

**PENGEMBANGAN FILTER PARTIKULAT PM_{2.5}
BERBASIS MULTI KAPASITOR BERTEGANGAN
RENDAH AC UNTUK SISTEM PEMBUANGAN
EMISI SEPEDA MOTOR**

Oleh:

**AKHMAD NUR HARIMUKTI
135090801111011**

PROGAM STUDI : S1 INSTRUMENTASI



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



**PENGEMBANGAN FILTER PARTIKULAT PM_{2.5}
BERBASIS MULTI KAPASITOR BERTEGANGAN
RENDAH AC UNTUK SISTEM PEMBUANGAN
EMISI SEPEDA MOTOR**

SKRIPSI

Sebagai salah satu untuk memperoleh gelar sarjana sains dalam
bidang fisika

Oleh:

AKHMAD NUR HARIMUKTI
135090801111011



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018



DAFTAR ISI

COVER DEPAN.....	i
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Udara.....	5
2.2 Polusi Udara.....	6
2.3 <i>Particulate Matter</i> (PM).....	7
2.4 Sistem Filtrasi Emisi Sepeda Motor.....	9
2.5 Listrik AC.....	12
2.6 Kanomax Dust Monitor.....	14
BAB III METODOLOGI.....	15
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2 Alat dan Bahan.....	15
3.3 Alur Penelitian	16
3.3.1 Pembuatan Pengondisi Sinyal	17
3.3.2 Pembuatan Filter	18
3.3.3 Pengambilan Data	20
3.3.4 Analisis Data	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Hasil Desain Filter	23
4.2 Hasil Pengujian Konsentrasi PM _{2.5}	25
4.2.1 Frekuensi 60Hz	25



4.3	Hasil Pengujian Efisiensi PM _{2.5}	27
4.3.1	Pembuatan Pengondisi Sinyal	27
4.3.2	Frekuensi 60Hz	28
4.3.3	Frekuensi 1309Hz	29
4.4	Pembahasan	29
BAB V PENUTUP		37
5.1	Kesimpulan	37
5.2	Saran	37
DAFTAR PUSTAKA		39
LAMPIRAN.....		43



PENGEMBANGAN FILTER PARTIKULAT $PM_{2.5}$ BERBASIS MULTI KAPASITOR BERTEGANGAN RENDAH AC PADA SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem filtrasi partikulat matter. Terdapat empat buah filter berbahan aluminium dengan jarak antar plat yang berbeda: F1 (0.9cm); F2 (1.8cm); F3 (2.7cm); dan F4(3.6cm). Listrik yang bersumber dari aki sepeda motor akan menginduksi *probe* filter (plat aluminium) dengan tiga variasi frekuensi: 60Hz, 684Hz, dan 1309Hz yang digunakan untuk menarik partikulat yang melewatinya sehingga hasil partikulat yang keluar akan berkurang. Penelitian dilakukan untuk mengetahui besar efisiensi yang dihasilkan oleh filter pada pengurangan konsentrasi $PM_{2.5}$ dari emisi sepeda motor. Dengan sistem penyaringan yang terpasang pada knalpot dapat mengurangi konsentrasi $PM_{2.5}$ sebesar 3% hingga 8% yang bergantung pada frekuensi arus AC dan jarak antar plat pada filter.

Kata kunci: Pengurangan Partikulat, $PM_{2.5}$, Elektrostatik, Tegangan rendah AC, Filter, Efisiensi



THE DEVELOPMENT OF PARTICULATE FILTER $PM_{2.5}$ BASED CAPCITOR MULTI AC LOW VOLTAGE ON MOTORCYCLE EXHAUST SYSTEM

ABSTRACT

This study was conducted to develop a $PM_{2.5}$ filter system, consisting of four different electrostatic filter. The filter was made of aluminium plates with the different filter gap : F1 (0.9cm); F2 (1.8cm); F3 (2.7cm); dan F4 (3.6cm). The filter efficiency was determined by the reduction ratio of the $PM_{2.5}$ concentration before and after passing through the filter. The efficiency measurement was conducted for the different frequency of: 60Hz, 684Hz, and 1309Hz. The filter efficiency was obtained of 3% to 8% depending on the frequency and the filter gap.

Keywords: Particulate Reduction, $PM_{2.5}$, electrostatic, AC low voltage, filter, efficiency.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, sepeda motor telah menjadi andalan utama bagi masyarakat Indonesia. Bukan hanya kalangan menengah atas semata, namun masyarakat biasa pun banyak yang sudah memiliki kendaraan roda dua ini sebagai kendaraan pribadi. Pada tahun 2013, jumlah kendaraan sepeda motor di Indonesia mencapai 84.732.652 unit (SI, 2014). Peningkatan jumlah kendaraan bermotor akan berpengaruh terhadap kualitas udara akibat sejumlah polutan yang dihasilkan, sehingga memang benar-benar memerlukan perhatian lebih.

Dalam kurun waktu 6 tahun sejak 1995 hingga 2001 terdapat pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia sebesar hampir 100%. Sebagian besar kendaraan bermotor tersebut menghasilkan emisi yang buruk, baik akibat perawatan yang kurang memadai ataupun dari penggunaan bahan bakar dengan kualitas kurang baik (misal: kadar timbal/ Pb yang tinggi). Data tersebut juga menempatkan Jakarta menjadi salah satu kota dengan kadar polutan/ partikulat tertinggi setelah Beijing, New Delhi, dan Mexico City (Zaini, 2008).

Salah satu masalah yang ditimbulkan dari peningkatan populasi kendaraan bermotor adalah polusi udara akibat emisi kendaraan bermotor. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas udara di luar ruangan secara umum. Baik kendaraan yang *modern* maupun kendaraan yang tidak layak pakai. Senyawa pencemar yang berupa emisi gas buang kendaraan bermotor antara lain adalah karbon monoksida (CO), berbagai senyawa hidrokarbon, berbagai oksida nitrogen (NO_x), sulfur (SO_x), dan partikulat debu termasuk timbal (Pb), serta banyak gas lain yang berasal dari asap kendaraan juga berbahaya bagi kesehatan manusia (Dwyer dkk., 2010a; Sabaliauskas dkk., 2012). Bahkan, penelitian lain menunjukkan bahwa kendaraan bermotor dapat mengemisikan PAH (*Polyaromatic Hydrocarbon*) dengan kadar yang cukup tinggi (Tsai, Huang, & Chiang, 2014) dan juga VOC (*Volatile Organic Compound*) (Cao dkk., 2015), dan juga partikulat atau PM (*Particulate Matter*) (Fushimi dkk., 2016).

Partikulat udara yang memiliki dampak pada kesehatan manusia dan menjadi parameter suatu pencemaran udara salah satunya adalah $\text{PM}_{2.5}$. $\text{PM}_{2.5}$ merupakan partikulat yang berukuran kurang dari

2,5 μm . Penelitian yang dilakukan di Beijing pada tahun 1999 sampai dengan 2000 menunjukkan bahwa terdapat 25 sampai 30% $\text{PM}_{2,5}$ di daerah penelitan tersebut (He dkk., 2001). Penelitian lain menunjukkan bahwa konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ di Beijing pada tahun 2011 sebesar $61,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dari sektor stasiun bawah tanah dan $49,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di area pedestrian (Yan dkk., 2015).

Berdasarkan uraian di atas, diketahui bahwa emisi $\text{PM}_{2,5}$ kendaraan bermotor terbilang sangat tinggi, sehingga perlu dilakukan upaya untuk mereduksi konsentrasi PM dari kendaraan bermotor. Beberapa kendaraan bermesin diesel sudah menggunakan filter khusus yang bernama DPF (*Diesel Particulate Filter*). Hal ini disebabkan oleh banyaknya kadar konsentrasi partikulat yang dihasilkan oleh kendaraan bermesin diesel jika dibandingkan dengan kendaraan dengan bahan bakar bensin (Buono dkk., 2012). Saat ini umumnya sepeda motor yang digunakan di Indonesia belum menggunakan filter yang dapat mengurangi kadar konsentrasi partikulat yang dihasilkan oleh sepeda motor. Selain DPF yang notabene berbasis filtrasi porositas, juga terdapat metode filtrasi elektrostatis. Metode elektrostatis banyak digunakan dalam dunia industri, terutama dalam pengaturan aliran gas buang hasil pembakaran bahan baku, atau bahan-bahan lain merujuk pada kebutuhan energi sekunder (teknologi elektrostatis presipitator (ESP) di cerobong asap). Di sisi lain, metode ini juga belum diaplikasikan pada mode transportasi darat. Metode ini dapat diyakini memiliki kompetensi dan nilai ekonomis tinggi, namun tetap terjangkau bagi masyarakat serta bernilai ergonomis jika diterapkan pada kendaraan bermotor yaitu sepeda motor. Dikhususkan pada sepeda motor karena, rata-rata penduduk Indonesia menggunakan sepeda motor dan menjadi sumber utama polusi udara yang ada di Indonesia (Wardoyo dkk., 2017). Oleh karena itu berdasarkan latar belakang tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “Pengembangan Filter Partikulat $\text{PM}_{2,5}$ Berbasis Multi Kapasitor Bertegangan Rendah AC Untuk Sistem Pembuangan Emisi Sepeda Motor”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimanakah desain pengembangan filter partikulat $PM_{2.5}$ berbasis multi kapasitor bertegangan rendah AC untuk sistem pembuangan emisi dari sepeda motor ?
2. Bagaimanakah konsentrasi $PM_{2.5}$ sebelum dan sesudah di filter?
3. Faktor apa yang mempengaruhi efisiensi filter tersebut?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Efisiensi filter ditetapkan berdasarkan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ sebelum dan setelah melewati filter yang terdeteksi oleh alat ukur yang digunakan dengan rentang diameter $0,1 \mu m$ hingga $2,5 \mu m$, tanpa membahas distribusi jumlah partikel ataupun senyawa penyusun di dalam partikulat tersebut.
2. Tegangan rendah AC ditetapkan sebagai tegangan AC gelombang kotak sebesar 12 Volt yang bersumber dari aki sepeda motor 12 Volt DC dan rangkaian pengkondisi sinyal.
3. Motor yang dipilih berjumlah tiga sampel motor (M1, M2, dan M3) dalam kondisi standar, berspesifikasi 4-tak dengan kubikasi silinder berbeda ($150, 113, \text{ dan } 155 \text{ cm}^3$) yang dipilih berdasarkan manufaktur yang sama, beda tipe, tahun produksi yang berbeda, dan *milleage* yang berbeda, tanpa membahas pengaruh motor terhadap efisiensi filter.
4. Pengukuran efisiensi filter dilakukan 5 menit pertama saat sepeda motor dinyalakan.

