

**DESAIN FILTER PM_{2,5} BERBASIS *REHEATING SYSTEM*
UNTUK SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR**

SKRIPSI

oleh :

M. ZUBDATUL FIKRI ASSUFI

125090807111006



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2019**



**DESAIN FILTER PM_{2,5} BERBASIS *REHEATING SYSTEM*
UNTUK SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

oleh :

M. ZUBDATUL FIKRI ASSUFI
125090807111006



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2019



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**DESAIN FILTER PM_{2,5} BERBASIS REHEATING SYSTEM
UNTUK SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR**

oleh :

**M. ZUBDATUL FIKRI ASSUFI
125090807111006**

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal **03 JAN 2019**
dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Sains dalam bidang fisika

Dosen Pembimbing I

Drs. Arifto Y. P. W., M.Sc., Ph.D
NIP. 196407021989031001

Dosen Pembimbing II

Dr. rer.nat. Abdurrouf, S.Si. M.Si.
NIP.197209031994121001



**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya**

Prof. Dr. rer.nat. Muhammad Nurhuda
NIP.196409101990021001



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : M. ZUBDATUL FIKRI ASSUFI
NIM : 125090807111006
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi berjudul :

**DESAIN FILTER PM_{2,5} BERBASIS REHEATING SYSTEM
UNTUK SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Skripsi ini.
2. Apabila dikemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya bersedia menanggung segala risiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang,
Yang menyatakan

M. Zubdatul Fikri Assufi
125090807111006



Desain Filter PM_{2,5} Berbasis *Reheating System* Untuk Sistem Pembuangan Emisi Sepeda Motor

ABSTRAK

Populasi kendaraan bermotor di dunia dari tahun ke tahun terus meningkat dan berbanding lurus dengan peningkatan emisi kendaraan bermotor. Emisi tersebut dapat berbentuk gas dan partikulat, yang memberikan dampak negatif bagi kesehatan tubuh. Pengembangan teknologi diperlukan untuk mengurangi kandungan keluaran dari emisi knalpot, salah satunya dengan teknik filtrasi berbasis radiasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan filter partikulat berbasis *reheating system* yang diaplikasikan pada sistem pembuangan emisi sepeda motor, untuk mengurangi konsentrasi PM_{2,5} (partikulat berdiameter kurang dari 2,5 mikrometer). Penelitian ini menggunakan tiga buah sampel sepeda motor yang dipilih secara acak. Bahan dasar filter adalah tembaga dan aluminium yang dikembangkan menjadi filter yang terdiri atas *filter frame* dan *filter coil* dengan variasi beda panjang (4 cm, 5 cm, dan 6 cm). Konsentrasi PM_{2,5} sebelum dan sesudah melewati filter diukur dengan Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443) selama 30 menit dengan interval lima menit. Filter diletakkan di ruang pertama yang terletak di sisi *inlet* knalpot (dekat dengan *muffler* sepeda motor). Efisiensi di dapatkan dari hasil perbandingan antara konsentrasi PM_{2,5} sebelum dan sesudah melewati filter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{2,5} mengalami penurunan pada penggunaan filter F1, F2, dan F3 berturut-turut 86%, 84%, dan 79%. Efisiensi filter terbaik dihasilkan dari penggunaan filter terpanjang (6 cm) sebesar 20% hingga 25%. Efisiensi bergantung pada panjang filter.

Kata kunci: Sepeda motor; PM_{2,5}; filter *reheating system*; efisiensi



Design of Reheating System Based $PM_{2.5}$ Filters For Motorcycle Emission Disposal Systems

ABSTRACT

The population of motor vehicle has increased from year to year which is directly lead to the increase of its emmissions. Particulates have negative effects on body health. Technological development is needed to reduce the emissions, one of which is filtration techniques. This study aims to develop a reheating system-based filter that applied to the motorcycle emissions disposal system, to measure $PM_{2.5}$ concentrations emitted by motorbikes before and after using filters, and to measure the filter efficiency. This study used three randomly selected motorcycle samples. The filter base material uses copper and aluminum which is developed into a reheating system-based filter in the form of filter frames and filter coils with different variations in length 4 cm, 5 cm, and 6 cm. $PM_{2.5}$ concentration measured using a Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443) for 30 minutes at five minute intervals. The filter is placed in the first compartment located on the side of the muffler inlet. Efficiency obtained from the comparison between $PM_{2.5}$ concentration before and after passing through the filter. The results showed that $PM_{2.5}$ concentration decreased respectively 86%, 84%, and 79% in the use of F1, F2, and F3 filters. The best filter efficiency obtained from the longest filter (6 cm), F3, that is 20% to 25%. Efficiency depends on the filter length and number of copper coil.

Keywords: *Motorcycle; $PM_{2.5}$; reheating system filter; efficiency*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Desain dan Pengujian Efisiensi Filter Partikulat Berbasis Reheating System Untuk Sistem Pembuangan Emisi Sepeda Motor”**.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Sains dalam bidang Fisika. Dengan selesainya tugas penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada:

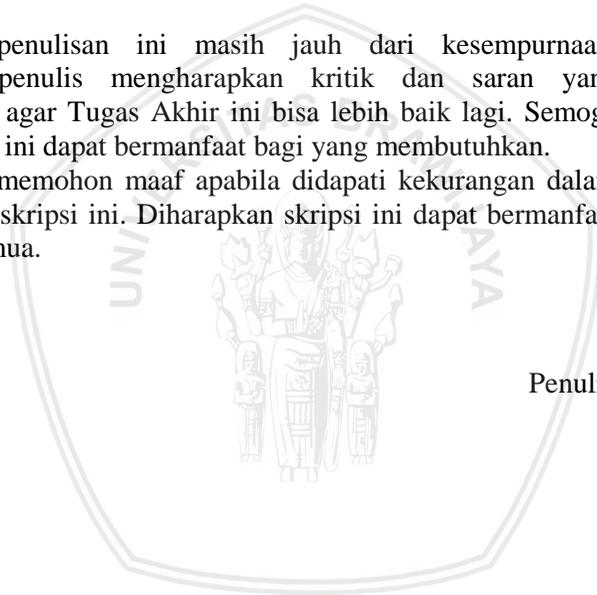
1. Kedua orang tua penulis, Saiful Anwar dan Nurul Hidayah atas segala semangat, doa, dukungan, dan kasih sayangnya yang tak terhingga..
2. Drs. Arinto Yudi P. W, M.Sc., Ph.D sebagai pembimbing pertama yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membimbing penulis dengan baik dan sabar dan senantiasa memberikan semangat, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Dr.Rer.Nat.Abdurrouf, S.Si. M.Si sebagai pembimbing kedua yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membimbing penulis dengan baik dan sabar dan senantiasa memberikan semangat, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Prof.Dr. Rer. Nat. Muhammad Nurhuda selaku ketua jurusan Fisika Universitas Brawijaya.
5. Arif Budianto, Mia Anggun P, Eko Teguh, Arsyal Karismadika, Rijal Pamungkas, yang telah membantu memberikan dukungan, semangat, arahan, dan masukan untuk penulisan skripsi.
6. Hisbulloh Huda dan Nurul Hidayah selaku kakak yang selalu memberi saran, dukungan, motivasi dan memberikan pengalamannya pada penulis selama kuliah hingga selesainya skripsi. Nur Khosiyah yang setiap hari mensupport dan memberikan dukungan serta doa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi.
7. Herlan Rumpoko dan Irna Sekar Mastuti, yang telah memberi tempat untuk pengerjaan skripsi ini dan memberi masukan kepada penulis.

8. Bagus Aditya M, Montano M, Tri Prasetyo, Arifandy, Rezha, Ikta, Susan, yang telah memberi semangat selama pengerjaan.
9. Keluarga CL-HMJ yang telah memberikan dukungan, semangat dan memberikan pengalaman berharga pada penulis.
10. Fahrul Nizar, Rizky Alman, Dwi Nanda, Ovan, Aditya R, Novan Arasila, Laga Arnasila, M. Toyib, seluruh sahabat saya atas segala bantuan, dan dukungan.
11. Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Tugas penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan, karenanya penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar Tugas Akhir ini bisa lebih baik lagi. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Penulis memohon maaf apabila didapati kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Diharapkan skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Penulis



DAFTAR ISI

COVER DEPAN.....	i
HALAMAN JUDUL.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	v
LEMBAR PERNYATAAN	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II.....	5
2.1 Polusi Udara	5
2.2 PM (<i>Particulate Matter</i>).....	7
2.2.1 Klasifikasi PM.....	8
2.2.2 Sumber-sumber PM.....	8
2.2.3 Dampak PM terhadap Kesehatan dan Lingkungan	9
2.3 Sistem Pembakaran pada Kendaraan Bermotor	10
2.4 Sistem Filtrasi Emisi Sepeda Motor	11
2.5 Aluminium.....	12
2.6 Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443).....	12
BAB III.....	13
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	13
3.2 Alat dan Bahan	13
3.3 Tahap Penelitian	13
3.3.1 Identifikasi Masalah	15
3.3.2 Studi Literatur.....	15
3.3.3 Persiapan Alat dan Bahan.....	15
3.3.4 Pembuatan dan Pemasangan Filter	16
3.3.5 Pengambilan Data.....	17
3.3.6 Analisis Data	18
BAB IV	21

4.1	Desain Filter.....	21
4.2	Konsentrasi PM _{2.5}	22
4.3	Efisiensi Filter.....	23
4.4	Pembahasan	24
BAB V	33
5.1	Kesimpulan.....	33
5.2	Saran	33
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN	39



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Presentase total emisi CO di berbagai kota di dunia	6
Gambar 2.2	Reaksi pembakaran	10
Gambar 2.3	Rata-rata konsumsi bahan bakar dan emisinya (a.bahan bakar dan b. emisi partikel (<i>Xu dkk, 2016</i>)).....	11
Gambar 2.4	Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443).....	12
Gambar 3.1	Diagram alur penelitian.....	14
Gambar 3.2	Variasi filter yang dibuat.....	16
Gambar 3.3	Posisi filter di dalam ruang knalpot.....	17
Gambar 3.4	Set-up pengambilan data (A. Digital Dust Monitor, B. Selang <i>probe</i> , C. Statis, dan D. Sepeda motor) ...	18
Gambar 4.1	Filter berbasis <i>reheating system</i> (atas ke bawah): F1 (panjang 4 cm), F2 (panjang 5 cm), dan F3 (panjang 6 cm)	21
Gambar 4.2	Konsentrasi PM _{2.5} (kiri ke kanan) tanpa filter, F1, F2, dan F3: motor 1, motor 2, dan motor 3	22
Gambar 4.3	Efisiensi rata-rata semua motor menggunakan F1, F2, dan F3.....	23
Gambar 4.4	Grafik ln efisiensi filter	25
Gambar 4.5	Suhu filter <i>reheating system</i> (bawah ke atas) F1, F2, dan F3.....	27
Gambar 4.6	Penurunan konsentrasi PM _{2.5}	28
Gambar 4.7	Hubungan suhu terhadap efisiensi.....	30
Gambar 4.8	Perbandingan antara <i>EF</i> Whatmann terhadap <i>EF</i>	31



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kenaikan Karbon dari tahun 1968-2004.....	7
Tabel 2. Macam- macam PM beserta ukurannya	8





DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Daftar hasil pengukuran motor 1	39
Lampiran 2	Daftar hasil pengukuran motor 2	41
Lampiran 3	Daftar hasil pengukuran motor 3	43
Lampiran 4	Daftar hasil pengukuran suhu motor 1.....	45
Lampiran 5	Daftar hasil pengukuran suhu motor 2.....	46
Lampiran 6	Daftar hasil pengukuran suhu motor 3.....	47





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Populasi kendaraan bermotor di dunia dari tahun ke tahun terus meningkat. Perkembangan kendaraan bermotor khususnya sepeda motor yang sangat pesat, terlebih lagi di daerah perkotaan merupakan salah satu hal yang mempengaruhi udara sebagai *commons* (sumber daya alam yang ada disekitar). Di Indonesia sendiri, populasi kendaraan bermotor didominasi oleh sepeda motor yang meningkat sebesar tujuh juta sepeda motor setiap tahunnya (Badan Pusat Statistik, 2015). Sepeda motor relatif menjadi primadona transportasi darat dikarenakan kemudahan akan mobilitas dan harga yang relatif terjangkau.

