6	38.66
350	39.8	40.1	40	40	39.9	39.9	39.9	39.9	40	39.9	39.94
351	41.2	41.8	41.7	41.6	41.6	41.4	41.3	41.3	41.3	41.4	41.46
352	42.7	42.8	42.9	42.9	42.7	42.7	42.9	42.8	42.8	42.7	42.79
353	43.7	43.5	43.6	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.53
354	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.7	43.8	43.7	43.7	43.77
355	43.9	43.9	43.9	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.83
356	43.8	43.9	43.9	43.9	43.9	43.9	43.9	43.8	43.9	43.9	43.88
357	44	44.1	44	44.1	44	44.1	44	44.1	44.1	44.1	44.06
358	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3
359	44.9	44.9	44.8	44.9	44.9	44.8	44.9	44.8	44.8	44.9	44.86
360	45.4	45.5	45.5	45.5	45.6	45.5	45.5	45.4	45.5	45.5	45.49
361	46.3	46.4	46.3	46.3	46.3	46.4	46.4	46.4	46.3	46.3	46.34
362	46.9	46.9	46.9	46.8	46.8	46.9	46.9	46.9	46.8	46.8	46.86
363	47	46.9	46.9	46.9	46.9	47	47	46.9	46.9	47	46.94
364	47	47.1	47	46.9	47	47	46.9	47	47	47	46.99
365	47.2	47.5	47.5	47.5	47.5	47.4	47.5	47.4	47.5	47.5	47.45
366	47.6	47.6	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.6	47.67
367	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.7	47.7	47.7	47.8	47.7	47.76
368	47.9	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.81
369	48	48	48	48	47.9	48	47.9	48	48	48	47.98
370	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2	48.2
371	48.4	48.3	48.4	48.4	48.3	48.3	48.3	48.4	48.3	48.4	48.35
372	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5
373	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6
374	48.8	48.9	48.8	48.8	48.9	48.9	48.8	48.9	48.8	48.9	48.85
375	49.1	49.1	49	49	49	49.1	49.1	49	49.1	49.1	49.06
376	49.4	49.4	49.3	49.4	49.4	49.3	49.4	49.4	49.4	49.4	49.38
377	49.6	49.6	49.6	49.7	49.6	49.7	49.7	49.6	49.7	49.6	49.64

378	49.8	49.8	49.8	49.7	49.8	49.7	49.7	49.8	49.8	49.8	49.77
379	50.3	50.2	50.2	50.2	50.3	50.3	50.2	50.2	50.2	50.3	50.24
380	50.2	50.3	50.3	50.3	50.3	50.2	50.3	50.3	50.3	50.3	50.28
385	50.9	50.9	50.8	50.8	50.9	50.8	50.9	50.8	50.8	50.8	50.84
390	51.2	51.1	51.1	51.2	51.2	51.1	51.2	51.1	51.1	51.1	51.14
395	51.6	51.6	51.6	51.4	51.4	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.56
400	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8
405	51.7	51.6	51.7	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.62
410	51.7	51.7	51.8	51.7	51.8	51.7	51.8	51.8	51.8	51.8	51.76
415	51.6	51.7	51.7	51.7	51.7	51.6	51.6	51.7	51.7	51.7	51.67
420	51.3	51.3	51.3	51.2	51.3	51.3	51.3	51.2	51.3	51.3	51.28
425	51	50.9	50.9	51	50.9	50.9	51	50.9	50.9	50.9	50.93
430	50.1	50.1	50.1	50.2	50.1	50.1	50.1	50.2	50.1	50.1	50.12
435	48.8	48.9	48.8	48.8	48.9	48.8	48.9	48.8	48.8	48.8	48.83
440	48.8	48.7	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.7	48.8	48.78
445	49.1	49	49.1	49.1	49	49.1	49.1	49.1	49	49.1	49.07
450	49.9	49.8	49.9	49.9	49.9	49.9	49.8	49.9	49.8	49.9	49.87
455	50.7	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.7	50.7	50.6	50.6	50.63
460	50.8	50.9	50.9	50.8	50.8	50.9	50.9	50.9	50.9	50.9	50.87
465	51.9	51.8	51.9	51.8	51.9	51.9	51.8	51.9	51.9	51.9	51.87
470	52.9	52.9	53	53	53	53	53	52.9	52.9	52.9	52.95
475	54.5	54.5	54.4	54.4	54.4	54.4	54.4	54.5	54.4	54.4	54.43
480	56.2	56.1	56.2	56.1	56.2	56.1	56.1	56.1	56.1	56.1	56.13
485	56.1	56.1	56.1	56.2	56.2	56.1	56.1	56.2	56.1	56.2	56.14
490	60.1	60.1	60	60.1	60.1	60.1	60	60.1	60	60.1	60.07
495	62.6	62.7	62.6	62.6	62.6	62.7	62.7	62.6	62.7	62.7	62.65
500	66.9	66.9	67	66.9	67	66.9	66.9	67	67	66.9	66.94