1.4 Tujuan Penelitian

Merujuk pada rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengembangkan filter partikulat $PM_{2.5}$ berbasis multi kapasitor bertegangan rendah AC untuk sistem pembuangan emisi sepeda motor.
2. Meneliti konsentrasi $PM_{2.5}$ sebelum dan sesudah di filter.
3. Menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi filter tersebut.

1.5 Manfaat Penelitian

Sehubungan dengan uraian yang ada di latar belakang penelitian di atas, maka manfaat dari penelitian ini adalah untuk memperoleh filter yang diharapkan dapat memberikan suatu penyelesaian terhadap permasalahan yang ditimbulkan oleh partikulat jenis $PM_{2.5}$ terhadap lingkungan dan kesehatan manusia secara optimal dengan regulasi-regulasi dan kaidah/ etik sosial yang berlaku.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Udara

Udara adalah campuran beberapa gas yang terkandung pada atmosfer bumi. Di dalam udara terkandung nitrogen 78%, oksigen 21%, argon 0,93%, karbon dioksida 0,03%, beberapa senyawa lain yang kandungannya sangat sedikit seperti Neon, Helium, Krypton, Xenon, Ozon, Hidrogen dan senyawa lainnya. Suatu udara dapat dikatakan murni ketika udara tersebut tidak terkandung senyawa-senyawa yang dapat mengganggu kesehatan manusia atau hewan, merusak tanaman dan berbau tidak sedap (Spellman, 2009).

Bentuk standar dari udara dapat didefinisikan dengan udara kering yang di dapat disekitar laut, dimana temperatur dan tekanannya yaitu masing-masing 15 °C dan 101.325 Pa. Udara standar mengandung 78.08% Nitrogen, 20.95% Oksigen, 0.93% Argon, 0.0314% karbon dioksida dan beberapa gas lainnya dalam jumlah yang sedikit. Rasio tersebut dapat berubah sangat sedikit tergantung pada tempat dan waktu. Selain itu kelembaban dapat mempengaruhi udara menjadi terkandung uap air. (Tan, 2014)

Pencemaran udara dibedakan menjadi empat yaitu pencemaran udara menurut bentuk, tempat, susunan kimia dan asalnya. Menurut bentuknya dibagi menjadi dua yaitu pencemaran udara yang berupa gas dan pencemaran udara yang berupa partikel. Menurut tempatnya juga dibagi menjadi dua yaitu pencemaran udara di dalam ruangan dan pencemaran udara di udara bebas. Sedangkan pencemaran berdasarkan susunan kimia yang mencemari dibedakan menjadi organik dan anorganik. Dan yang terakhir yaitu pencemaran udara menurut asalnya dibagi menjadi pencemaran udara primer primer dan sekunder (Pawestri dkk., 2014; Sabaliauskas dkk., 2012). Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) adalah angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi kualitas udara ambien di lokasi dan waktu tertentu yang didasarkan pada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya.

2.2 Polusi Udara

Polusi adalah proses dimana masuknya polutan ke dalam lingkungan sehingga dapat menurunkan kualitas lingkungan tersebut. Menurut Undang-undang Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 4 tahun 1982, pencemaran lingkungan atau polusi adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan, atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam sehingga kualitas lingkungan turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya.

Pencemaran udara atau polusi udara adalah kehadiran satu atau lebih substansi fisik, kimia atau biologi di atmosfer dalam jumlah membahayakan kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan, mengganggu estetika dan kenyamanan atau merusak properti (EPA, 2009). Sedangkan menurut Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, pasal 1, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi dari komponen lain kedalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (Nurbiantara, 2010).

Ada tiga kategori sumber dari polusi udara yaitu yang pertama adalah *natural* (segala sesuatu yang tidak ada hubungannya dengan aktivitas manusia), yang kedua yaitu *anthropogenic* (dihasilkan oleh aktivitas manusia) dan yang ketiga yaitu *secondary* (dibentuk oleh atmosfer dari polusi natural dan antropogenik). Setiap kategori dapat dibagi lagi menjadi beberapa subkategori. Sebagai contoh, polusi *anthropogenic* dapat diklasifikasikan menjadi stasioner (pabrik, kebun, rumah dan lainnya) dan kendaraan (mobil, truk, kapal, pesawat dan lainnya). Subkategori lainnya seperti *indoor* dan *outdoor*, organik dan anorganik, atau local dan regional juga dapat digunakan. Dari semua pilihan tersebut akan menghasilkan gambaran sumber dan emisi yang bersangkutan dengan kategori lain dari polusi udara (Phalen & Phalen, 2013).

2.3 PM (*Particulate Matter*)

Particulate Matter adalah salah satu polusi yang tersusun oleh partikel padat atau carian yang sangat kecil dan dapat ditemukan di atmosfer (**Gambar 2.1**). Partikel individual tidak dapat dilihat secara

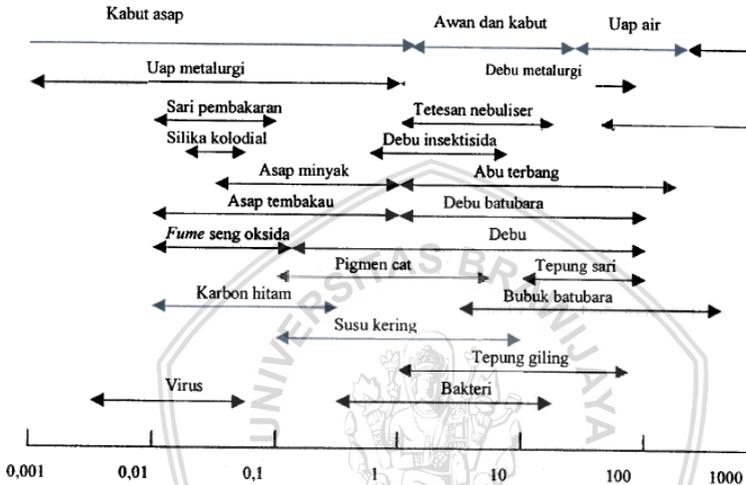
kasat mata, jika partikel tersebut terkumpul (bergabung) mereka dapat terlihat seperti jelaga hitam, awan debu atau kabut kusam. *Particulate Matter* dapat dihasilkan melalui proses alami (serbuk sari, bakteri, virus, jamur, ragi, tanah hasil erosi) atau melalui kegiatan manusia seperti penggunaan truk diesel, pembangkit listrik, pembakaran kayu dan proses industri (Alias dkk, 2007).

Partikel kasar PM_{10} memiliki diameter aerodinamis sekitar $2.5\mu m$ hingga $10\mu m$. Mereka terbentuk dari gangguan mekanis (seperti penghancuran, penghalusan, abrasi dari suatu permukaan); evaporasi dari semprotan dan suspensi debu. PM_{10} tersusun atas aluminosilikat dan oksida dari unsur kerak dan sumber utama termasuk buangan debu dari jalan, industri, agrikultur, konstruksi dan pembongkaran, dan abu yang terbang dari pembakaran bahan bakar fosil. Usia dari PM_{10} adalah bisa dari menit hingga jam, dan ini bergerak dengan jarak yang bervariasi mulai $<1km$ hingga $10km$ (Fierro, 2001).

Partikel halus $PM_{2,5}$ tersusun umumnya berasal dari partikel hasil pembakaran dari kendaraan dan pembakaran dari batu bara, bahan bakar minyak, dan kayu, tapi juga mengandung partikel kerak dari debu jalan dan tanah yang tergerus $PM_{2,5}$ merupakan partikel dengan diameter antara $0,1\mu m$ dan $2,5\mu m$. (Laden dkk., 2000). $PM_{2,5}$ dapat terbentuk secara alami dari atmosfer dan reaksi kimia dari bahan bakar pembakaran, seperti pada gas buang kendaraan bermotor dan aktivitas industry (Morawska & Zhang, 2002). PM jenis ini dapat dihasilkan pula oleh kondensasi uap bersuhu tinggi dari Sulfur (S) 10,29%; Silikon (Si) 6,75%; Besi (Fe) 9,2%; Aluminium (Al) 8,61%; Kalsium (Ca) 8,70%; Potassium (K) 9,09%; Sodium (Na) 12,03%; Magnesium (Mg) 5,85%; Fosfor (P) 6,82%; Chlorine (Cl) 2,53%; Titanium (Ti) 7,19%; Zinc (Zn) 9,48%; Mangan (Mn) 9,50%; Tembaga (Cu) 7,42%; Timbal (Pb) 6,59%; Selenium (Se) 9,44%; Bromin (Br) 9,85%; dan Nikel (Ni) 13,70%.

$PM_{2,5}$ diketahui memiliki hubungan dengan resiko gangguan terhadap kesehatan, bahkan hingga resiko kematian. Beberapa penelitian telah melakukan investigasi terkait hubungan antara konsentrasi $PM_{2,5}$ dari berbagai sumber polutan dengan kerusakan organ. Terkait dengan kasus kematian, sebuah penelitian yang dilakukan di China mengungkapkan bahwa $PM_{2,5}$ memiliki kontribusi yang cukup signifikan pada kasus kematian pada tahun 2013. Hal ini

dikarenakan 83% populasi hidup dan tinggal di area dengan konsentrasi PM_{2,5} yang cukup tinggi, yakni melebihi 35 µg/ m³ (Liu, Han, Tang, Zhu, & Zhu, 2016). Efisiensi deposisi PM_{2,5} dapat dipengaruhi oleh besar konsentrasi, luas area, dan kecepatan proses deposisi yang terjadi (Shi, Li, & Zhao, 2014).



Gambar 2.1 Diameter PM (Suhariyono & Wiyono, 2003)

2.4 Sistem Filtrasi Emisi Sepeda Motor

Sistem filtrasi emisi sepeda motor pada dasarnya melekat pada saluran pembuangan emisi pada kendaraan bermotor. Saluran ini merupakan saluran untuk membuang sisa hasil pembakaran pada mesin pembakaran kendaraan bermotor. Sistem pembuangan dapat terdiri dari beberapa komponen, seperti sebuah pipa pembuangan dengan bahan logam tertentu. Di Indonesia, sistem ini dikenal sebagai knalpot. Desain knalpot sepeda motor dirancang sedemikian hingga dapat menyalurkan emisi hasil pembakaran mesin ke tempat yang aman bagi pengguna mesin dengan kadar emisi tertentu. Karena tingginya temperatur pada bagian ini (>300 °C), maka knalpot harus bersifat tahan panas dan juga cepat melepaskan panas.