Peningkatan populasi kendaraan bermotor terbukti berbanding lurus dengan peningkatan emisi kendaraan bermotor. Hal ini terkait dengan penurunan kualitas udara akibat banyaknya emisi polutan yang dihasilkan. Polutan tersebut secara umum berasal dari proses pembakaran yang tidak sempurna, yang mengakibatkan timbulnya senyawa tertentu yang bersifat toksik bagi lingkungan dan kesehatan manusia (Wardoyo dkk., 2007; Wardoyo dkk., 2006).

Di samping itu, peningkatan pembakaran bahan bakar fosil pada saat ini bertanggung jawab untuk perubahan pada komposisi atmosfer. Polutan udara, seperti karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), *Volatile Organic Compound* (VOC), *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAH), ozon (O₃), logam berat, dan PM (*Particulate Matter*) (Chiang dkk., 2014; Sabaliauskas dkk., 2012).

Salah satu kategori polutan atau emisi dari kendaraan bermotor yakni dari kelas PM, seperti PM_{0.1}, PM_{2.5}, PM₁₀, dan TSP). Partikulat-partikulat tersebut memiliki diameter dalam skala mikrometer yang bahkan lebih kecil dari sehelai rambut yang masih sangat memungkinkan untuk terbebas. Partikel yang terbebas di udara dalam wujud padat yang berdiameter kurang dari 10 µm yang biasanya disebut dengan PM₁₀ (*coarse particle*) dan kurang dari 2,5 µm di dalam rumah (*fine particle* atau PM_{2.5}) diyakini oleh para pakar lingkungan dan kesehatan masyarakat sebagai pemicu timbulnya infeksi saluran pernafasan, karena partikel padat PM₁₀ dan PM_{2.5} dapat mengendap pada saluran pernafasan daerah bronki dan alveoli (Buonanno dkk., 2014). PM_{2.5} dapat bersumber dari hasil pembakaran

bahan bakar fosil dari industri, asap kendaraan bermotor, pembangkit listrik, kebakaran hutan, proses fotokopi dan proses percetakan.

Khusus untuk $PM_{2.5}$, polusi udara dari golongan PM ini memiliki dampak negatif yang bersifat akut dan kronis terhadap kesehatan dan dapat mempengaruhi sistem dan organ tubuh. Hal ini dimulai dari iritasi pernapasan ringan dan penyakit jantung, kanker paru-paru, infeksi saluran pernapasan akut pada anak-anak dan bronkitis kronis pada orang dewasa, paru-paru, atau serangan asma. Selain itu, dampak jangka pendek dan jangka panjang juga berkaitan dengan kematian prematur dan harapan hidup berkurang (Kampa & Castanas, 2008). Penelitian sebelumnya menunjukkan adanya hubungan antara pemaparan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang berasal dari emisi sepeda motor dengan persentase deformasi sel. Korelasi tersebut dapat dilihat pada deformasi sel alveolar paru-paru tikus yang diberi paparan terasi selama 100 detik dengan dosis tertentu (Wardoyo dkk., 2016).

Mengingat bahayanya dampak negatif yang ditimbulkan oleh $PM_{2.5}$ hasil emisi kendaraan bermotor, maka dilakukan berbagai pengembangan teknologi guna mengurangi kandungan keluaran dari emisi knalpot. Salah satu teknik filtrasi ini adalah filter lembaran tipis berbahan sabut kelapa dengan campuran lem kanji untuk pengurangan konsentrasi $PM_{0.1}$ (Pawestri dkk., 2014; Wardoyo dkk., 2016). Filter berbasis DPF (*Diesel Particulate Filter*) dari serbuk kelapa dengan lem tapioka yang dipasang pada knalpot sepeda motor untuk pengurangan konsentrasi $PM_{2.5}$ pada sepeda motor (Wahyuningrum dkk., 2004). Teknologi filtrasi lainnya yakni dengan prinsip elektrostatis plat sejajar berbahan logam aluminium yang dialiri tegangan rendah arus searah (Wardoyo dkk., 2017).

Reheating system sendiri merupakan system filtrasi yang menggunakan konsep perubahan ukuran dan fase partikel karena pemberian energi termal (Wardoyo dkk., 2017). Meskipun banyak teknologi filtrasi telah dikembangkan, namun penggunaan teknik filtrasi berbasis *reheating system* masih belum begitu menyediakan informasi. Terlebih lagi, aplikasi secara nyata metode ini di kendaraan bermotor belum banyak ditemukan hingga saat ini. Beberapa penelitian sebelumnya telah menyediakan sedikit informasi, di mana sistem filtrasi ini dapat digunakan untuk mengurangi konsentrasi polutan akibat adanya proses *reheating* (Wardoyo dkk., 2017). Di sisi lain, pengujian-pengujian lanjutan masih perlu dilakukan. Untuk itulah, penelitian berkelanjutan ini dilaksanakan guna menemukan metode filtrasi berbasis *reheating system* yang memiliki efisiensi

tinggi dan dapat diaplikasikan secara langsung di kendaraan bermotor, khususnya sepeda motor.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimanakah desain filter partikulat berbasis *reheating system* untuk sistem pembuangan emisi sepeda motor?
2. Bagaimanakah konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diemisikan sepeda motor sebelum dan sesudah menggunakan filter?
3. Bagaimanakah efisiensi kendaraan bermotor yang dihasilkan oleh filter tersebut?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Mendesain filter partikulat berbasis *reheating system* yang diaplikasikan pada sistem pembuangan emisi sepeda motor.
2. Mengukur konsentrasi partikulat $PM_{2.5}$ yang diemisikan sepeda motor sebelum dan sesudah menggunakan filter.
3. Mengukur efisiensi yang dihasilkan oleh filter.

1.4 Batasan Masalah

Di dalam penelitian ini, partikulat yang diukur hanyalah $PM_{2.5}$. Tiga sepeda motor yang diuji dipilih secara acak menggunakan teknik *random sampling* tanpa membahas pengaruh spesifikasi ataupun ragam sepeda motor terhadap efisiensi filter. Bahan dasar filter yang digunakan adalah tembaga dan aluminium. Adapun knalpot yang digunakan merupakan satu buah knalpot berjenis *reheated exhaust pipe* tipe “X” yang dikembangkan di dalam riset dan pengembangan paten Laboratory of Air Quality and Astro Imaging Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya, tidak menggunakan knalpot jenis lainnya.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun penelitian ini akan memberikan manfaat, yakni untuk mengetahui karakteristik filter dan knalpot tipe “X” tersebut terkait perubahan konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan menggunakan variasi panjang dari filter jaring-jaring berbahan aluminium dengan *ring* berbahan

tembaga yang dipasang pada fase satu (*compartment 1*) knalpot sepeda motor tipe “X” tersebut.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polusi Udara

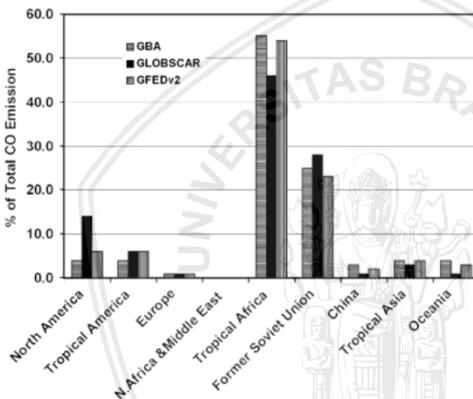
Definisi udara yakni campuran suatu gas yang terdapat pada atmosfer bumi, dalam udara terdiri atas campuran beberapa gas antara lain nitrogen, oksigen, uap air, argon, karbon dioksida, dan beberapa gas lain (Wardoyo, 2016). Pada udara juga mengandung padatan maupun cairan yang tersuspensi seperti halnya partikulat yang seringkali dinyatakan dalam persentase konsentrasi (%), distribusi massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ atau mg/m^3), ataupun distribusi jumlah partikelnya (partikel/ cm^3) (Wardoyo, 2016). 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).

Polusi udara merupakan salah satu bentuk pencemaran lingkungan, di mana udara tercemari oleh zat kimia dan bahan biologis yang dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup. Polusi udara dapat dihasilkan dari berbagai sumber, mulai dari sumber polusi bergerak, bergerak spesifik, tidak bergerak, dan tidak bergerak spesifik. Beberapa penelitian mengemukakan bahwa sumber-sumber polusi tersebut dalam udara didominasi oleh kegiatan pembakaran biomassa maupun aktifitas dan berbagai hal yang berkaitan dengan moda transportasi. Polusi udara dipercaya sebagai faktor utama pemanasan global. Polutan seperti karbon dioksida, karbon monoksida dan beraneka macam partikulat matter berpotensi menjadi faktor di balik terjadinya kenaikan suhu lingkungan secara global atau yang jamak disebut pemanasan global. Bahkan polutan dari kelas SO_x dapat membahayakan keberadaan O_3 atau ozon.

Di sisi lain terdapat parameter yang membatasi jumlah polutan di udara atau yang dikenal sebagai batas ambang. Batas ambang digunakan untuk mengasumsikan seberapa banyak polutan terkonsentrasi di udara ambien (di suatu daerah) dengan sejumlah konsentrasi tertentu. Batas ambang polutan udara juga dapat digunakan untuk memprediksi pengaruh fluktuasi konsentrasi polutan terhadap berbagai efek negatif yang mungkin ditimbulkan. Diprediksikan pada golongan yang terkena paparan polusi udara yang berlebih akan meningkatkan pengaruh kerentanan genetik dan

penyakit pada seseorang yang sering terpapar misalnya supir bis, dan polisi lalu lintas (Autrup, 2010).

Berbagai usaha telah dilakukan untuk mengukur polutan udara hasil pembakaran biomassa berupa gas CO (dalam persentase). Global CO emissions and *associated uncertainties* pada tahun 2000 meletakkan tiga buah satelit di daerah yang terbakar untuk memperkirakan hasil untuk pembakaran biomassa pada global bergantung pada set data area yang terbakar. Perbandingan jumlah distribusi pembakaran biomassa dan jumlah emisinya dibagi menjadi tiga data utama yang menunjukkan perbedaan yang sangat besar pada daerah kawasan Afrika Utara, Timur Tengah, Oceania, Cina, Eropa, dan Amerika Utara (Jain, 2007).



Gambar 2.1. Presentase total emisi CO di berbagai kota di dunia

Gambar di atas merupakan persebaran polusi biomassa di dunia yang di ambil dari stasiun pengamatan polusi di dunia. Dari perkiraan total emisi CO global dengan ketidakpastian total terkait dengan api terbuka pada 2000 sekitar $\pm 65\%$. Sedangkan nilai tertinggi terdapat pada region Afrika Utara dan Timur Tengah sebesar $\pm 99\%$ dilanjutkan Oceanic sebesar $\pm 83\%$, China sebesar $\pm 80\%$, Eropa sebesar $\pm 76\%$, Amerika Utara sebesar $\pm 75\%$, Tropical Asia sebesar $\pm 67\%$, dan Tropical America sebesar $\pm 55\%$ (Jain, 2007).