Lampiran 2

Data hasil pengukuran efisiensi pada plat sejajar

Q=2liter/menit

30kv			40kv			50kv		
in	catch	efisiensi	in	catch	efisiensi	in	catch	efisiensi
0.68	0.48	70.6%	1.14	0.98	86.0%	0.72	0.68	94.4%
0.54	0.44	81.5%	0.8	0.72	90.0%	0.6	0.58	96.7%
0.8	0.6	75.0%	0.86	0.7	81.4%	0.9	0.86	95.6%
0.62	0.5	80.6%	0.66	0.58	87.9%	0.9	0.84	93.3%
0.72	0.62	86.1%	0.98	0.86	87.8%	1.08	0.96	88.9%
Rata-rata		78.8%	Rata-rata		86.6%	Rata-rata		93.8%

Q=4liter/menit

30kv			40kv			50kv		
in	catch	efisiensi	in	catch	efisiensi	in	catch	efisiensi
1.26	0.98	77.8%	1.28	1.04	81.3%	1.28	1.12	87.5%
1.22	0.86	70.5%	1.22	1	82.0%	1.36	1.18	86.8%
1.12	0.82	73.2%	1.24	0.98	79.0%	1.38	1.18	85.5%
1.2	1.02	85.0%	1.32	1.08	81.8%	1.34	1.14	85.1%
1.26	1	79.4%	1.28	1.04	81.3%	1.34	1.12	83.6%
Rata-rata		77.2%	Rata-rata		81.1%	Rata-rata		85.7%

Q=6liter/menit

30kv			40kv			50kv		
in	catch	efisiensi	in	catch	efisiensi	in	Catch	efisiensi
1.42	0.98	69.0%	1.52	1.12	73.7%	1.4	1.2	85.7%
1.38	1	72.5%	1.54	1.24	80.5%	1.42	1.16	81.7%
1.52	1.22	80.3%	1.48	1.2	81.1%	1.52	1.26	82.9%
1.42	1.16	81.7%	1.38	1.14	82.6%	1.5	1.28	85.3%
1.5	1.2	80.0%	1.6	1.3	81.3%	1.58	1.26	79.7%
Rata-rata		76.7%	Rata-rata		79.8%	Rata-rata		83.1%

Lampiran 3

Data hasil pengukuran efisiensi pada wire to plate

Q=2liter/menit

30kv			40kv			50kv		
in	catch		in	catch		in	catch	
1.1	0.84	76.4%	1.38	1.24	89.9%	1.28	1.16	90.6%
0.92	0.7	76.1%	1.34	1.1	82.1%	1.14	1	87.7%
1.12	0.86	76.8%	1.52	1.26	82.9%	1.32	1.18	89.4%
1.08	0.88	81.5%	1.12	0.94	83.9%	1.24	1.12	90.3%
1.18	0.98	83.1%	1.24	1.04	83.9%	1.1	0.98	89.1%
Rata-rata		78.8%	Rata-rata		84.5%	Rata-rata		89.4%

Q=4liter/menit

30kv			40kv			50kv		
in	catch		in	catch		in	catch	
1.58	1.1	69.6%	1.06	0.9	84.9%	1.58	1.34	84.8%
1.36	1.06	77.9%	1.66	1.36	81.9%	1.56	1.3	83.3%
1.52	1.2	78.9%	1.64	1.38	84.1%	1.3	1.12	86.2%
1.36	1.1	80.9%	1.46	1.2	82.2%	1.44	1.2	83.3%
1.34	1.08	80.6%	1.44	1	69.4%	1.5	1.28	85.3%
Rata-rata		77.6%	Rata-rata		80.5%	Rata-rata		84.6%

Q=6liter/menit

30kv			40kv			50kv		
in	catch		in	catch		in	catch	
1.6	1.22	76.3%	1.54	1.24	80.5%	1.56	1.3	83.3%
1.62	1.26	77.8%	1.72	1.32	76.7%	1.5	1.24	82.7%
1.6	1.2	75.0%	1.64	1.26	76.8%	1.62	1.3	80.2%
1.56	1.14	73.1%	1.62	1.2	74.1%	1.54	1.26	81.8%
1.6	1.24	77.5%	1.52	1.26	82.9%	1.54	1.24	80.5%
Rata-rata		75.9%	Rata-rata		78.2%	Rata-rata		81.7%

Lampiran 4

Pengukuran efisiensi pada ESP



BIODATA PENULIS



Rozaq Alfian Wiranata lahir di Kediri, Jawa Timur pada tanggal 3 Agustus 1995. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan suami istri bernama Yoni dan Sumiati Mahmudah. Pendidikan dimulai pada TK Al-Irsyad Kota Kediri, SD Al-Huda Kota Kediri (2001-2007), MTsN 2 Kediri (2007-2010), SMAN 1 Kediri (2010-2013). Kemudian penulis meneruskan pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan NRP 1113100036 melalui jalur undangan.

Selama di perkuliahan penulis aktif dalam organisasi mahasiswa, diantaranya sebagai staff BSO Kajian Strategi Himpunan Mahasiswa Fisika 2014/2015 dan menjabat sebagai Direktur BSO Competency Development Himpunan Mahasiswa Fisika 2015/2016. Dalam pengembangan minat di dunia *science*, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Elektronika Dasar 1 dan 2 pada tahun ketiga dan keempat. Selain hal tersebut penulis juga ikut aktif dalam kegiatan di Laboratorium Elektronika Instrumentasi Jurusan Fisika ITS. Penulis pernah bergabung dalam kerja praktek dengan PT. Indonesia Asahan Aluminium (INALUM) Sumatera Utara. Penulis dapat dihubungi melalui email rozaqalfanw@gmail.com