Salah satu teknik filtrasi emisi jenis PM adalah DPF yang memiliki kepanjangan *Diesel Particulate Filter* (Gambar 2.2). Filter

jenis DPF ini sangat jamak ditemukan di dalam kendaraan bermesin diesel. Selain itu, DPF memiliki satu permasalahan penting, di mana regenerasi filter jenis ini membutuhkan studi lebih lanjut (Dwyer et al., 2010b). Pada saat partikulat melewati dinding DPF, filter ini membuat PM melewati seluruh celah yang ada pada dinding DPF. Hasil efisiensinya memang terbukti cukup besar. Untuk sistem filtering PM_{0.1}, didapatkan efisiensi sebesar 42%-50%. Untuk sistem filtering PM_{2.5}, didapatkan efisiensi sebesar 36%-47%. Nilai efisiensi ini bergantung pada panjang pendeknya filter (Wahyuningrum dkk., 2014).



Gambar 2.2 Ilustrasi aliran partikulat melewati dinding DPF (Wahyuningrum dkk., 2014)

Filter partikulat berbasis radiasi memanfaatkan pancaran gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh sumber panas kendaraan bermotor. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar radiasi, di mana radiasi memanfaatkan sumber panas semua benda yang lebih hangat dari suhu absolut nol, termasuk tubuh hewan dan matahari. Radiasi dapat memindahkan panas di antara benda-benda yang tidak melakukan kontak langsung, seperti ketika hewan menyerap panas radiasi dari matahari (Campbell dkk, 2004). Salah satu pengembangan filter ini adalah *reheated filter* pada sistem pembuangan emisi sepeda motor yang dikembangkan oleh Wardoyo (2017). Posisi penempatan filter paling efektif pada desain *reheated system filtering* berada di posisi pertama (P1) karena posisi ini paling dekat dengan mesin dimana mesin merupakan sumber panas dari sepeda motor.

Penggunaan filter ini dapat mengurangi konsentrasi $PM_{2,5}$ yang dihasilkan sepeda motor hingga 59% untuk sepeda motor pertama 53% untuk sepeda motor kedua dan 41% untuk sepeda motor ketiga.



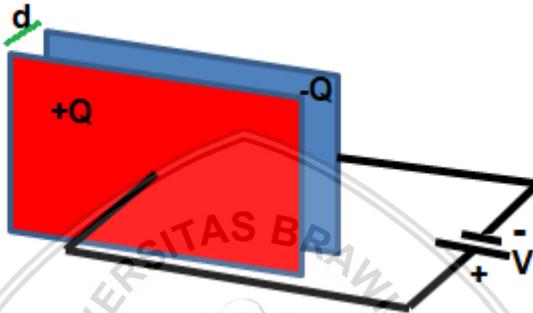
Gambar 2.3 Filter PM berbasis radiasi

Selain DPF dan radiasi, terdapat filter PM berbasis porositas lainnya, yakni filter lembaran tipis yang berasal dari biomassa. Filter tersebut dapat terbuat dari berbagai kombinasi bahan, seperti campuran antara serbuk sabut kelapa dan lem kanji dengan perbandingan 50:50. Filter ini memiliki efisiensi 16%-47% untuk $PM_{2,5}$ (**Gambar 2.4**). Efisiensi filter lembaran tipis biomassa ini dipengaruhi oleh ketebalan filter, densitas filter, dan ketahanan filter (Pawestri dkk., 2014).



Gambar 2.4 Filter sabut kelapa (Pawestri dkk., 2014)

Contoh filter PM lainnya adalah filter berbasis elektrostatik yang memanfaatkan medan listrik di dalam plat sejajar (**Gambar 2.5**). Pada filter ini, partikel-partikel berbentuk ion dipisahkan secara elektrostatik oleh medan listrik (E) di antara kedua plat logam yang bermuatan listrik (Q dan q) tersebut dengan jarak antar plat r (Syakur dkk., 2009). Konstanta k bernilai $9 \times 10^9 \text{ N.C}^{-2}\text{m}^2$. Besar E sebanding dengan besar gaya elektrostatik F .



Gambar 2.5 Prinsip pada filter elektrostatik

Dari **Gambar 2.5**, medan listrik yang dihasilkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.1) berikut.

$$E = \frac{F}{q} = \frac{k \frac{Q \cdot q}{r^2}}{q} \quad (2.1)$$

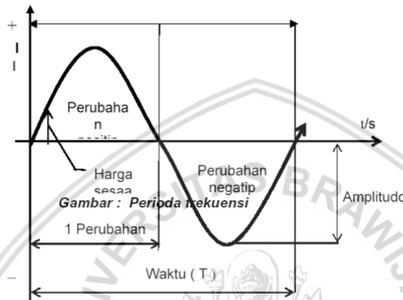
Selain itu, besar E akan dipengaruhi oleh besar tegangan (V), sehingga:

$$V = k \frac{Q}{r} = E \cdot r \quad (2.2)$$

2.5 Listrik AC

Arus bolak-balik (AC/ *alternating current*) adalah arus listrik (I) yang memiliki besar dan arah arus berubah-ubah secara bolak-balik. Berbeda dengan arus searah (DC/ *direct current*) di mana arah arus yang mengalir tidak berubah-ubah dengan waktu. Bentuk gelombang yang terdapat pada listrik arus bolak-balik gelombang yang dihasilkan berbentuk sinusoidal, karena ini yang memungkinkan

pengaliran energi yang paling efisien. Namun dalam aplikasi-aplikasi spesifik yang lain, bentuk gelombang lain pun dapat digunakan, misalnya bentuk gelombang segitiga (*triangular wave*) atau bentuk gelombang segi empat (*square wave*). Pada arus bolak-balik terdapat besaran berupa frekuensi (f). Frekuensi arus bolak balik adalah waktu yang diperlukan oleh arus bolak balik untuk kembali pada harga dan arah yang sama (1 putaran) atau biasa disebut sebagai periode (T) atau $f=T^{-1}$. Bentuk grafik dari frekuensi arus bolak balik itu sendiri dapat dilihat pada gambar **Gambar 2.6** berikut.



Gambar 2.6 Periode frekuensi

Sumbu axis merupakan fungsi waktu (periode) dalam sekon sedangkan fungsi koordinat merupakan fungsi arus (I) dalam ampere dan terdapat pula pada grafik suatu amplitudo (A) yang merupakan harga maksimum arus. sedangkan frekuensi sudut (ω) dalam tegangan gerak elektrik itu sendiri merupakan frekuensi sudut yang tetap dan dapat dihasilkan oleh sebuah generator arus bolak balik. Arus bolak-balik memiliki arus yang berubah tanda (polaritas) pada selang waktu tertentu. Arus dan tegangan listrik bolak balik dapat dirumuskan dengan:

$$v(t) = V_{(Peak)} \cdot \sin(\omega t) \tag{2.5}$$

$$i(t) = I_{(Peak)} \cdot \sin(\omega t) \tag{2.6}$$

$$p(t) = V_{(Peak)} I_{(Peak)} \cdot \sin^2 (\omega t) \tag{2.7}$$

V_{peak} adalah puncak tekanan listrik (volt), ω adalah frekuensi sudut (radians per detik). Frekuensi sudut bisa didapatkan dari

frekuensi biasa, f (hertz), yang direpresentasikan dengan putaran per detik, dengan menggunakan persamaan:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.8)$$

Pada grafik $\sin^2(\omega t)$ dapat dilihat bahwa nilai rata-rata sejumlah siklus adalah yang banyaknya bulat adalah $\frac{1}{2}$. Grafik tersebut tidak memiliki nilai negatif sama sekali sehingga persamaan daya adalah:

$$P = \frac{1}{2} \frac{Em^2}{R} = \left[\frac{Em}{\sqrt{2}} \right]^2 \frac{1}{R} \quad (2.9)$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai $\frac{Em}{\sqrt{2}}$ yang merupakan nilai rms (*root mean square*). Nilai rms yaitu nilai rata-rata yang diambil dari sejumlah siklus yang banyaknya bulat atau disebut dengan faktor perata, pada fungsi sinusoidal nilai rms adalah $\frac{1}{2}$ sehingga tegangan efektif dapat dirumuskan dengan:

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

Untuk gelombang segitiga:

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{3}} \quad (2.11)$$

Untuk gelombang kotak:

$$V_{rms} = V_{peak} \quad (2.12)$$

Hubungan antara tekanan dan daya listrik bolak balik dapat dirumuskan dengan:

$$p(t) = \frac{v^2(t)}{R} \quad (2.13)$$

(Cadena, 2010)

2.6 Kanomax Digital Dust Monitor 3443

Kanomax Digital Dust Monitor (Kanomax Inc., Model 3443) (**Gambar 2.7**) merupakan alat yang dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi debu atau partikulat secara akurat. Alat ini dapat mengukur konsentrasi dari partikulat seperti debu, uap dan asap.



Gambar 2.7 Kanomax Dust Monitor 3443

Alat ini dapat mengukur partikulat yang berukuran 0.1 hingga 10 μm . *Range* pengukuran dari Kanomax *Dust Monitor* 3443 berkisar antara 0.001-10.0 mg/m^3 dengan tingkat akurasi sekitar $\pm 10\%$ dari pembacaan. *Interface* yang digunakan untuk alat ukur ini yaitu USB sehingga dapat memudahkan untuk pengiriman data hasil pengukuran ke laptop maupun komputer. Kanomax *Dust Monitor* 3443 dapat bekerja menggunakan sumber tegangan berupa AC 100-240 V atau menggunakan 6 buah baterai ukuran AA. Keluaran dari alat ini dapat ditampilkan secara analog maupun digital.

Untuk penggunaan Kanomax *Dust Monitor* 3443 cukup mudah. Yaitu dengan menghubungkan selang berukuran 1/4 inch ke *port* yang sudah disediakan. Lalu tekan tombol Start maka alat ini akan langsung melakukan *sampling data* pengukuran sesuai dengan *time sampling* yang sudah diatur. Saat melakukan pengukuran, alat ini tidak boleh dipaparkan langsung ke sinar matahari karena dapat merusak alat ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2017 sampai dengan bulan Maret 2018 di Laboratory of Air Quality and Astro Imaging Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, serta di ruang pengukuran peneliti (Perumahan D'Cassablanca).