Pencemaran udara yang paling tinggi di Indonesia adalah asap kendaraan bermotor lebih dari 70%. Pencemaran ini merupakan hasil dari emisi gas buang kendaraan bermotor. **Tabel 1** di bawah merupakan standarisasi dari uji emisi gas buang kendaraan yang

dilakukan oleh pemerintah Amerika pada tahun 1970 hingga tahun 2004 (Etheridge dkk., 2011).

Tabel 1. Kenaikan Karbon dari tahun 1968-2004.

Tahun produksi	Karbon Monoksida	Hidrokarbon	Nitrogen
Pre-1968	90.0	15.0	6.2
1970	34.0	4.1	-
1972	28.0	3.0	-
1973-74	28.0	3.0	3.1
1975-76	15.0	1.5	3.1
1977	15.0	1.5	2.0
1980	7.0	0.41	2.0
1981	3.4	0.41	1.0
1994-96	3.4	0.25	0.4
2004	1.7	0.125	0.2

Terlihat pada tabel di atas, penurunan tingkat polusi udara yang terjadi karena kenaikan kualitas sistem gas buang pada kendaraan di Amerika (Etheridge dkk., 2011).

Seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa motor merupakan penyumbang terbesar polusi yang ada di Indonesia karena penjualannya yang sangat banyak dalam kurun waktu 2015 (dengan menggunakan bahan bakar yang berasal dari fosil) yang membuat banyaknya karbon dioksida. Zat ini yang merupakan penyebab naiknya suhu dari suatu lingkungan. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Bang Quoc Ho dan Alain Claper tahun 2010 emisi dari kendaraan bermotor ada CH₄ sebesar 99%, CO sebesar 94%, NMVOC sebesar 68%, SO_x sebesar 61% dan NO_x sebesar 29% (Quic dkk., 2011) karena emisi inilah yang menyebabkan pemanasan global dan karena jumlah motor di Indonesia tahun 2015 mencapai kurang lebih 97 juta motor. Jumlah ini jauh dibandingkan jumlah mobil pribadi di Indonesia yang hanya 10.54 juta unit (kompas.com)

2.2 PM (*Particulate Matter*)

Particulate Matter merupakan campuran partikel padatan dan cairan yang tersuspensi di udara. Jika dibandingkan asap dan debu PM memiliki diameter yang jauh lebih kecil. Oleh karena itu investigasi terkait PM membutuhkan perlakuan khusus menggunakan alat bantu seperti mikroskop elektron. Adapun klasifikasi dari PM dibedakan

atas dasar diameter. Selain itu dampak toksik yang diberikan juga beragam bergantung pada komposisi kimia dari masing-masing partikulat (Nussbaumer dkk., 2015).

PM juga dapat diartikan sebagai campuran atau kumpulan dari partikel kasar dan partikel yang halus. Partikel kasar dikenal sebagai *fine particulate* dan *coarse partikel* dengan rentang ukuran 2,5 sampai 10 mikro meter. Untuk partikel halus memiliki diameter kurang dari 2,5 mikro meter atau yang lebih dikenal sebagai *ultra fine partikel* (Morawska dkk., 2002).

2.2.1 Klasifikasi PM

PM memiliki empat klasifikasi utama (**Tabel 2**) yang terdiri atas PM_{0.1} (UFP atau *ultrafine particle*), PM_{2.5} (FP atau *fine particle*), PM₁₀, dan TSP. Klasifikasi ini ditentukan dari besarnya diameter PM tersebut. Secara khusus PM dengan diameter 2.5 hingga 10 µm disebut sebagai *coarse particle* atau dapat disebut sebagai PM₁₀ jika di tinjau dalam massa partikel. PM₁₀ sebagian besar berasal dari aktifitas produksi material kristal. Untuk FP berasal dari aktifitas industri atau pabrik atau kegiatan transportasi. Untuk FP memiliki diameter kurang dari 0.1 hingga 2.5 µm dan berasal dari aktifitas transportasi. Keseluruhan PM memiliki struktur kimia, dan karakteristik yang berbeda-beda (Hart dkk., 2015).

Tabel 2. Macam- macam PM beserta ukurannya

Fraksi	Ukuran Partikel
PM ₁₀ (<i>thoracic fraction</i>)	≤ 10 µm
PM _{2.5} (<i>respirable fraction</i>)	≤ 2,5 µm
PM ₁	≤ 1 µm
Ultrafine (UFP atau UP)	≤ 0,1 µm
PM ₁₀ -PM _{2.5} (<i>coarse fraction</i>)	≤ 2,5 µm- 10µm

(dimodifikasi dari (Hart dkk., 2015))

2.2.2 Sumber-sumber PM

PM dapat berasal dari sumber lokal maupun regional. Industri yang memiliki proses pembakaran dapat mengemisikan PM dalam berbagai ukuran. Dalam proses ini terjadi kenaikan temperatur yang disertai adanya kondensasi uap panas (*heated super vapor*) yang mengakibatkan adanya proses nukelasi. Akibatnya terbentuk partikel baru dengan diameter berbeda (Liu dkk., 2016).

UFP dapat berasal dari kegiatan offset atau percetakan. Penelitian yang dilakukan oleh (Morawska dkk., 2002) membuktikan bahwa printer *ink jet* dapat menghasilkan UFP sebesar 6×10^6 partikel sampai dengan $3,68 \times 10^7$ partikel. Printer laser menghasilkan $8,76 \times 10^{11}$ sampai dengan $5,25 \times 10^{12}$ partikel. Penelitian lain sudah menyebutkan bahwa proses pembakaran biomassa akan mengemisikan UFP (Abraham dkk., 2002). Penelitian lain juga menemukan $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pencemaran $\text{PM}_{2.5}$ di udara ambien perkotaan (Liu dkk., 2016).

2.2.3 Dampak PM terhadap Kesehatan dan Lingkungan

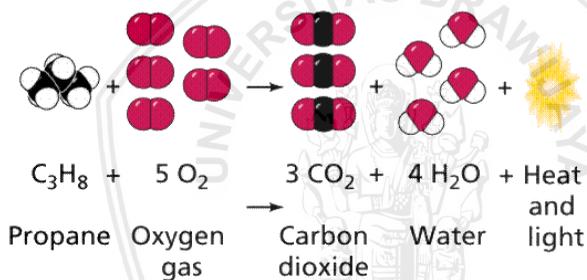
Partikel yang lebih kecil dari $0.1 \mu\text{m}$ akan mengendap pada bronkus. Namun partikel yang memiliki diameter antara $1-0.1 \mu\text{m}$ terlalu besar untuk bronkus dan terlalu kecil untuk terjebak pada trakea maka dari itu partikel ini akan menumpuk pada paru-paru jika terhirup oleh manusia, PM_{10} juga dapat meningkatkan resiko stroke iskemik (stroke yang di sebabkan karena pengumpulan darah) (Grimm dkk., 2015).

Penelitian lain menunjukkan bahwa UFP dapat membahayakan organ paru paru. Polutan yang terbuat dari UFP dengan sifat toksik dapat merusak paru paru pada mencit. Kerusakan yang dialami mencit berupa inflamasi dan stres intraseluler (Donaldson dkk., 2002). Dalam penelitian lain terkuak fakta bahwa UFP dapat mengakibatkan eosinophilic airway infamasi sebagai senyawa alergen. Hal ini terbukti dari pengujian yang dilakukan dengan menganalisis jumlah sel yang mengalami inflamasi, tingkat kandungan sitokin di BLAF (*bronchoalveolar lavage fluid*), dan histopatologi paru (Huang dkk., 2015). Karena konsentrasi UFP di udara bebas sangat besar maka mengakibatkan potensi terbesar menjadi substansi toksik yang berbahaya bagi manusia. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa UFP dapat mengakibatkan inflamasi sistem pulmonasi sehingga stres oksidatif yang terbukti berbahaya bagi manusia (Delfino dkk., 2005). Dampak lain dari UFP adalah gangguan yang terjadi pada sistem peredaran darah dalam tubuh. Berdasarkan permodelan sirkulasi darah yang dilakukan oleh (Bazanovas dkk., 2015) UFP dapat mengganggu kandungan Ca^{2+} dalam darah yang mana akan menyebabkan terjadinya deformasi sel darah merah. Efek ini dapat menunjukkan kemampuan UFP dalam merubah bentuk sel darah merah (RBC) normal menjadi abnormal.

2.3 Sistem Pembakaran pada Kendaraan Bermotor

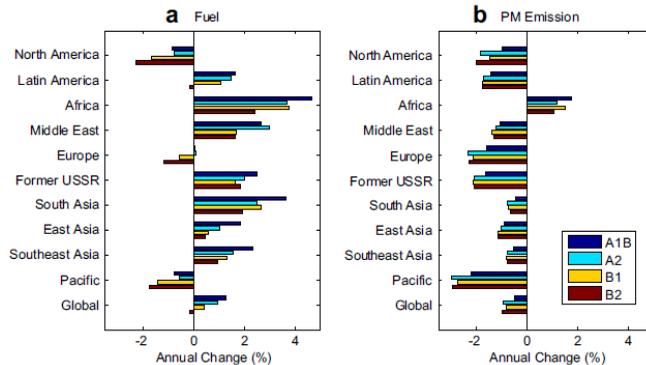
Pembakaran merupakan reaksi kimia eksotermik antara bahan bakar dan oksidan (senyawa kimia yang muda mentranfer atom oksigen) disertai dengan produksi panas dan onvergensi komponen kimia serta menghasilkam energi cahaya dan energi panas.

Awal dari sistem pembakaran kendaraan dimulai dari udara yang di campur dengan bahan bakar dari karburator yang bersumber dari tangi bahan bakar (**Gambar 2.2**). Pencampuran bahan bakar dan oksigen akan menghasilkan enegri dan emisi. Energi yang dihasilkan akan memutar mesin dan meghasilkan energi dan emisi. Energi yang berwujud gas dan partikel yaitu $PM_{2.5}$. Dari teori, jumlah udara yang dihasilkan yaiyu 21% senyawa, 78% Nitogen dan 1% gas dan panas eksotermik. Kondisi idealnya, pembakaran sempurna hanaya menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O) (Morawska dkk., 2008).



Gambar 2.2 Reaksi pembakaran

Jumlah emisi dari pembakaran kendaraan bermotor bergantung pada perkembangan kendaraan itu sendiri. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.3** di bawah. Terjadi kenaikan konsumsi bahan bakar pada semua daerah kecuali daerah Amerika Utara, Eropa, dan Pasifik, emisi mengingkat secara signifikan hanya terjadi di Afika, ini terjadi karena pertumbuhan kendaraan yang cepat.



Gambar 2.3. Rata-rata konsumsi bahan bakar dan emisinya (a. bahan bakar dan b. emisi partikel (Xu dkk., 2016)).

2.4 Sistem Filtrasi Emisi Sepeda Motor

Sistem filtrasi emisi sepeda motor secara umum menggunakan katalis untuk mengurangi gas buang dari kendaraan roda dua dengan tiga arah atau dua arah. Teknologi dua arah ini berfungsi untuk mengoksidasi HC dan CO sedangkan tiga arah berguna untuk mengurangi NO_x. Katalis pada umumnya terbuat dari bahan komposit anorganik yang tersebar pada lapisan tipis logam platinum yang diterapkan pada permukaan katalis logam aktif atau keramik yang dibentuk seperti sarang lebah. Dan dapat di sebut sebagai substrat.

Gas buang akan mengalir melalui saluran substrat yang terbuka dari sarang lebah dan akan mengalami kontak dengan katalis. Konfigurasi sederhana melibatkan pelapisan *catalyzes washcoat* pada pipa knalpot. Katalis akan diendapkan di dalam lapisan katalis tipis yang berada di substrat yang terdiri dari platinum, palladium dan rhodium. Baik secara individual maupun secara kombinasi ketiganya. Dan untuk mencapai paparan yang maksimal pada gas buang makan logam yang halus dan harus tersebar merata pad permukaan knalpot.

Washcoat merupakan katalis dengan tiga komponen dimana yang menjadi komponen utamanya adalah komponen aluminium, platinum, dan rhodium. Campuran ketiga bahan ini digunakan untuk menangkap gas buang (CO, HC, dan NO_x). Dan pada mesin empat langkah akan memberikan emisi secara subtansial lebih tinggi. Penggunaan katalis oksidasi dalam kombinasi dengan udara sekunder mapu menurunkan hingga 80% HC dan 90% untuk CO dan

meningkatkan CO₂ sebanyak 35% akibat dari emisi konversi HC dan CO menjadi CO₂ (Charron dkk., 2003).

2.5 Aluminium

Aluminium adalah logam konduktif yang memiliki sifat tahan terhadap korosi dan termasuk dalam logam ringan yang mengandung afinitas kuat terhadap oksigen. Yang menjadikan aluminium disini banyak digunakan pada berbagai bahan pada bidang konstruksi arsitektur dan berbagai bahan pada suatu industri. Aluminium juga memiliki sifat sebagai penghantar listrik yang cukup baik dan memiliki sifat thermal yang sangat baik dan ketahanannya terhadap korosi menjadikan aluminium banyak digunakan sebagai pendingin juga serta sifat aluminium yang memiliki kelenturan yang baik menjadikan aluminium digunakan di berbagai bidang.

2.6 Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443)

Digital dust monitor digunakan sebagai alat ukur PM_{2.5} (**Gambar 2.4**). Instrumen ini bekerja dengan prinsip hamburan cahaya atau *light scattering*. Prinsip ini akan menentukan besar konsentrasi massa partikel secara *real time*. Hamburan cahaya berasal dari sumber sinar laser sebagai pembacaan massa aerosol yang tertangkap. Aerosol akan ditangkap oleh aliran kontinyu. Aerosol yang terkena hamburan sinar laser akan menghamburkan ulang cahaya tersebut ke segala arah dan akan ditangkap oleh foto detektor dan akan di konversi menjadi tegangan (Kanomax Inc., 2012).



Gambar 2.4. Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di *workshop* Mangliawan Permai B100 (pengambilan data) dan *Laboratory of Air Quality and Astro Imaging* Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya Malang (interpretasi data). Adapun selang waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Januari 2018 sampai dengan Desember 2018.

3.2 Alat dan Bahan

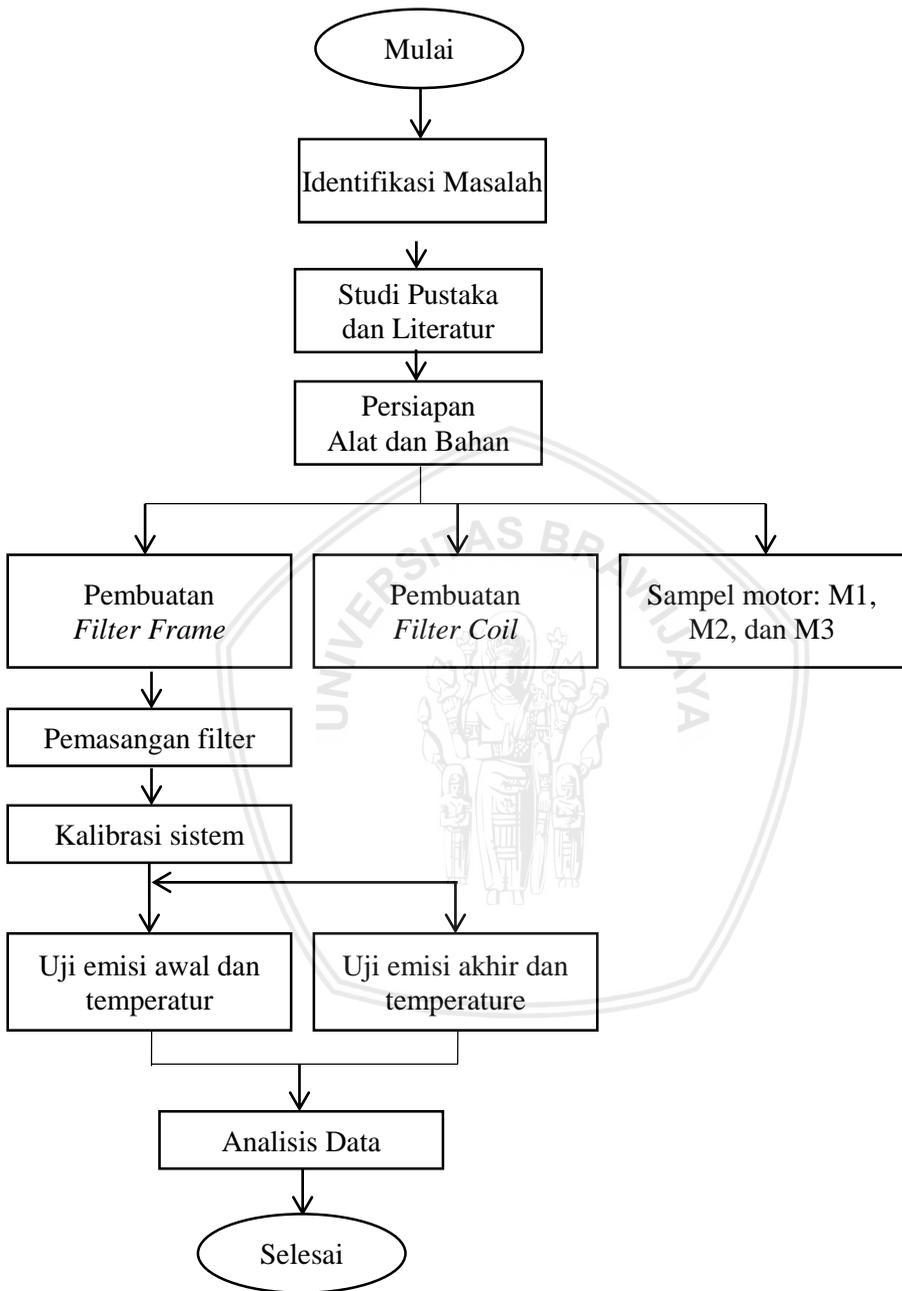
Penelitian menggunakan tiga buah sampel sepeda motor dengan spesifikasi yang berbeda-beda (M1, M2, dan M3). Alat utama yang digunakan di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- Neraca analitik JM-C500
- Digital Dust Monitor (Kanomax, Model 3443)
- Termometer digital termokopel tiga buah (Heles)
- Termometer digital inframerah satu buah (Krisbow KW0600280)
- Knalpot *reheated exhaust pipe* tipe “X” yang dikembangkan di riset *Laboratory of Air Quality and Astro Imaging* (spesifikasi terlampir).

Adapun bahan yang digunakan di dalam pembuatan filter berbasis *reheated* yakni kawat kasa aluminium dengan tebal 0,03 mm yang digunakan sebagai *filter frame* dan kawat tembaga dengan diameter 0,15 mm yang digunakan sebagai lilitan (*filter coil*) untuk elemen *reheated system*. Beberapa alat penunjang digunakan di dalam pembuatan filter, seperti: jangka sorong, milimeter sekrup, tang, obeng, dan bor listrik.

3.3 Tahap Penelitian

Penelitian dilaksanakan di dalam enam tahapan utama (**Gambar 3.1**), yakni identifikasi masalah, studi literatur dan pustaka, persiapan alat dan bahan, pembuatan dan pemasangan filter, kalibrasi sistem, pengambilan data, dan analisis data. Adapun rincian tahapan tersebut adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1. Diagram alur penelitian

3.3.1 Identifikasi Masalah

Bagaimana bentuk filter partikulat berbasis *reheating* system untuk sistem pembuangan emisi sepeda motor? Bagaimanakah konsentrasi PM_{2.5} yang diemisikan sepeda motor sebelum dan sesudah menggunakan filter? Bagaimanakah efisiensi kendaraan bermotor yang dihasilkan oleh filter tersebut?

3.3.2 Studi Literatur

Setelah dilakukan identifikasi masalah, telah berhasil diperoleh perumusan masalah beserta target tujuan rencana penelitian. Untuk menindaklanjuti tahapan tersebut, dilakukan studi literatur terkait beberapa hal, seperti:

- a. Polusi udara
- b. Sumber polusi udara
- c. *Particulate matter*
- d. Sistem pembakaran kendaraan bermotor
- e. Sistem filtrasi emisi kendaraan bermotor

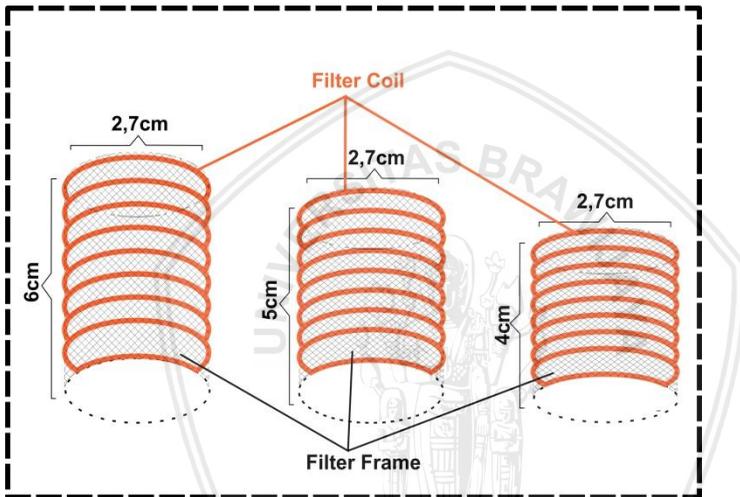
Adapun informasi diperoleh dari sumber berupa *paper* dan buku-buku literatur, serta modul perkuliahan.

3.3.3 Persiapan Alat dan Bahan

Keseluruhan alat dan bahan dipersiapkan terlebih dahulu. Digital Dust Monitor dipastikan berada dalam kondisi terkalibrasi. Proses kalibrasi kanomax digital dust monitor yakni masuk mode kalibrasi pada alat dari tombol menu. Kemudian aklimatisasi alat dengan suhu sekitar (dilakukan dalam waktu 20 menit). Tutup karet dilepaskan dari *inlet*. Selanjutnya tuas cek sensitifitas di putar ke sisi kosong saat penyesuaian dan di putar kesisi lengkap ketika kalibrasi dilakukan. Dan dilakukan cek harian dengan pengkosongan kotoran yg ada dilubang *inlet-outlet* alat ukur sehingga konsentrasi menjadi nol. Jika skala sudah menunjukkan nilai nol, alat sudah siap untuk digunakan. Secara keseluruhan, Digital Dust Monitor dan Anemomaster diletakkan pada ruang pengukuran dengan temperatur tidak melebihi 31°C (sesuai dengan standar operasional prosedur pengukuran). Adapun tembaga untuk *filter coil* disimpan di dalam ruang dengan temperatur ruang terkontrol (26-27°C).