3.2 Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan di dalam penelitian ini adalah empat buah filter partikulat yang dikembangkan dengan variasi empat *gap* atau jarak antar plat elektroda (d) yang berbeda-beda (**Tabel 1**), aki sepeda motor, sambungan pipa PVC (76,22 mm ke 63,5 mm), Digital Dust Monitor (Kanomax, model 3443), pisau akrilik, osiloskop, dan multimeter digital.

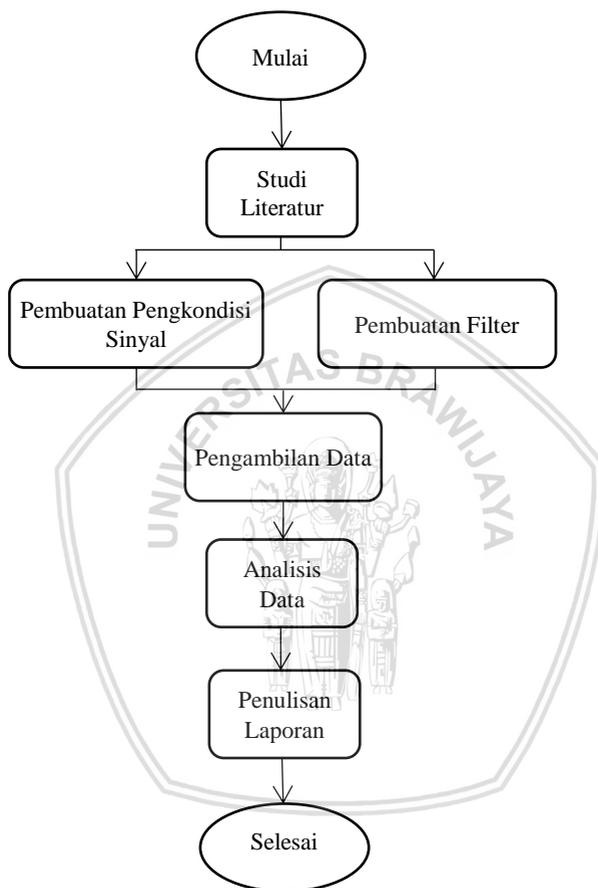
Tabel 1. Variasi filter yang digunakan

No.	Filter	Lebar <i>Gap</i> (mm)
1	Filter 1	36
2	Filter 2	18
3	Filter 3	12
4	Filter 4	9

Adapun bahan-bahan utama di dalam pembuatan filter yakni akrilik dengan ketebalan 3 mm, kertas karton tipe *duplex*, lem klorofom, lem besi, pipa PVC (76,2 mm), plat aluminium (ketebalan 0,21 mm), lakban, resistor, kapasitor, transistor, PCB lubang, timah, dan kabel secukupnya. Adapun sampel motor yang digunakan berjumlah tiga motor *automatic transmission* dengan spesifikasi kubikasi mesin yang berbeda-beda namun berasal dari pabrikasi yang sama. Ketiga sampel motor diberi kode M1, M2, dan M3.

3.3 Alur Penelitian

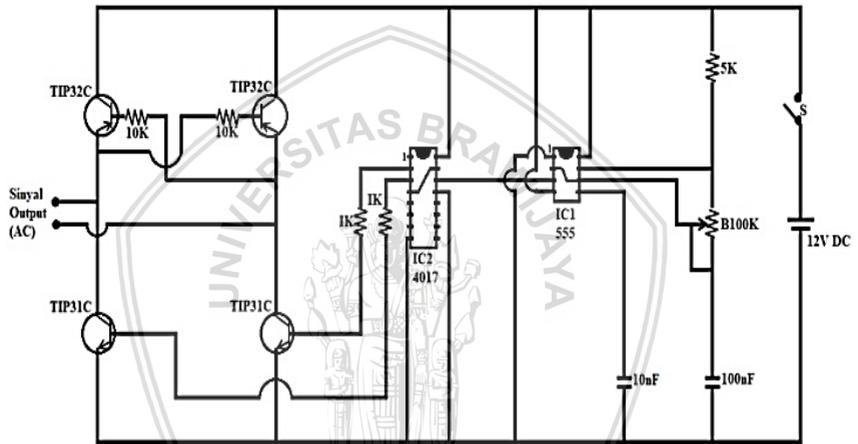
Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang dilakukan seperti pada **Gambar 3.1** berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

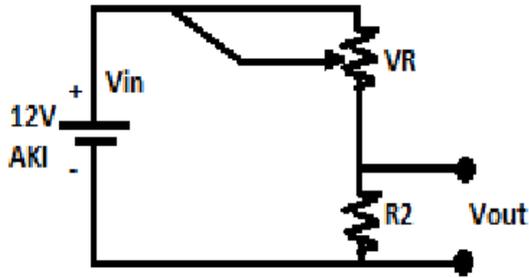
3.3.1 Pembuatan Pengkondisi Sinyal Tegangan

Untuk pembuatan rangkaian pengkondisi sinyal, tahapan ini menggunakan rangkaian inverter *H-bridge* seperti yang ditampilkan pada **Gambar 3.2**. Rangkaian ini dibuat menggunakan transistor TIP31C dan TIP32C yang saling berkebalikan, IC 4017 dan NE555, dengan dua buah kapasitor 10nF dan 100nF untuk menghasilkan clock tertentu yang saling berlawanan dan membangkitkan frekuensi. Selain itu, digunakan resistor 1k Ω , 10k Ω , dan 5k Ω , serta resistor variabel 100k Ω . Resistor variabel (potensiometer) digunakan untuk mengatur besar frekuensi sesuai yang diinginkan.



Gambar 3.2 Rangkaian inverter

Selanjutnya, sinyal *output* dari rangkaian pengkondisi sinyal pertama ini dimasukkan ke dalam rangkaian kedua yang merupakan rangkaian pembagi tegangan sederhana (**Gambar 3.3**). Rangkaian ini memiliki dua buah resistor variabel 10k Ω . Resistor variabel digunakan untuk mengatur besar frekuensi dan tegangan sesuai yang diinginkan. Rangkaian ini menghasilkan *output* tegangan 12 Volt AC dengan lebar frekuensi f_1 (60Hz), f_2 (684Hz), dan f_3 (1309Hz). *Output* ini dihubungkan ke filter menggunakan *probe filter*.

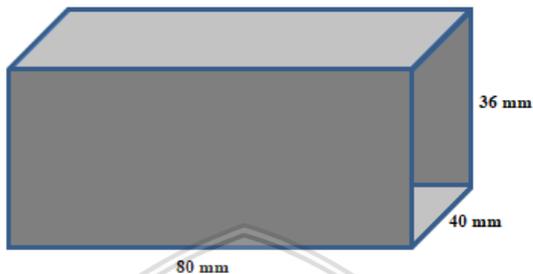


Gambar 3.3 Rangkaian pembagi tegangan dengan menggunakan resistor variabel (Wardoyo dkk., 2017)

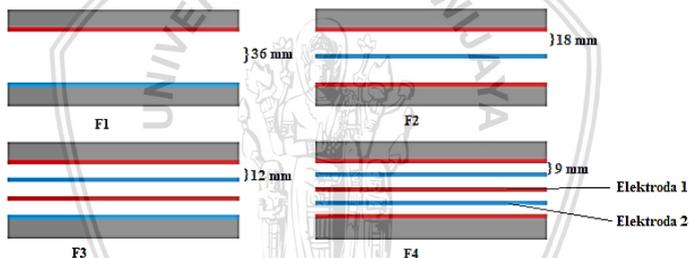
3.3.2 Pembuatan Filter

Tahap pertama yang dilakukan yakni menyiapkan *main frame* dari filter. *Main frame* tersebut terbuat dari pipa PVC berdiameter 63,5 mm yang kemudian dipotong dengan panjang 80 mm. Dimensi *main frame* ini dibuat mengacu pada penelitian sebelumnya yang telah dilaksanakan (Budianto & Wardoyo, 2016). Karena filter yang digunakan di dalam penelitian ini berjumlah 12 buah (empat variasi filter untuk masing-masing sampel motor), maka *main frame* dibuat sebanyak 12 buah pula. Selanjutnya, lembaran aluminium dipotong dengan dimensi panjang 80 mm dan lebar 40 mm sejumlah 42 buah plat yang nantinya digunakan sebagai elektroda dari filter partikulat. Elektroda inilah yang nantinya disambungkan ke sinyal *output* dari pengkondisi sinyal. Plat tersebut dipasang pada balok akrilik (**Gambar 3.4**) dengan bantuan perekat (lem besi) dengan ketentuan menyesuaikan dengan variasi filter tujuan (empat variasi). Filter 1 (F1) memiliki 2 buah plat, di mana plat pertama digunakan sebagai elektroda 1, plat sisanya sebagai elektroda 2. F1 memiliki jarak antar plat sebesar 36 mm. Filter 2 (F2) memiliki 3 buah plat, di mana plat pertama dan plat ketiga digunakan sebagai elektroda 1, plat sisanya yakni elektroda 2. F2 memiliki jarak antar plat sebesar 18 mm. Filter 3 (F3) memiliki 4 buah plat, di mana plat pertama dan plat ketiga digunakan sebagai elektroda 1, plat sisanya yakni elektroda 2. F3 memiliki jarak antar plat sebesar 12 mm. Sedangkan untuk variasi terakhir, F4, memiliki jarak antar plat sebesar seperempat dari F1, dengan total 5 buah plat aluminium. Plat pertama, ketiga, dan kelima

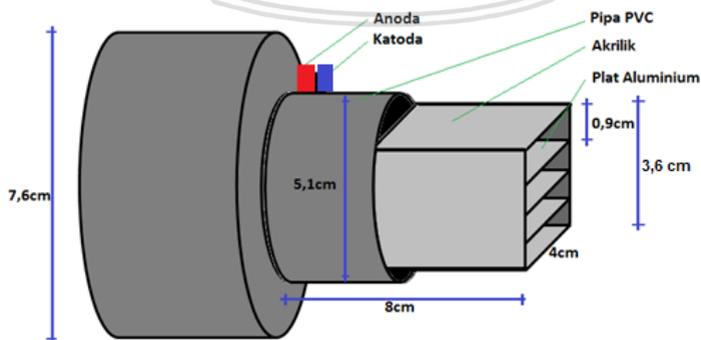
digunakan sebagai elektroda 1, dan sisanya sebagai elektroda 2 (Gambar 3.5). Filter tersebut kemudian digabung menjadi satu ke dalam *main frame* filter (Gambar 3.6) dan dihubungkan dengan pengkondisi sinyal.