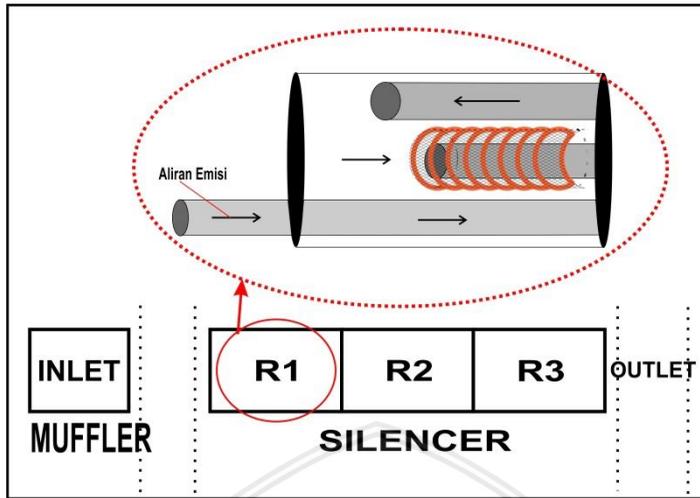
3.3.4 Pembuatan dan Pemasangan Filter

Kawat kasa aluminium dipotong dengan tiga ukuran yang berbeda (panjang konstan) untuk membuat *filter frame*. Filter 1 terbuat dari kasa aluminium dengan dimensi 15cm x 6 cm (panjang x lebar). Untuk Filter 2 dan Filter 3, kawat kasa aluminium dipotong dengan dimensi panjang x lebar berturut-turut sebesar 15,0 cm x 5,0 cm dan 15,0 cm x 4,0 cm. Kasa aluminium tersebut masing-masing dibentuk menjadi tabung dengan 3 variasi panjang yang berbeda dengan diameter konstan 2,7 cm. Tabung tersebut kemudian ditutup dengan kasa aluminium berdiameter 2,7 cm (**Gambar 3.2**).



Gambar 3.2. Variasi filter yang dibuat

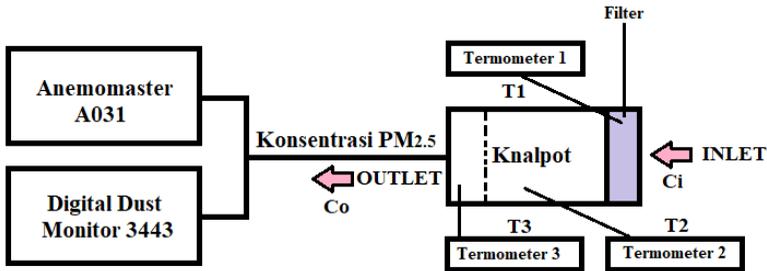
Kawat tembaga digulung untuk pembuatan *filter coil*. Panjang dan diameter *filter coil* mengikuti ketiga variasi filter yang dibuat (panjang 4, 5, dan 6 cm). Filter coil dililit ke *filter frame* sebanyak 6, 7, dan 11 lilitan berturut-turut untuk Filter 1, Filter 2, dan Filter 3 (**Gambar 3.2**). Lilitan tersebut (*filter coil*) diikat ke *filter frame* menggunakan kawat tembaga guna memperkuat lilitan agar tidak mudah lepas saat digunakan. Setelah selesai dirakit, filter dipasang ke knalpot (**Gambar 3.3**).



Gambar 3.3. Posisi filter di dalam ruang knalpot

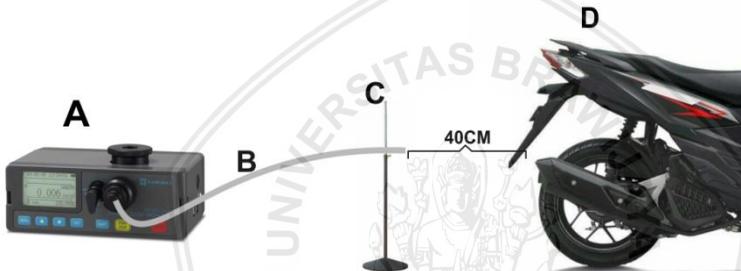
3.3.5 Pengambilan Data

Masing-masing filter dipasang ke sistem pembuangan emisi sepeda motor (knalpot) sampel. Filter tersebut diletakkan di ruang (*compartment*) pertama yang terletak di sisi *inlet* knalpot (dekat dengan *muffler* sepeda motor). Temperatur udara *ambient* (T_a), temperatur knalpot mula-mula (T_0), dan konsentrasi $PM_{2.5}$ *ambient* (C_a) dicatat (dengan Digital Dust Monitor). Selanjutnya, *probe* alat ukur diletakkan sejauh 40 cm dari sisi *outlet* knalpot. Motor dinyalakan selama lima menit dalam kondisi *idling* dan *cold start* (1000 RPM) dan tepat pada menit kelima dicatat temperatur pada ruang atau *compartment* 1 (T_1), 2 (T_2), 3 (T_3), dan *outlet* knalpot (T_4). Selain temperatur, dicatat pula konsentrasi $PM_{2.5}$ di posisi *outlet* (C_o). Perlakuan ini dilakukan selama 30 menit dengan interval 5 menit. Perlakuan tersebut diterapkan untuk seluruh variasi filter dan seluruh sampel sepeda motor. Selain itu, konsentrasi $PM_{2.5}$ sebelum difilter (C_i) dicatat dengan perlakuan yang sama. Laju aliran emisi dengan dan tanpa menggunakan filter diukur menggunakan Anemomaster (**Gambar 3.4**).



Ambient (Ca dan Ta)

Termometer 4



Gambar 3.4. Set-up pengambilan data (A. Digital Dust Monitor, B. Selang probe, C. Statis, dan D. Sepeda motor)

3.3.6 Analisis Data

Data konsentrasi $PM_{2.5}$ untuk tiap-tiap filter dibandingkan dengan data konsentrasi $PM_{2.5}$ sebelum melewati filter. Perbandingan tersebut diuji menggunakan uji *Student's t-test*, di mana nilai $p < 0,05$ secara statistik memiliki perbedaan yang signifikan. Keseluruhan data $PM_{2.5}$ yang diperoleh diinterpretasikan ke dalam grafik hubungan antara waktu pengambilan data dan konsentrasi $PM_{2.5}$. Data yang diperoleh dari tiap-tiap sampel sepeda motor dianalisis kinerja filternya dalam bentuk persentase efisiensi EF menggunakan persamaan (1). Keseluruhan data diinterpretasikan dalam bentuk rata-rata (*mean*) \pm SD (standar deviasi) menggunakan Microsoft Office 2010. Hubungan antara panjang filter dengan efisiensi filter dianalisis

menggunakan pendekatan numerik regresi linear, di mana nilai koefisien determinasi $R^2 > 0.80$ dan koefisien korelasi $R > 0.80$ menyatakan korelasi linear yang positif (Wardoyo & Budianto, 2017).

$$EF = \frac{(C_i - C_o)}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain Filter

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan filter berbasis *reheating system* berupa *filter frame* (kassa berwarna hitam) dan *filter coil* (lilitan tembaga) dengan variasi beda panjang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Gambar dari filter dapat dilihat di bawah dari atas ke bawah berurutan, yang menunjukkan beda panjang (p) dari filter.



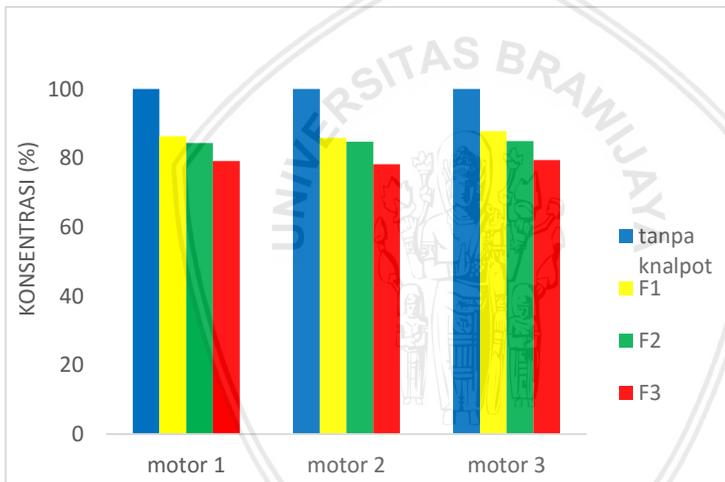
Gambar 4. 1 Filter berbasis *reheating system* (atas ke bawah): F1 (panjang 4 cm), F2 (panjang 5 cm), dan F3 (panjang 6 cm).

Filter berbasis *reheating system* pada **Gambar 4.1** merupakan filter yang digunakan pada pengambilan data secara berurut dapat dilihat perbedaan panjang dari setiap filter. Setiap filter terbuat dari bahan yang sama yang terdiri dari *frame* filter yang terbuat dari bahan aluminium dan filter *coil* yang terbuat dari bahan tembaga (diameter 1,5 mm) yang direkatkan menggunakan benang tembaga (diameter 0,15 mm) pada *frame* filter. Setelah filter berbasis *reheating system*

selesai dibuat, filter direndam dengan alkohol agar filter bersih dari debu. Kemudian filter dijepit menggunakan *clamp* berbahan alumunium dan filter dipasang pada bagian *compartement 1* knalpot. Setelah pemasangan filter selesai knalpot dipasang pada motor uji dan dilakukan pengambilan data. Perlakuan ini dilakukan sama pada semua motor uji.

4.2 Konsentrasi $PM_{2.5}$

Di bawah ini ditunjukkan hasil konsentrasi $PM_{2.5}$ dalam bentuk persentase dari Motor 1, 2, dan 3 (hasil pengambilan data mulai dari tanpa penggunaan knalpot kemudian menggunakan knalpot dan filter 1, 2, dan 3) pada setiap motor uji yang digunakan. Kemudian data dapat diimplementasikan seperti pada **Gambar 4.2** sebagai berikut.



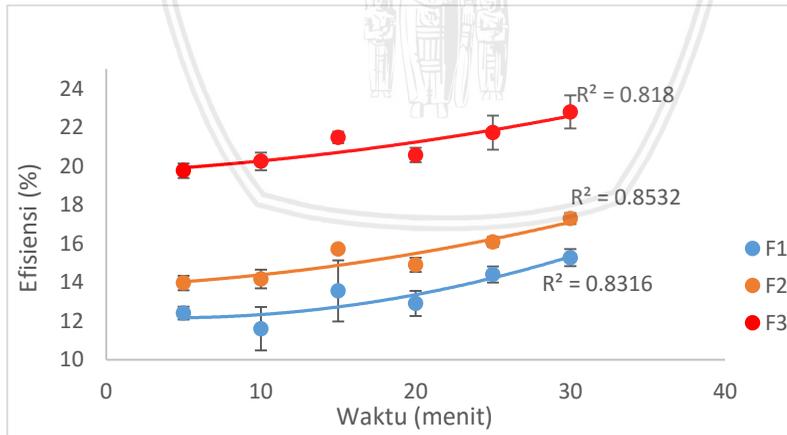
Gambar 4. 2 Konsentrasi $PM_{2.5}$ (kiri ke kanan) tanpa filter, F1, F2, dan F3: motor 1, motor 2, dan motor 3

Pada gambar tersebut di atas, ditunjukkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang mengalami penurunan pada setiap penggunaan filter untuk seluruh motor uji. Pada Motor 1, konsentrasi $PM_{2.5}$ terbesar diperoleh pada saat tanpa menggunakan filter (100%). Setelah filter diaplikasikan pada sistem pembuangan emisi sepeda motor, diperoleh konsentrasi $PM_{2.5}$ pada F1, F2, dan F3 berturut-turut sebesar 79, 84, dan 86%. Dari hasil tersebut, diketahui bahwa konsentrasi cenderung

turun seiring dengan bertambahnya p dari filter. Hal yang sama juga diperoleh pada motor uji 2, di mana konsentrasi $PM_{2.5}$ terkecil diperoleh pada saat penggunaan F3, yakni sebesar 78%. Di sisi lain, konsentrasi pada F1 dan F2 sedikit lebih besar daripada F3, yakni berturut-turut sebesar 86 dan 85%. Pada M3, diperoleh hasil yang sama, di mana F3 menghasilkan konsentrasi $PM_{2.5}$ terkecil sebesar 79%. Penurunan konsentrasi $PM_{2.5}$ pada setiap motor memiliki pola yang sama saat menggunakan semua filter. Penurunan konsentrasi yang lebih besar saat penggunaan F3 dikarenakan filter tersebut memiliki ukuran terpanjang dari semua filter. Selanjutnya untuk penggunaan F1 memiliki konsentrasi yang lebih besar dari penggunaan filter yang lain karena memiliki ukuran panjang filter paling kecil. Dapat dilihat juga setelah penggunaan filter terjadi pengurangan konsentrasi $PM_{2.5}$ dari setiap penambahan ukuran panjang dari filter tersebut.

4.3 Efisiensi Filter

Efisiensi rata-rata dari filter di atas ($n = 3$) dapat dilihat pada *trendline* polynomial orde dua (kuadratik) di bawah (**Gambar 4.3**) dengan pengambilan data dari menit ke-5 sampai dengan menit 30. Kemudian dapat ditarik garis *trendline* dari pengambilan data setiap 5 menit.



Gambar 4. 3 Efisiensi rata-rata sumua motor menggunakan F1, F2, dan F3

Pada F3 didapatkan informasi bahwa efisiensi rata-rata terbaik dari 20% pada menit ke 5 sampai dengan 25% pada menit ke 30 ($R^2 = 0.82$). Efisiensi rata-rata terbaik ini dihasilkan dari penggunaan filter terpanjang dari semua filter. Pada posisi kedua, F2 menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 14% pada menit ke 5 sampai dengan 17% pada menit ke 30. F1 dengan ukuran panjang paling kecil menghasilkan efisiensi rata-rata dari menit ke 5 sebesar 12% sampai dengan 14% pada menit ke 30 dengan nilai ($R^2 = 0.83$). Pengaruh panjang pada penggunaan filter dapat mempengaruhi efisiensi rata-rata untuk mengurangi konsentrasi $PM_{2.5}$.

4.4 Pembahasan

Berdasarkan penelitian didapat hasil konsentrasi $PM_{2.5}$ berubah mengikuti panjang filter. Hal tersebut diperkuat dengan adanya analisa pengurangan partikel menggunakan pendekatan hukum Lambert Beer (El-Fiki dkk., 2015) dalam persamaan berikut (4.1)

$$I = I_0 e^{-\mu p} \quad (4.1)$$

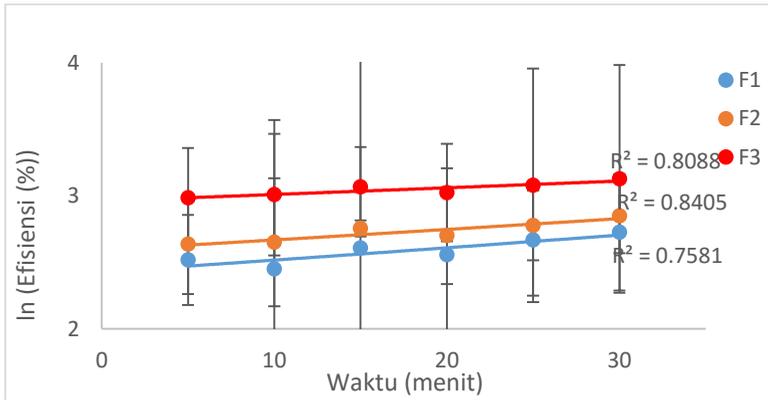
I merupakan besar konsentrasi dari emisi setelah difilter, I_0 merupakan besar konsentrasi partikel sebelum difilter, μ merupakan koefisien atenuasi (pengurangan) partikel, dan p merupakan panjang dari filter sehingga ketika didistribusikan pada persamaan (3.1) akan menghasilkan analogi dari persamaan Lambert Beer dengan nilai efisiensi filter sebagai berikut.

$$EF = \frac{c_i - c_0 e^{-\mu p}}{c_i} \times 100\% \quad (3.1)$$

Untuk memperoleh hubungan panjang terhadap efisiensi filter maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\ln EF = \mu p \quad (4.2)$$

Dari persamaan (4.2) dapat diketahui bahwa semakin panjang filter maka nilai $\ln EF$ akan semakin besar. Hal tersebut untuk memperkuat hubungan efisiensi filter secara fisika. Maka dapat dibuat grafik sebagai berikut.



Gambar 4. 4 Grafik ln efisiensi filter

Dari gambar diatas dapat dilihat ln *EF* cenderung naik seiring dengan penambahan waktu. Kemudian ada perbedaan nilai ln efisiensi antarfilter yakni F1, F2, dan F3 dengan nilai ln efisiensi terendah pada F1 dengan menggunakan pendekatan eksponensial dengan nilai $y = 2.4273e^{0.0036x}$ dengan nilai R^2 sebesar 0.7581 didapat nilai ln efisiensi dari 2.52% sampai 2.73% yang dipengaruhi panjang dari filter karena F1 merupakan filter terpendek. Selanjutnya untuk F2 memiliki ln efisiensi dengan nilai $y = 2.5914e^{0.0029x}$ dan nilai dari R^2 sebesar 0.8405 memiliki ln efisiensi dari 2.64% sampai 2.85%. selanjutnya untuk F3 memiliki ln efisiensi terbaik dari semua filter dengan menggunakan pendekatan eksponensial dengan nilai $y = 2.9604e^{0.0017x}$ dengan nilai R^2 sebesar 0.8088 didapat nilai ln efisiensi dari 2.98% sampai 3.13% dikarenakan filter ini adalah filter terpanjang. Dari grafik diatas dapat dilihat semakin lama pengujian filter maka nilai ln efisiensi semakin naik dengan penambahan panjang pada masing masing filter.

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa efisiensi filter berkisar antara 20% hingga 25%. Nilai efisiensi terbesar diperoleh pada saat menggunakan F3 dengan panjang filter sebesar 6,0 cm. Pada saat menggunakan F1 (panjang filter 4,0 cm) diperoleh efisiensi filter terendah, yakni sebesar 12% sampai dengan 14%. Hasil ini mengindikasikan bahwa efisiensi filter dipengaruhi oleh panjang dari filter aluminium tersebut, di mana dimensi atau ukuran lain dari filter

dibuat tetap (diameter filter dibuat tetap atau konstan 2,7 cm). Filter berbasis *reheated* yang berhasil dibuat juga memiliki dimensi pori atau lubang kawat kasa aluminium yang sama, dengan ketebalan yang sama pula (0,03 mm). Meskipun ukuran lain (selain panjang filter) dari filter dibuat konstan, terdapat penggunaan kawat tembaga (diameter 0,15 mm) dengan jumlah lilitan yang berbeda-beda, mengikuti panjang dari filter. F3 memiliki jumlah lilitan terbesar, yakni sebesar 11 lilitan. F1 dan F2 memiliki berturut-turut 6 dan 7 buah lilitan. Hal ini menunjukkan bahwa Filter 3 memiliki jumlah lilitan yang paling besar dibandingkan dua buah filter lainnya. Hal ini secara tidak langsung juga menunjukkan adanya pengaruh yang diberikan oleh jumlah lilitan tembaga terhadap efisiensi tiap-tiap filter *reheated*. Perbedaan jumlah lilitan yang sangat besar antara F1-2 dengan F3 mengakibatkan adanya perbedaan respon. Disisi lain F1 dan F2 memiliki jumlah lilitan yang hamper sama sehingga memiliki respon yang hamper sama.

Di dalam peristiwa perambatan kalor atau energi panas, dikenal istilah konduksi, konveksi, dan radiasi. Pengembangan filter yang telah dilakukan berbasis pada salah satu prinsip perambatan kalor di atas, yakni radiasi. Di dalam prinsip radiasi ini, kalor atau energi panas (Q) berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya tanpa melalui perantara apapun. Di dalam prinsip radiasi, dikenal istilah laju perpindahan kalor (P) atau Hukum Stefan-Boltzmann persamaan (4.3-4):

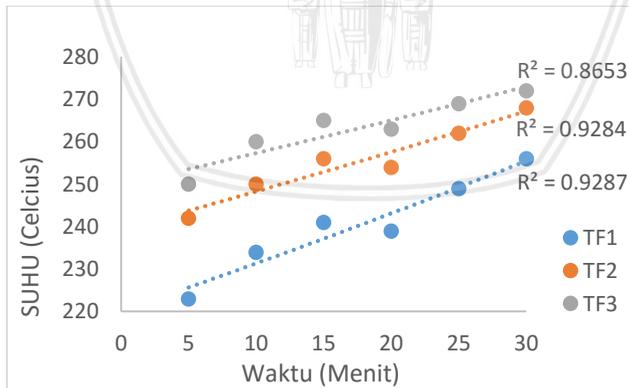
$$P = \frac{Q}{t} \quad (4.3)$$

$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (4.4)$$

di mana:

- t : waktu (s)
- e : emisivitas filter
- σ : konstanta Stefan-Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
- A : luas penampang filter (m^2)
- T : temperatur mutlak (K)

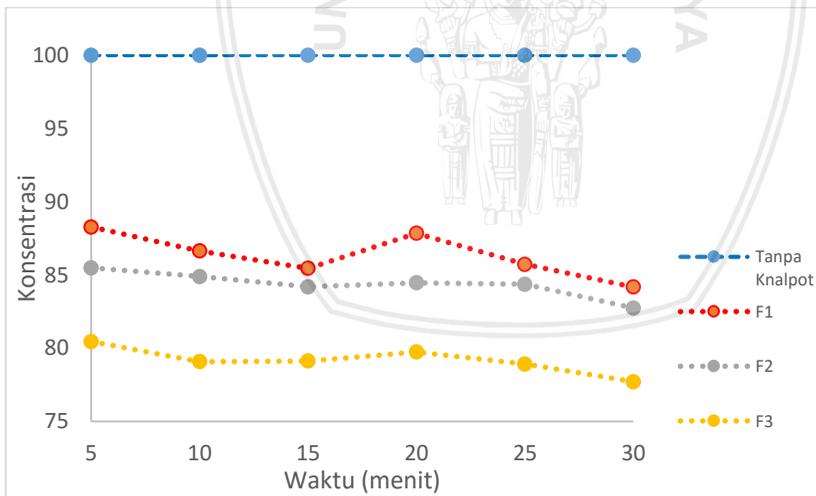
Dikarenakan filter yang dibuat memiliki warna hitam, maka nilai e adalah sebesar 1. Dari persamaan pada Hukum Stefan-Boltzmann di atas, nilai P hanya bergantung pada besaran temperatur T dan luas penampang filter (A) sebagai bahan pemancar radiasi. Dari persamaan tersebut, juga diketahui bahwa semakin tinggi kenaikan temperatur kalor yang dipancarkan oleh sumber, akan mengakibatkan kenaikan daya radiasi yang dipancarkan oleh filter akibat adanya hubungan lurus antara P dengan T . Di sisi lain, semakin luas nilai dari A akan mengakibatkan semakin besar nilai P (**Gambar 4.5**). Hasil penelitian memiliki tendensi dengan Hukum Stefan-Boltzmann, di mana Filter 3 yang memiliki nilai A terbesar memiliki efisiensi tertinggi. Hasil tersebut diakibatkan karena pancaran energi kalor secara radiasi oleh Filter 3 yang lebih besar dibandingkan menggunakan filter-filter lainnya yang memiliki nilai A yang jauh lebih kecil. Selain dipengaruhi oleh A , hasil pengukuran temperatur pada ruang knalpot atau *compartment 1* tempat filter dipasang juga menunjukkan bahwa Filter 3 memiliki temperatur tertinggi, yakni sebesar 523 hingga 545K (temperatur mutlak). Filter 1 dan Filter 2 hanya memiliki temperatur sebesar 529 dan 541K. Dari hasil pengukuran ini, diketahui bahwa Filter 1 memiliki paling sedikit daya radiasi kalor, sehingga efisiensi yang dihasilkan adalah yang terkecil. Jadi semakin besar nilai kalor maka semakin besar pula daya yang dapat digunakan untuk memanaskan $PM_{2.5}$.