Gambar 3.4 Blok akrilik



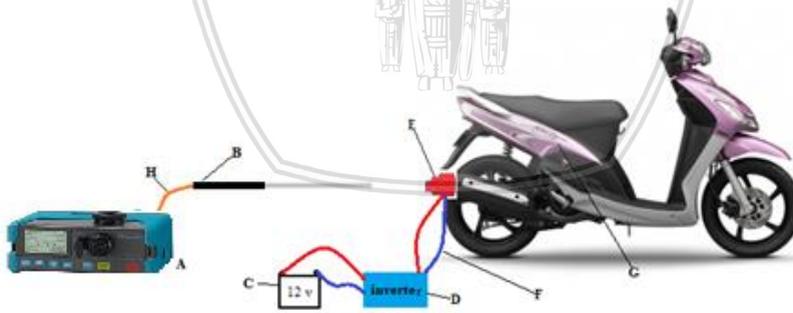
Gambar 3.5 Variasi *gap* filter yang dibuat



Gambar 3.6 Desain akhir filter (Wardoyo dkk., 2017)

3.3.3 Pengambilan Data

Filter yang telah siap kemudian dipasang di seluruh knalpot sampel sepeda motor. Temperatur udara *ambient* (T_a) dan temperatur kontrol atau temperatur mula-mula knalpot sepeda motor (T_k) dicatat terlebih dahulu sebagai kontrol dalam pengujian. Sumber tegangan aki disambungkan pada pengkondisi sinyal tegangan dan diatur tegangan pada angka 12 Volt. *Probe* alat ukur konsentrasi $PM_{2.5}$ diletakkan sejauh 400 mm di depan filter yang telah dipasang (Valentino dkk., 2013). Pengatur frekuensi diatur pada besar 60Hz. Selanjutnya, sepeda motor dinyalakan (kondisi *idling, cold start*) dan ditunggu hingga menit pertama. Saat menit pertama, diukur data konsentrasi $PM_{2.5}$ (C_t) dan temperatur emisi (T_e). Pengukuran dilakukan sebanyak tujuh kali. Selanjutnya, ditunggu hingga menit kedua. Saat menit kedua, dilakukan pengukuran yang sama. Hal ini dilakukan hingga menit kelima, dengan selang interval tiap satu menit. Pengukuran lainnya dilakukan setelah knalpot dingin sesuai dengan T_k . Pengukuran berikutnya dilakukan dengan metode yang sama, namun dengan mengganti besar frekuensi menjadi 684Hz dan 1309Hz. Sebagai pembanding, perlakuan ini juga diterapkan pada emisi knalpot tanpa menggunakan filter (C_0). Secara terinci, pengambilan data dapat ditunjukkan dengan **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Skema pengambilan data (A=Digital Dust Monitor; B=Probe; C=Aki (12Volt); D=Pengkondisi sinyal tegangan; E=Filter; F=Kabel; G=Sepeda Motor; dan H=Selang)

3.3.4 Analisis Data

Pada tahap analisis data, data yang sudah didapat akan diolah agar dapat didapatkan hasil dari penelitian. Pertama-tama data yang didapat pada masing-masing kelompok yaitu kelompok menit ke-1, kelompok menit ke-2, kelompok menit ke-3, kelompok menit ke-4, dan kelompok menit ke-5 diambil tujuh kali pengulangan data dan dihitung nilai *mean* atau rata-rata (\bar{X}) beserta standar deviasinya (δ). Untuk perhitungan konsentrasi rata-rata sebelum dipasang filter yaitu:

$$\bar{C}_i = \frac{\sum_{k=1}^n (C_i)}{n} \quad (3.1)$$

di mana standar deviasi (δC_i) nya adalah :

$$\delta C_i = \sqrt{\frac{\sum |C_{ik} - \bar{C}_i|^2}{n(n-1)}} \quad (3.2)$$

Hasil dari persamaan (3.1) dan (3.2) dinyatakan sebagai nilai rata rata beserta standar deviasinya. Selanjutnya, dilakukan perhitungan untuk (C_o) dengan persamaan (3.3) dan (3.4) :

$$\bar{C}_o = \frac{\sum_{k=1}^n (C_o)}{n} \quad (3.3)$$

$$\delta C_o = \sqrt{\frac{\sum |C_{ok} - \bar{C}_o|^2}{n(n-1)}} \quad (3.4)$$

Besar efisiensi $PM_{2.5}$ dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$E_f = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\% \quad (3.5)$$

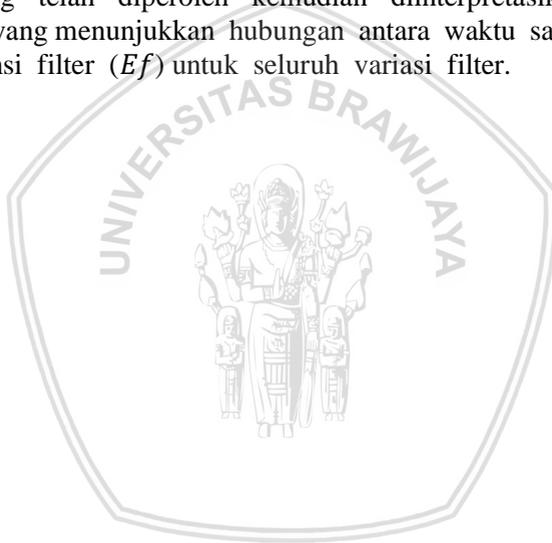
Adapun standar deviasi efisiensi dihitung menggunakan teori ralat berbobot:

$$\delta Ef = \sqrt{\left(\frac{\delta E}{\delta C_o} \cdot \delta C_o\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{\delta C_i} \cdot \delta C_i\right)^2} \quad (3.6)$$

$$\delta Ef = \sqrt{\left[\frac{\delta}{\delta C_o} \cdot \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right)\right]^2 + \left[\frac{\delta}{\delta C_i} \cdot \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right)\right]^2} \quad (3.7)$$

$$\delta Ef = \sqrt{\left(\frac{1}{\delta C_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_o}{\delta C_i}\right)^2} \quad (3.8)$$

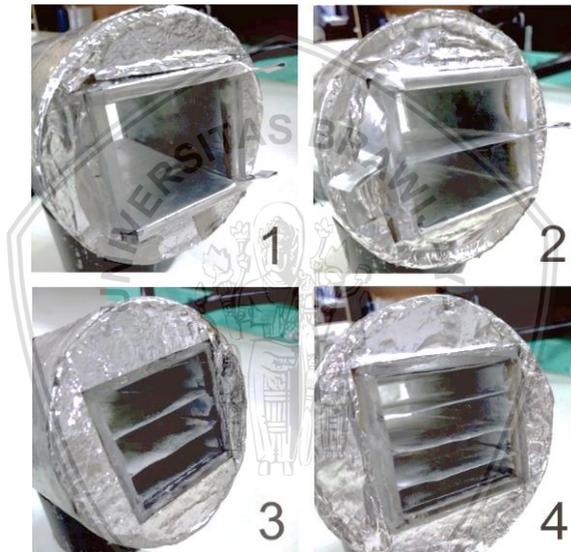
Data-data yang telah diperoleh kemudian diinterpretasikan ke dalam grafik yang menunjukkan hubungan antara waktu sampling (t) dan efisiensi filter (Ef) untuk seluruh variasi filter.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Desain Filter

Dari hasil penelitian ini didapatkan empat variasi filter partikulat $PM_{2.5}$. Filter yang dibuat berprinsip elektrostatis, dengan sistem multi kapasitor. Sistem multi kapasitor dimaksudkan sebagai filter dengan variasi kombinasi jumlah set plat sejajar yang digunakan dan perubahan lebar *gap* yang dihasilkan, dengan total lebar *gap* yang konstan, yakni 36 mm (**Gambar 4.1 dan Tabel 2**).



Gambar 4.1. Filter yang dihasilkan

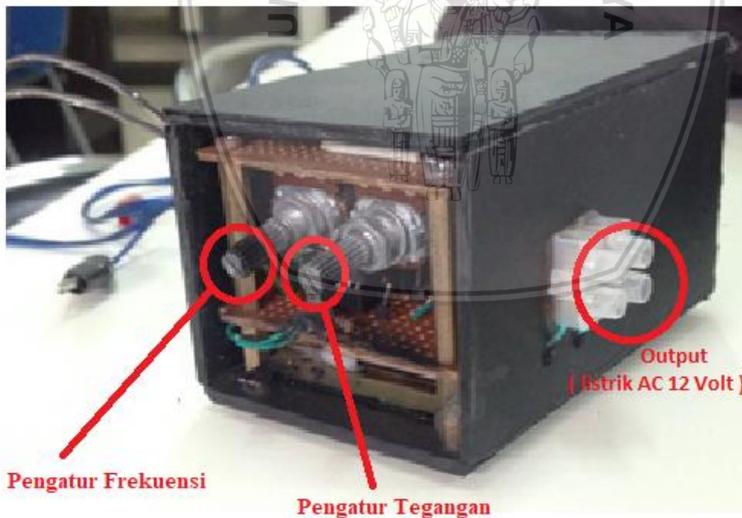
Filter memiliki bentuk balok, yang ditengah-tengahnya terdapat aluminium berjajar. Aluminium tersebut berjajar dan membentang membentuk horisontal pada akrilik. diketahui bahwa 1). Filter 1 dengan satu set plat sejajar; 2). Filter 2 dengan dua set plat sejajar; 3). Filter 3 dengan tiga set plat sejajar; dan 4). Filter 4 dengan 4 set plat sejajar. Karena lebar maksimal pada *chase* filter ditetapkan konstan sebesar 36 mm, maka dihasilkan lebar *gap* filter yang berbeda-beda (**Tabel 2**). Filter yang dibuat relatif kokoh dan kuat saat diuji coba dalam set pengambilan data. Filter juga tidak terlepas dari *chasenya*.