Gambar 4. 5 Suhu filter *reheating system* (bawah ke atas) F1, F2, dan F3

Fakta bahwa terdapat penggunaan lilitan tembaga sebagai *coil* memberikan nilai tambah dari proses radiasi, di mana semakin banyak *coil* yang digunakan akan mengakibatkan semakin besar nilai A . Kembali merujuk pada persamaan (4.3-4), kenaikan nilai A menyebabkan kenaikan nilai P .

Hasil yang cukup menarik diperoleh pada *trendline* efisiensi, saat dilakukan aproksimasi hubungan antara waktu (dalam s) dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ (dalam mg/m^3 , **Gambar 4.6**). Hubungan keduanya ditunjukkan oleh sebuah garis dengan persamaan eksponensial.. Secara statistik ini menunjukkan bahwa pengaruh variabel waktu (t) terhadap persentase penurunan konsentrasi $PM_{2.5}$ sangatlah kecil (hanya sebesar 12% - 25%). Hasil yang diperoleh ini kurang sesuai (bersifat anomali) dengan persamaan (4.4), di mana semakin lama waktu yang digunakan akan menyebabkan semakin besar nilai Q . Padahal, data yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin besar nilai t mengakibatkan semakin besar nilai efisiensi atau secara tidak langsung menunjukkan peningkatan nilai Q . Hasil yang berbeda ini dimungkinkan dipengaruhi oleh banyak hal yang tidak diukur di dalam penelitian ini.



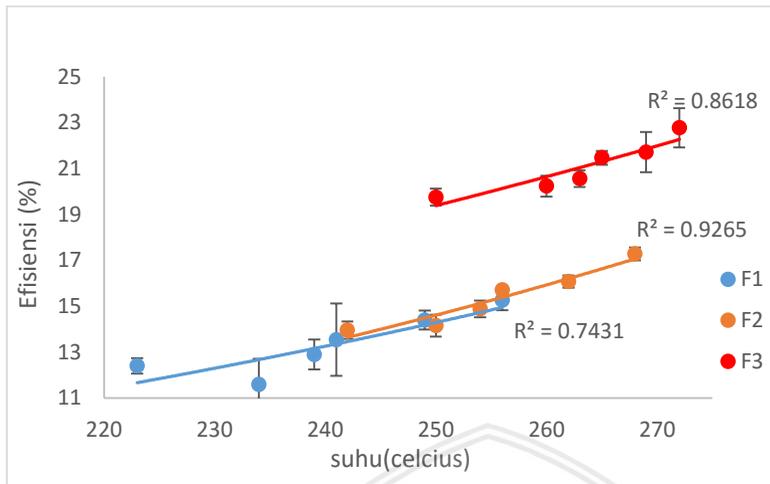
Gambar 4.6 Penurunan konsentrasi $PM_{2.5}$

Untuk sedikit memperjelas permasalahan ini, persamaan (4.3) dan (4.4) dapat memunculkan asumsi akan pengaruh t terhadap nilai Q :

$$Q = t \cdot e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (4.5)$$

Persamaan (4.5) di atas menunjukkan bahwa semakin lama terjadi proses radiasi, maka jumlah energi kalor yang dipancarkan akan semakin tinggi. Persamaan di atas menunjukkan bahwa nilai t akan mempengaruhi besar nilai Q .

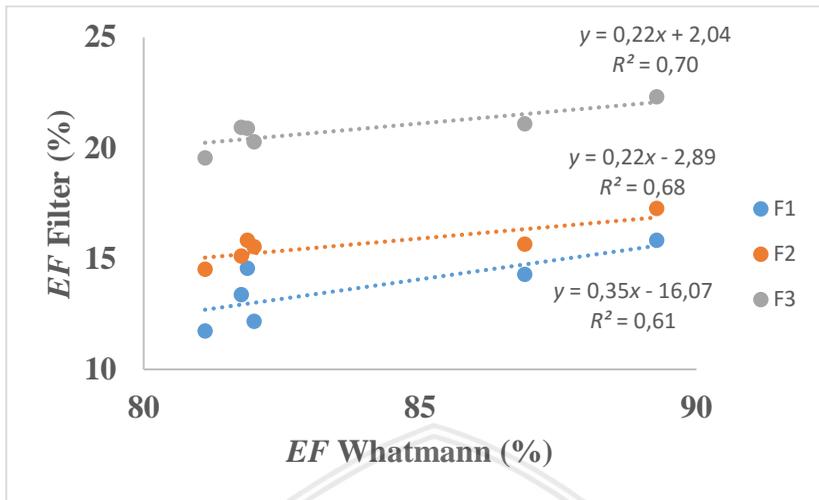
Adanya peristiwa anomali dapat diakibatkan oleh adanya peristiwa *heating loss* (Aklis, 2006; Primayudi & Nugroho, 2015). Peristiwa *heating loss* merujuk pada adanya suatu keadaan di mana terjadi energi yang terbuang yang mengakibatkan efisiensi menurun atau mengalami anomali. Pada saat terjadi aliran fluida yang panas dari mesin, sejumlah konsentrasi $PM_{2.5}$ akan mengalir menuju ruang 1 tempat di mana filter dipasang. Pada zona filtrasi ini, aliran fluida tersebut akan terhambat oleh tepi atau kisi-kisi dari filter yang mengakibatkan terjadinya vorteks berupa *turbulent flow*. Dari zona filtrasi ini, $PM_{2.5}$ dialirkan menuju ruang panas pada area ruang 1 tanpa mengalami pendinginan. Secara teoritis, adanya temperatur yang sangat tinggi mengakibatkan proses radiasi berlangsung secara normal. Faktanya, terdapat beberapa bagian dari filter yang digunakan masih kurang *rigid* (kokoh). Beberapa bagian dari *coil* belum menempel secara *rigid* pada kasa aluminium, yang mengakibatkan proses radiasi oleh filter belum maksimal. Selain itu *filter frame* yang dipasang di zona filtrasi dimungkinkan belum terpasang secara sempurna akibat pemasangan kawat tembaga yang kurang kuat dan *unsteady*. Selain masalah *filter frame* dan *filter coil*, terdapat *fly ash* dan *bottom ash* yang ikut menempel pada saat filter selesai diaplikasikan (kerak dan serbuk-serbuk hitam yang menempel di filter). *Fly ash* dan *bottom ash* yang berasal dari sisa-sisa pembakaran yang tidak terbakar secara sempurna ini dapat mengakibatkan terganggunya proses radiasi dan mengakibatkan *heat loss* (Primayudi & Nugroho, 2015). *Heating loss* dapat diakibatkan oleh adanya *fractional loss* pada tiap-tiap sambungan *filter frame* dan *filter coil*, serta pipa pembuangan pada knalpot.



Gambar 4.7 Hubungan suhu terhadap efisiensi

Grafik diatas menunjukkan persentase dari filter terhadap suhu dapat dilihat pada F1 persentase efisiensi dari filter berkisar 12% dengan suhu 220 derajat selsius yang menunjukkan kondisi awal motor uji. Kemudian persentase ahir efisiensi F1 dapat dilihat berkisar pada 15% dan suhu yang didapat 256 derajat selsius. Selanjutnya persentase efisiensi F2 dapat dilihat berkisar pada 13% untuk kondisi awal dengan suhu F2 242 derajat dan presentase ahir mencapai 17% dengan suhu pada F2 mencapai 268 derajat selsius. Pada F3 memiliki persentase terbaik yakni 19% pada keadaan awal dengan suhu yang didapat yakni 250 derajat selsius dan pada persentase efisiensi ahir F3 dihasilkan 23% dengan suhu ahir pada F3 mencapai 272 derajat selsius. Dapat dilihat dengan penambahan panjang dari filter mempengaruhi persentase efisiensi dan berpengaruh pula pada kenaikan suhu yang didapat.

Hasil efisiensi yang diperoleh menunjukkan adanya perbedaan nilai dengan beberapa filter yang telah ada sebelumnya. Sebagai perbandingan dapat digunakan filter standar yang telah terkalibrasi, yakni kertas filter Whatmann (tipe 5 dan GF/B). Kertas filter tersebut dapat menyaring partikulat secara porositas dengan diameter spesifik 1-2.5µm. tingkat efisiensi kertas filter tersebut berkisar antara 81-89%. Hasil tersebut memiliki perbedaan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan F1-F3 (**Gambar 4.8**) dengan nilai $p < 0,05$ dengan tingkat batas kritis 0,05



Gambar 4.8 Perbandingan antara *EF* Whatmann terhadap *EF*

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara *EF* Whatmann dengan *EF* dari filter reheated dimana filter dimana terdapat perbedaan yang signifikan antara keduanya hal ini disebabkan oleh sistem dari Whatmann menggunakan porositas filter. Whatmann sendiri sering digunakan untuk memfilter partikulat yang sering diterapkan untuk penggunaan pada masker, penyulingan bahan kimia dan lain lain. Pada dasarnya Whatmann berfungsi untuk menyaring partikulat yang berukuran 1μ keatas. Grafik diatas menunjukkan bahwa Whatmann memiliki efisien lebih besar dibanding dengan reheated karena pada Whatmann sendiri memiliki sistem blocking untuk partikulat dengan diameter yang telah disebutkan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari penelitan yang telah dilakukan di dapatkan desain filter *reheating system* dengan bahan kasa alumunium dengan panjang 4, 5, dan 6 cm dan lebar silider diameter 2,7 cm
2. Filter reahating yang terbuat dari kasa alumunium dengan panjang 6 cm memiliki tingkat penurunan konsentrasi yang paling baik dari yang lain dengan efisiensi sebesar 20%, panjang 5 cm memiliki penurunan konsentrasi sebesar 84 dengan efisiensi 17%, dan panjang 4 cm memiliki penurunan konsentrasi sebesar 79 dan efisiensi 14%.
3. Efisiensi filter terbaik adalah filter F3 yakni dengan panjang 6cm dengan diameter 2,7 dengan prosentase 20% sampai dengan 25%.