Sistem bongkar pasang filter dapat dilakukan dengan relatif dan cukup mudah

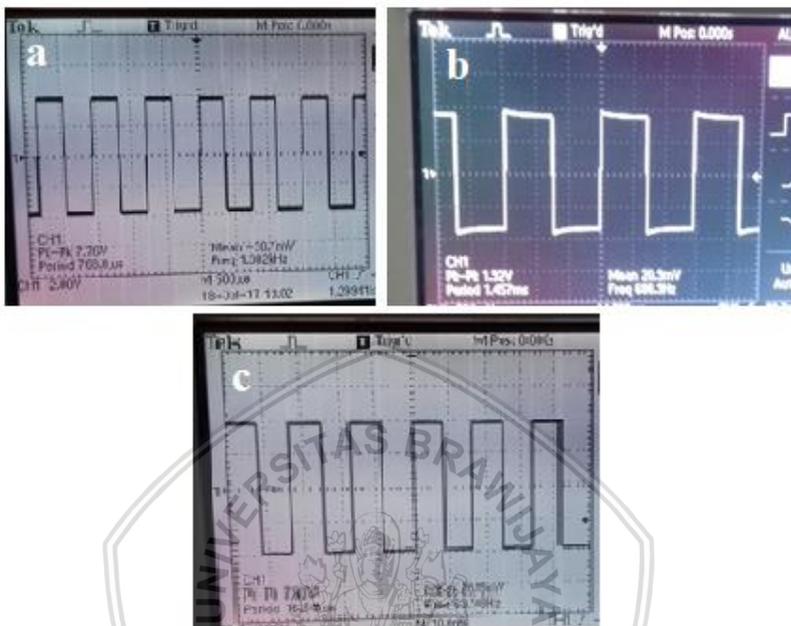
Tabel 2. Empat variasi filter yang dihasilkan

No.	Filter	Lebar <i>Gap</i> (mm)
1	Filter 1	36
2	Filter 2	18
3	Filter 3	12
4	Filter 4	9

Penelitian yang telah dilakukan juga menghasilkan Inverter dengan menggunakan sumber tegangan DC 12V dan output Inverter AC 12V yang menghasilkan gelombang kotak dengan rentang frekuensi yang dapat di *adjust* yaitu 60 hingga 1300Hz **Gambar4.2.**



Gambar 4.2. Inverter yang dibuat

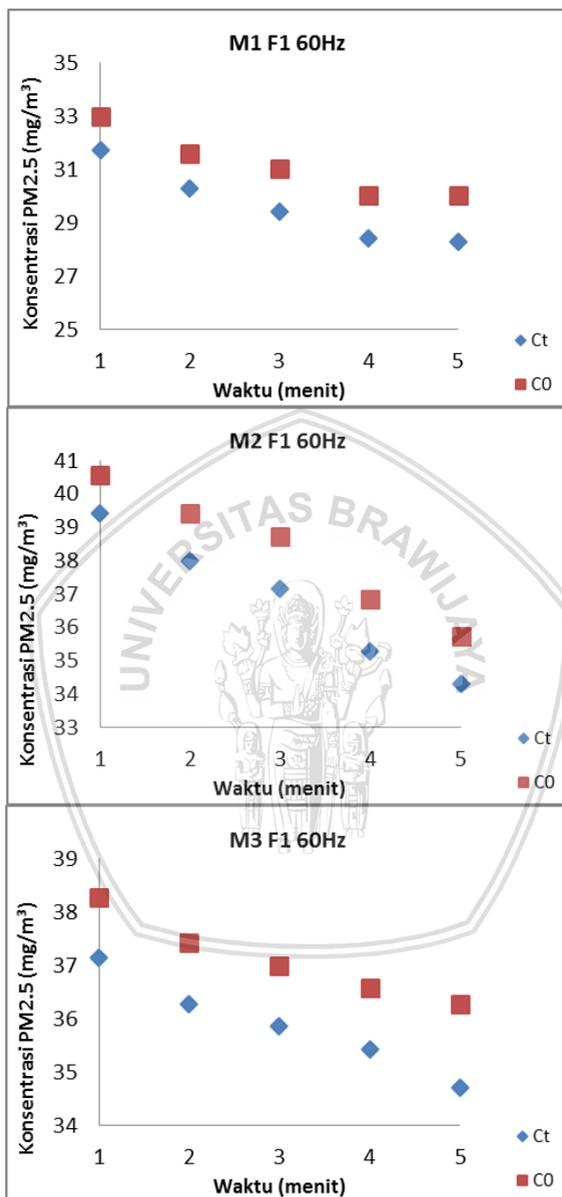


Gambar 4.3 Frekuensi yang dihasilkan inverter (a.Frekuensi 1300 Hz; b.Frekuensi 684Hz; c. Frekuensi 60Hz)

4.2 Hasil Pengujian Konsentrasi PM_{2.5}

4.2.1 Frekuensi 60Hz

Untuk mengetahui seberapa besar konsistensi konsentrasi PM_{2.5} pada filter F1 sampai dengan F4 dengan frekuensi awal (60Hz) dapat diketahui dengan cara melakukan pengukuran konsentrasi sebelum dan sesudah diberi filter untuk keseluruhan sampel sepeda motor (M1-M3). Contoh data konsentrasi PM_{2.5} pada F1 disajikan dalam **Gambar 4.4** berikut (data lengkap terlampir).



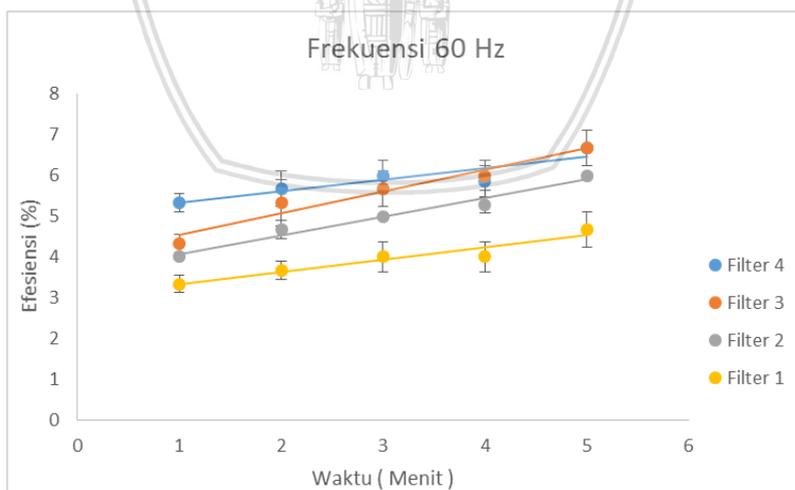
Gambar 4.4. Hasil pengukuran konsentrasi PM_{2.5} pada sampel F1 (60Hz) untuk seluruh sampel sepeda motor

Dari data yang tersaji pada **Gambar 4.4** di atas, diketahui bahwa konsentrasi cenderung turun untuk menit tengah hingga menit akhir. Pada keseluruhan sampel motor, F1 terbukti memberikan hasil pengukuran konsentrasi $PM_{2.5}$ yang konsisten. Konsentrasi terbesar dengan filter diperoleh pada menit pertama M2 (39 mg/m^3). Konsentrasi terkecil dengan filter diperoleh pada menit kelima M1 (28 mg/m^3). Konsentrasi terbesar tanpa filter diperoleh pada menit pertama M2 (41 mg/m^3). Konsentrasi terkecil tanpa filter diperoleh pada menit kelima M1 (30 mg/m^3). Hasil ini membuktikan bahwa filter 1 (F1) bersifat konsisten dalam memfilter $PM_{2.5}$. Hasil tersebut juga sama untuk keseluruhan filter, baik F2, F3, maupun F4 dan untuk keseluruhan frekuensi yang didapatkan (data terlampir).

4.3 Hasil Pengujian Efisiensi $PM_{2.5}$

4.3.1 Frekuensi 60Hz

Untuk mengetahui seberapa besar efisiensi filter F1 sampai dengan F4 untuk M1-M3 pada frekuensi 60Hz, maka dilakukan pengujian efisiensi dengan membandingkan data konsentrasi $PM_{2.5}$ sebelum dan sesudah pengaplikasian filter tersebut. Data efisiensi menggunakan ketiga sampel motor (pada frekuensi 60Hz) disajikan dalam **Gambar 4.5** berikut.

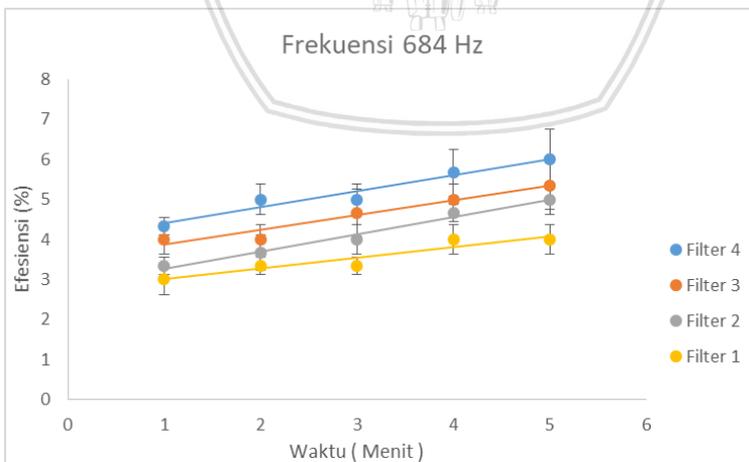


Gambar 4.5. Hasil uji efisiensi menggunakan frekuensi 60Hz

Dari data yang tersaji pada **Gambar 4.5** di atas, didapatkan *trend* atau kecenderungan perilaku efisiensi meningkat seiring dengan berkurangnya *gap* yang digunakan. *Gap* terkecil, yakni F4, menghasilkan efisiensi terbesar (pada menit kelima) berturut turut 6%, 6%, dan 8% untuk M1, M2, dan M3. Efisiensi terkecil (untuk menit kelima), sesuai dengan hipotesis, diperoleh saat menggunakan *gap* terbesar, F1, dengan tingkat efisiensi hanya sebesar 6%, 4%, dan 4% untuk M1, M2, dan M3. Efisiensi juga tetap meningkat seiring dengan bertambahnya waktu, di mana efisiensi pada menit pertama jauh lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi pada menit terakhir pengujian, yakni menit kelima. Namun, sedikit anomali didapatkan pada M1 untuk F4, di mana F4 menghasilkan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan F2 pada menit keempat. Jika dilihat dari konsentrasi sebelum dan sesudah diberi F4 pada menit keempat untuk M1, terbukti bahwa terdapat sedikit selisih rasio konsentrasi (0,22%).

4.3.2 Frekuensi 684Hz

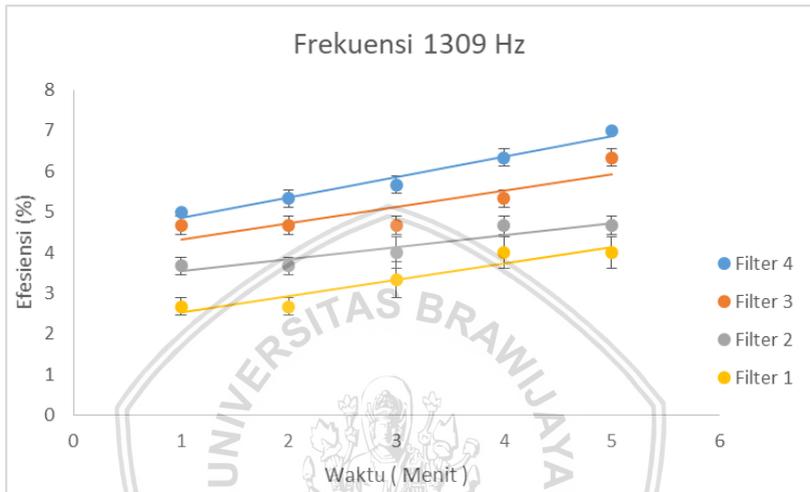
Data efisiensi menggunakan ketiga sampel motor (pada frekuensi 684Hz) disajikan dalam **Gambar 4.6** berikut. Dari data yang tersaji pada **Gambar 4.6** tersebut didapatkan *trend* atau kecenderungan perilaku efisiensi yang sama dengan frekuensi 60Hz, di mana efisiensi meningkat seiring dengan berkurangnya *gap* yang digunakan. Efisiensi juga tetap meningkat seiring dengan bertambahnya waktu.



Gambar 4.6. Hasil uji efisiensi menggunakan frekuensi 684Hz

4.3.3 Frekuensi 1309Hz

Pada frekuensi tertinggi (1309Hz), dilakukan pula pengukuran efisiensi F1-F4 dengan metode yang sama untuk keseluruhan sampel sepeda motor. Data efisiensi menggunakan ketiga sampel motor (pada frekuensi 1309Hz) disajikan dalam **Gambar 4.7** berikut.



Gambar 4.7. Hasil uji efisiensi menggunakan frekuensi 1309Hz

Dari data yang tersaji pada **Gambar 4.7** di atas, didapatkan kecenderungan perilaku yang sama dengan hasil yang diperoleh pada frekuensi 60Hz dan 684Hz. Filter 1 menghasilkan efisiensi sebesar 4, 3, dan 5% berturut-turut untuk M1, M2, dan M3. Filter 4, dengan nilai gap terkecil, memiliki rata-rata efisiensi tertinggi 7% untuk M1, M2, dan M3. Dari keseluruhan hasil pengujian, didapatkan bahwa F1 memiliki efisiensi rata-rata terendah, sedangkan F4 memiliki efisiensi tertinggi (**Gambar 4.8-4.9**). Frekuensi terbaik yang dapat menghasilkan efisiensi tertinggi yakni pada frekuensi 60Hz. Terdapat asumsi bahwa semakin lama waktu pengukuran, maka didapatkan efisiensi yang semakin meningkat. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi ini akan dibahas lebih lanjut pada sub bab berikutnya.

4.4 Pembahasan

Analisis data yang dilakukan menunjukkan bahwa efisiensi filter memiliki rentang nilai yang berbeda-beda. Filter 1, dengan lebar

gap terbesar memiliki efisiensi teringgi (4%–5%). Sebaliknya, Filter 4 yang memiliki *d* terkecil justru memiliki efisiensi terbesar (6% – 7%). Nilai efisiensi tersebut memiliki standar deviasi dengan nilai tertentu (**Tabel 3**).

Tabel 3. Efisiensi rata rata filter

Filter 1 (%)			
Motor	60 Hz	684 Hz	1309 Hz
1	6	4	4
2	4	5	3
3	4	3	5
rata-rata	5	4	4
deviasi	1	1	1
Filter 2 (%)			
Motor	60 Hz	684 Hz	1309 Hz
1	6	5	5
2	6	6	4
3	6	4	5
rata-rata	6	5	5
deviasi	0	1	0
Filter 3 (%)			
Motor	60 Hz	684 Hz	1309 Hz
1	6	5	6
2	6	7	6
3	8	4	7
rata-rata	7	5	6
deviasi	1	1	0
Filter 4 (%)			
Motor	60 Hz	684 Hz	1309 Hz
1	6	6	7
2	6	8	7
3	8	4	7
rata-rata	7	6	7
deviasi	1	1	0

Besar kecilnya efisiensi filter yang diperoleh terbukti dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti lebar *gap* (*d*) yang digunakan, besar kecilnya frekuensi (*f*), dan beberapa faktor lainnya. Berdasarkan **Tabel 3**, diketahui bahwa nilai efisiensi dipengaruhi oleh besar kecilnya *gap* yang digunakan. Filter 1 hingga Filter 4 memiliki perbedaan *gap* yang bervariasi, sehingga memiliki rentang efisiensi yang bervariasi. Di dalam elektrostatis, dikenal istilah gaya

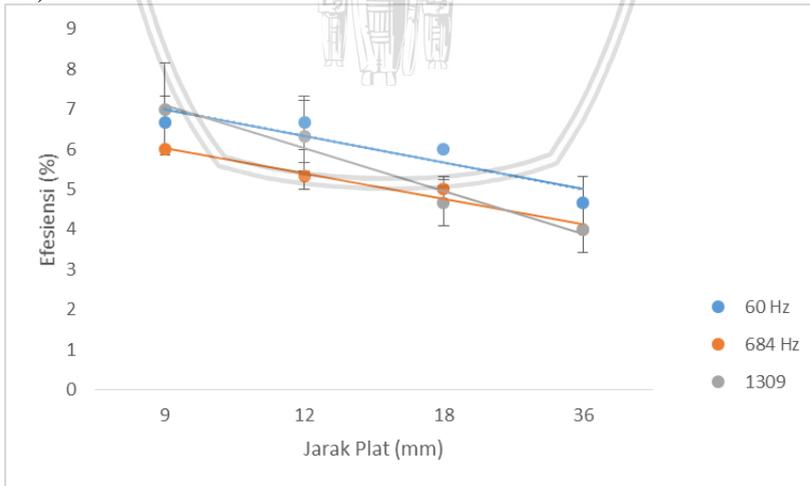


elektrostatik (F) yang besarnya sebanding dengan kenaikan medan listrik (E) (4.1). Nilai dari E tersebut juga dapat dipengaruhi oleh besar tegangan (V) yang digunakan (4.2). Namun, akibat nilai dari V yang konstan (12 Volt), maka besar E tidak lagi dipengaruhi oleh V . Secara matematis:

$$\sum F = q \cdot E \tag{4.1}$$

$$\sum F = q \cdot \frac{V}{d} \tag{4.2}$$

Dengan memisalkan sebuah $PM_{2.5}$ memiliki muatan sebesar q (dalam Coulomb), maka persamaan tersebut membuktikan bahwa besar dari gaya F semata bergantung dari d . Maka, semakin besar d akan mengakibatkan F semakin kecil. Menurut hasil pengembangan filter yang dilakukan oleh Budianto & Wardoyo (2016), besar gaya F merupakan gaya elektrostatik yang dapat menarik partikel hingga menempel ke permukaan plat filter. Maka, semakin besar F akan menyebabkan semakin banyak partikel yang menempel di permukaan plat sehingga efisiensi filter semakin meningkat. Analisis yang lebih mudah dapat dilakukan dengan menginterpretasikan data pada **Tabel 3** tersebut ke dalam grafik hubungan antara d dengan Ef (**Gambar 4.8**).

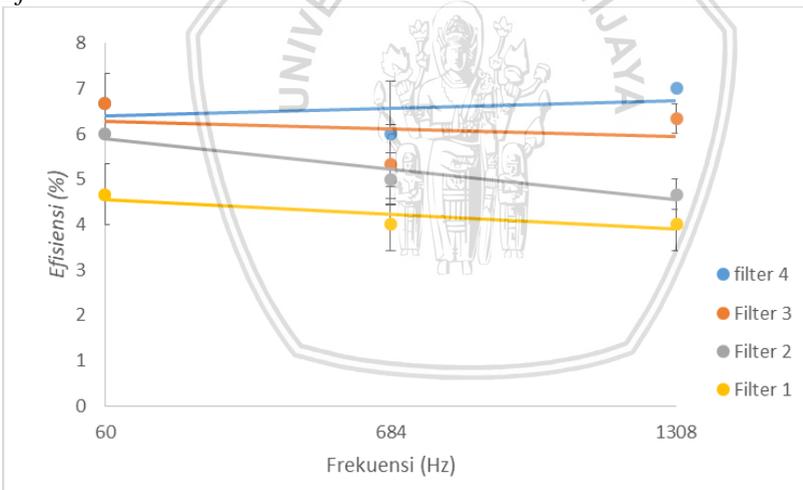


Gambar 4.8 Hubungan antara d dengan Ef



Gambar 4.8 menunjukkan bahwa perubahan d secara signifikan mengakibatkan perubahan terhadap Ef . Keduanya memiliki hubungan linearitas positif ekstrim dengan nilai koefisien determinasi mendekati 1. Secara berturut-turut, nilai R^2 untuk frekuensi 1, frekuensi 2, dan frekuensi 3 adalah 0,83; 0,96; dan 0,97. Nilai ini secara mutlak berada di atas 0,80, sehingga dapat dibuktikan bahwa d mempengaruhi nilai Ef dengan pola atau trendline linear (Eeftens dkk., 2015).

Di sisi lain, listrik AC yang digunakan tidaklah menghasilkan sebuah polaritas yang konstan dengan satu jenis polaritas (hanya polaritas + atau hanya polaritas -), namun juga polaritas ganda yang di dalam sebuah periode T akan terjadi sekian kali perubahan polaritas. Sebagai contoh, dalam waktu t_1 , plat memiliki polaritas +. Dalam waktu t_2 , polaritasnya akan berganti (-). Hal inilah yang pada akhirnya juga dapat mempengaruhi sifat dari gaya elektrostatis plat filter. **Gambar 4.9** menunjukkan hubungan antara frekuensi f terhadap nilai Ef .

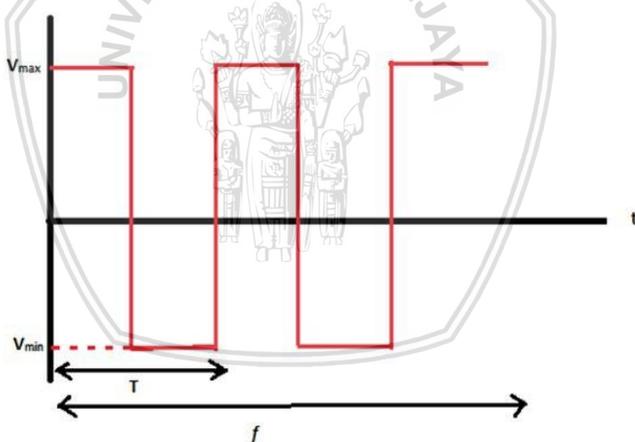


Gambar 4.9 Hubungan antara f dengan Ef

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa terdapat pengaruh antara f dengan Ef . Aproksimasi tersebut mempunyai tingkat relasi sebesar 0,7496; 0,9228; 0,0575; dan 0,1074 (r^{-1}). Semakin rendah nilai frekuensi f maka semakin meningkat Ef filter dengan koefisien determinasi sebesar 0,865; 0,960; 0,239; dan 0,327 berturut-turut untuk variasi

filter F1, F2, F3 dan F4. Di sisi lain terdapat anomali pada frekuensi 60 Hz dan 684Hz. Mengacu pada data penelitian yang didapatkan diketahui bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ pada filter 4 untuk beberapa motor mengalami kenaikan pada menit ke 5 ($51 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$ pada 60 hz dan $22 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$ pada 684 hz). Anomali ini dapat disebabkan oleh beberapa hal seperti voltage drop yang terjadi pada alat pada saat menit ke 5 untuk motor 3 dimana terjadi lonjakan konsentrasi akibat tegangan berkurang akibat *voltage drop*. *Voltage drop* ini diakibatkan karena disipasi panas alat yang mengganggu kinerja IC 555 dan rangkaian transistor h bridge. Akibat tidak adanya *heatsink* dan kipas pendingin, maka kinerja dari IC dan transistor sangat bergantung pada kondisi temperatur.

Di dalam fisika, fungsi f ini berkaitan secara langsung dengan siklus polaritas dari plat sejajar yang digunakan, di mana adanya perbedaan f akan mempengaruhi polaritas plat filter. Di dalam gelombang listrik AC, besaran tegangan (V) berhubungan dengan frekuensi (f). Berdasarkan (**Gambar 4.10**) berikut, diketahui :



Gambar 4.10 Gelombang listrik AC

Besar tegangan V menurut (**Gambar 4.10**) memiliki fungsi gelombang $Vt = V \max. \sin(\omega t)$, di mana $\omega = 2 \pi f$. Sehingga :

$$Vt = V \max . \sin(\omega t) \tag{4.3}$$



$$Vt = V \max. \sin (2 \pi f t) \tag{4.4}$$

Dan menurut persamaan elektrostatis :

$$V = Vt = E . d \tag{4.5}$$

$$Et = \frac{Vt}{d} \tag{4.6}$$

$$Et = \frac{V \max. \sin(2 \pi f t)}{d} \tag{4.7}$$

Berdasarkan persamaan (4.7), diketahui bahwa $Et \approx \sin (2 \pi f t)$, dengan nilai maksimum sinus adalah 1 yang terjadi pada $2 \pi f t = 90$. Dari sini, Et sebanding dengan $\frac{1}{d}$ dan nilai $\sin (2 \pi f t)$.

Secara tidak langsung, adanya polaritas ini akan mempengaruhi Ef filter. Untuk mengetahui sejauh mana peranan f dalam besar kecilnya Ef , maka dapat dilakukan analisis besar T dengan:

$$f = \frac{1}{T} \tag{4.8}$$

Semakin besar nilai f mengakibatkan semakin kecil nilai T . Frekuensi 60Hz memiliki periode T sebesar x sekon. Ini berarti di dalam satu siklus gelombang membutuhkan waktu selama 0,02 sekon. Namun, secara mekanika fluida, gerakan partikel tersebut sudah pasti akan dipengaruhi oleh *flowrate* v . Menurut Hukum II Newton:

$$\Sigma F = \Sigma m . a \tag{4.9}$$

Dan di dalam prinsip elektrostatis berlaku $F = q . E$. Maka, besar gaya elektrostatis akan sama dengan massa partikel m dikalikan dengan percepatan gerak partikel tersebut (a). Akibat adanya gaya elektrostatis yang diberikan oleh plat filter terhadap partikel PM_{2,5}, maka gerak lurus beraturan yang seharusnya bergerak lurus akan membelok mengikuti lintasan gerak peluru (**Gambar 4.11**). Di dalam gerak peluru, dimisalkan partikel berada pada posisi terendah dan



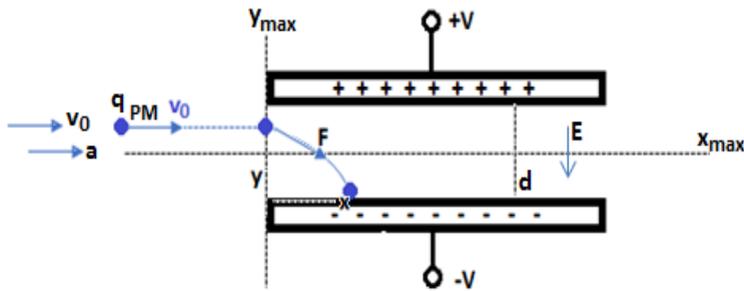
menempel pada plat sehingga partikel berada di titik tertinggi (y). Karena di dalam komponen sumbu vertikal yang berlaku adalah gerak lurus berubah beraturan, maka terdapat percepatan a_y . Pada komponen sumbu horizontal, nilai dari percepatan (a_x) adalah 0 karena partikel bergerak dengan gerak lurus beraturan. Persamaan (4.5) menunjukkan bahwa:

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{q \cdot E}{m} \quad (4.10)$$

Untuk menempuh titik tertinggi gerak partikel, maka partikel akan menempuh setengah dari jarak terjauh (x).

$$x = v_{0x} \cdot t = v_0 \cdot t \quad (4.11)$$

Sesuai dengan uraian sebelumnya, Frekuensi 60Hz memiliki periode T sebesar x sekon. Ini berarti di dalam satu siklus gelombang membutuhkan waktu selama 0,02 sekon. Dengan mengetahui bahwa panjang plat filter (l) sebesar 8×10^{-2} m, maka untuk menempuh sejauh l akan membutuhkan waktu normal selama 44 sekon. Karena percobaan membutuhkan waktu selama 300s, maka tidak seluruh partikel terdeteksi oleh alat. Pengaruh *flowrate* v dimungkinkan dapat mengakibatkan partikel dapat lolos dan terdeteksi (\bar{v} terbesar sebesar 1.09 ms^{-1} diukur dengan anemomaster). Dengan adanya pengaruh variasi frekuensi, maka waktu tempuh normal akan berbeda, di mana semakin besar frekuensi semakin besar pula waktu tempuh normalnya (berturut-turut untuk frekuensi 60Hz, 684Hz, dan 1309Hz memiliki waktu tempuh normal 44, 3.1 dan 1.3 sekon). Semakin lama waktu tempuh normal ini membuktikan lebih tinggi efisiensi filter karena partikel akan semakin lama berada di dalam ruang filter (bergerak naik turun sesuai polaritas).



Gambar 4.11 Gerak partikel akibat adanya gaya elektrostatis di dalam filter (Wardoyo dkk.,2017

Untuk mempermudah analisis, dapat dimisalkan massa (m) $PM_{2.5}$ identik dengan 5.95×10^9 kali massa proton (dengan $+q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$) dan jari jari $PM_{2.5}$ (r) adalah $5 \times 10^{-6} \text{ m}$, maka akan didapatkan titik terjauh x sebesar 1.805×10^{-5} . Ini berarti dalam satu siklus partikel membutuhkan jarak tempuh sebesar dua kali jarak ter jauh partikel menempel di plat (x) yaitu sebesar $2.36 \times 10^{-2} \text{ m}$. Nilai tersebut konstan untuk seluruh variasi frekuensi karena frekuensi tidak mempengaruhi nilai x . Hal ini sekali lagi membuktikan bahwa dengan perubahan frekuensi tidak akan mempengaruhi x , namun akan secara langsung mempengaruhi waktu tempuh partikel keluar dari ruang filter.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini juga sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan filter partikulat metode porositas, seperti DPF (*Diesel Particulate Filter*) yang diterapkan di sepeda motor. Dengan pengujian menggunakan PM jenis yang sama, yakni $PM_{2.5}$, filter DPF berbahan sabut kelapa ini menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 36%-47% (Wahyuningrum dkk., 2014). Untuk filter lainnya, filter lembaran tipis yang berasal dari biomassa yang dikembangkan oleh Pawestri dkk. (2014) terbukti mampu memfilter $PM_{2.5}$ dengan tingkat efisiensi 16% hingga 47%. Namun hasil penelitian menggunakan PM berdiameter lebih besar ini tidak dapat dibandingkan secara langsung mengingat ukuran PM yang diuji berbeda, di mana tiap-tiap jenis PM memiliki karakteristik tertentu yang berbeda-beda pula.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada penelitian ini telah berhasil dikembangkan sebuah filter partikulat berbasis multi kapasitor bertegangan rendah 12 Volt DC menjadi 12 Volt AC yang dapat mengurangi konsentrasi $PM_{2.5}$ pada emisi sepeda motor.
2. Konsentrasi $PM_{2.5}$ cenderung turun untuk konsentrasi $PM_{2.5}$ terbesar dengan filter diperoleh pada menit pertama M2 (39 mg/m^3) dan konsentrasi $PM_{2.5}$ terbesar tanpa filter diperoleh pada menit pertama M2 (41 mg/m^3)
3. Faktor yang mempengaruhi efisiensi filter partikulat $PM_{2.5}$ berbasis multi kapasitor adalah jarak antar plat dan frekuensi yang digunakan.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Pemilihan jenis logam perlu divariasikan pada plat filter yang lain misalnya tembaga, galvalum, dan *stainless steel*.
2. Perlu digunakan frekuensi yang lebih kecil dari 60Hz dan lebih besar dari 1309Hz untuk lebih mengetahui karakteristik filter tersebut.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