5.2 Saran

Disarankan untuk penelitian selanjutnya agar penggunaan variasi bahan juga agar bisa diketahui apakah bahan juga dapat mempengaruhi besar efisiensi atau tidak. Merujuk pada penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat variasi panjang dengan bahan yang sama dapat dihasilkan efisiensi yang berbeda. Serta disarankan untuk penelitian selanjutnya untuk menggunakan panjang filter yang terpanjang untuk variasi perbedaan jenis bahan filter. Menguji filter untuk jenis kendaraan bermotor lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, J. L., Siwinski, G., & Hunt, A. (2002). Ultrafine particulate exposures in indoor, outdoor, personal and mobile environments: Effects of diesel, traffic, pottery kiln, cooking and HEPA filtration on micro-environmental particle number concentration. *Annals of Occupational Hygiene*, *46*, 406–411. <https://doi.org/10.1093/annhyg/46.suppl-1.406>
- Aklis, N. (2006). Direct Reduction Plant Pt . Krakatau Steel, *7*(2), 63–69.
- Autrup, H. (2010). Ambient air pollution and adverse health effects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *2*(5), 7333–7338. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.05.089>
- Badan Pusat Statistik. (2015). STATISTIK LINGKUNGAN HIDUP INDONESIA 2015.
- Bazanovas, A. N., Evstifeev, A. I., Khaiboullina, S. F., Sadreev, I. I., Skorinkin, A. I., & Kotov, N. V. (2015). Erythrocyte: A systems model of the control of aggregation and deformability. *BioSystems*, *131*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2015.03.003>
- Buonanno, G., Stabile, L., & Morawska, L. (2014). Personal exposure to ultrafine particles: The influence of time-activity patterns. *Science of the Total Environment*, *468–469*, 903–907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.016>
- Charron, A., & Harrison, R. M. (2003). Primary particle formation from vehicle emissions during exhaust dilution in the roadside atmosphere. *Atmospheric Environment*, *37*(29), 4109–4119. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00510-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00510-7)
- Chiang, H.-L., Huang, P.-H., Lai, Y.-M., & Lee, T.-Y. (2014). Comparison of the regulated air pollutant emission characteristics of real-world driving cycle and ECE cycle for motorcycles. *Atmospheric Environment*, *87*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.031>
- Delfino, R. J., Sioutas, C., & Malik, S. (2005). Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives*, *113*(8), 934–946. <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>
- Donaldson, K., Brown, D., Clouter, A., Duffin, R., MacNee, W., Renwick, L., ... Stone, V. (2002). The Pulmonary Toxicology

- of Ultrafine Particles. *Journal of Aerosol Medicine*, 15(2), 213–220. <https://doi.org/10.1089/089426802320282338>
- El-Fiki, S., El Kameesy, S. U., El Nashar, D. E., Abou-Leila, M. A., El-Mansy, M. K., & Ahmed, M. (2015). Influence of Bismuth Contents on Mechanical and Gamma Ray Attenuation Properties of Silicone Rubber Composite Influence of Bismuth Contents on Mechanical and Gamma Ray Attenuation Properties of Silicone Rubber Composite. *International Journal of Advance Research*, 3(6), 1035–1039.
- Etheridge, D., Luhar, A., Loh, Z., Leuning, R., Spencer, D., Steele, P., ... Van Der Schoot, M. (2011). Atmospheric monitoring of the CO2CRC Otway Project and lessons for large scale CO2 storage projects. *Energy Procedia*, 4, 3666–3675. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.298>
- Grimm, H., Pesch, M., & Gonzalez, M. A. (2015). Semi volatile compounds (SVC) in PM values. *Procedia Engineering*, 102, 1156–1159. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.240>
- Hart, J. E., Liao, X., Hong, B., Puett, R. C., Yanosky, J. D., Suh, H., ... Laden, F. (2015). The association of long-term exposure to PM_{2.5} on all-cause mortality in the Nurses' Health Study and the impact of measurement-error correction, 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12940-015-0027-6>
- Huang, K.-L., Lee, Y.-H., Chen, H.-I., Liao, H.-S., Chiang, B.-L., & Cheng, T.-J. (2015). Zinc oxide nanoparticles induce eosinophilic airway inflammation in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 297, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.023>
- Jain, A. K. (2007). Global estimation of CO emissions using three sets of satellite data for burned area. *Atmospheric Environment*, 41(33), 6931–6940. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.021>
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kanomax Inc. (2012). Light Scattering Digital Dust Monitor Model 3443 Operation Manual.
- Liu, J., Han, Y., Tang, X., Zhu, J., & Zhu, T. (2016). Science of the Total Environment Estimating adult mortality attributable to PM_{2.5} exposure in China with assimilated PM_{2.5} concentrations based on a ground monitoring network. *Science*

- of the *Total Environment, The*, 568, 1253–1262.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.165>
- Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E. R., Keogh, D. U., & Ling, X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8113–8138.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>
- Morawska, L., & Zhang, J. (2002). Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. *Chemosphere*, 49(9), 1045–1058. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00241-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00241-2)
- Nussbaumer, T., & Lauber, A. (2015). Monitoring the availability of electrostatic precipitators (ESP) in automated biomass combustion plants. *Biomass and Bioenergy*, 89, 24–30.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.027>
- Pawestri, M. A., Wardoyo, A. Y. P., & Yuana, F. (2014). Sistem Filter PM_{2,5} Berbahan Campuran Serbuk Sabut Kelapa Dan Lem Kanji Dengan Perbandingan 50:50, 1, 1–4.
- Primayudi, A., & Nugroho, A. (2015). Analisa Kehilangan Energi Pada Fire Tube Boiler Kapasitas 10 Ton, 4(2), 38–43.
- Quoc, B., Clappier, A., & Carlo, M. (2011). Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies : A case of Ho Chi Minh City , Vietnam. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3584–3593.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.073>
- Sabaliauskas, K., Evansa, G., & Jeonga, C.-H. (2012a). Source Identification of Traffic-Related Ultrafine Particles Data Mining Contest. *Procedia Computer Science*, 13, 99–107.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.118>
- Sabaliauskas, K., Evansa, G., & Jeonga, C.-H. (2012b). Source Identification of Traffic-Related Ultrafine Particles Data Mining Contest. *Procedia Computer Science*, 13, 99–107.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.118>
- Sioutas, C., Delfino, R. J., & Singh, M. (2005). Exposure assessment for atmospheric Ultrafine Particles (UFPs) and implications in epidemiologic research. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 947–955. <https://doi.org/10.1289/ehp.7939>
- Tan, Z. (2014). Air Pollution and Greenhouse Gases.
<https://doi.org/10.1007/978-981-287-212-8>
- Wahyuningrum, A., Wardoyo, A. Y. P., & Darmawan, H. A. (2004).

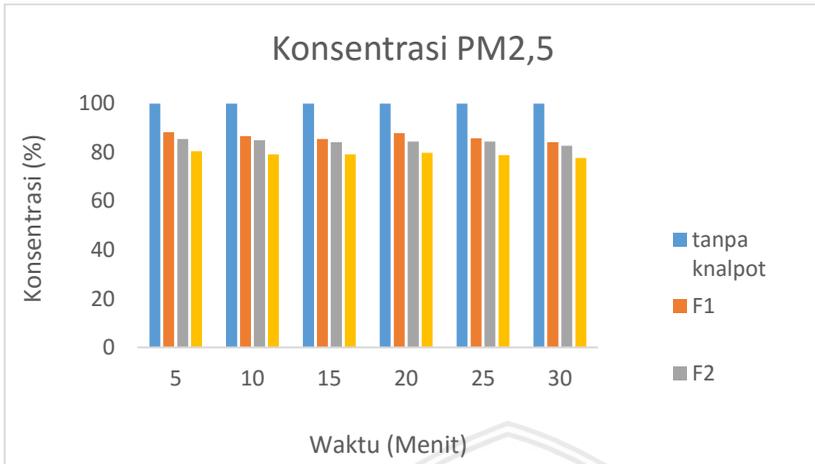
Sistem Filtering Berbahan Serabut Kelapa Untuk Emisi Partikulat PM 2,5 (Particulate Matter 2,5) dari Sepeda Motor. *Physics Student Journal*, 1, 10–12.

- Wardoyo, A. Y. P. (2016). *Emisi partikulat kendaraan bermotor dan dampak kesehatan* (1st ed.). Malang: UB Media.
- Wardoyo, A. Y. P. (2017). Developing Reheated Filter of Motorcycle Exhaust for Reducing PM 2 . 5 Emissions, 42–45.
- Wardoyo, A. Y. P., & Budianto, A. (2017). A DC Low Electrostatic Filtering System For PM 2.5 Motorcycle Emission. *IEEE Xplore*, 1, 51–54.
- Wardoyo, A. Y. P., Budianto, A., & Abdurrouf. (2017). Filtration of Submicron Particles From Motorcycle Emission Using a DC Low Electrostatic Filter. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(8), 1725–1728.
- Wardoyo, A. Y. P., Juswono, U. P., Noor, J. A. E., & Samples, A. M. (2016). Measurements of PM 2 . 5 Motor Emission Concentrations and the Lung Damages From the Exposure Mice, 3, 99–103.
- Wardoyo, A. Y. P., Juswono, U. P., & Riyanto, S. (2016). Developing particulate thin filter using coconut fiber for motor vehicle emission. *AIP Conference Proceedings*, 1719, 30043-1-030043–030044. <https://doi.org/10.1063/1.4943738>
- Wardoyo, A. Y. P., Morawska, L., Ristovski, Z. D., Jamriska, M., Carr, S., & Johnson, G. (2007). Size distribution of particles em1. Wardoyo AYP, Morawska L, Ristovski ZD, Jamriska M, Carr S, Johnson G. Size distribution of particles emitted from grass fires in the Northern Territory, Australia. *Atmos. Environ.* [Internet]. 2007;41:8609–8619. Availabl. *Atmospheric Environment*, 41(38), 8609–8619. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.020>
- Wardoyo, A. Y. P., Morawska, L., Ristovski, Z. D., & Marsh, J. (2006). Quantification of particle number and mass emission factors from combustion of Queensland trees. *Environmental Science {&} Technology*, 40(18), 5696–5703. <https://doi.org/10.1021/es0609497>
- Xu, X., Zheng, C., Yan, P., Zhu, W., Wang, Y., Gao, X., ... Cen, K. (2016). Effect of electrode configuration on particle collection in a high-temperature electrostatic precipitator. *Separation and Purification Technology*, 166, 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.04.039>

LAMPIRAN

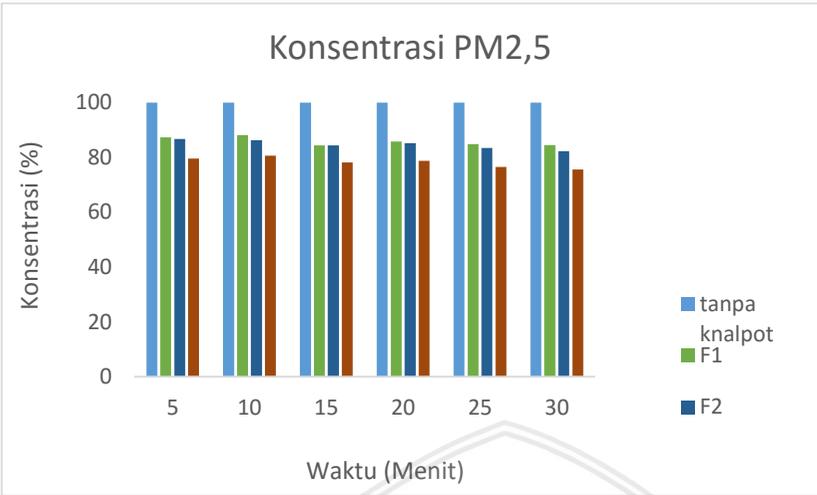
Lampiran 1. Data hasil pengukuran motor 1

Time (minute)	Concentration of PM _{2.5} (x10 ³ mg/m ³)																							
	Tanpa Knalpot				Standar				F1				F2				F3				F0			
	Data	Mean	SD		Data	Mean	SD		Data	Mean	SD		Data	Mean	SD		Data	Mean	SD		Data	Mean	SD	
5	35				30				31				29				33				33			
	35				30				30				29				35				34			
	35	36	0		30	30	0		31	32	0		31	31	0		29	29	0		34	34	0	
	37				30				31				29				34				34			
10	35				30				31				28				33				35			
	35				30				30				28				33				33			
	34	34	0		32	30	0		29	30	0		27	29	0		33	27	0		33	33	0	
	34				30				30				27				33				32			
15	33				28				27				24				30				30			
	30				28				27				25				29				29			
	32	32	1		27	28	0		27	27	0		27	27	0		25	25.00	0		30	29.20	0	
	31				29				27				26				26				28			
20	31				30				25				23				28				28			
	30				26				26				23				28				28			
	29	30	0		27	28	1		26	26	0		24	25	0		24	23.60	0		28	28.00	0	
	29				26				26				24				24				29			
25	29				27				25				24				27				27			
	30				28				25				24				28				28			
	30				28				25				24				27				27			
	29	29	0		27	27	0		25	25	0		22	23.20	0		28	23.20	0		28	27.60	0	
30	29				27				24				23				27				28			
	28				29				23				22				26				27			
	28				29				23				22				26				28			
	27	28	0		23	23.40	0.24		22	23	0.32		21	21.60	0		25	21.60	0		25	25.60	0	
27				23				23				22				24				26				



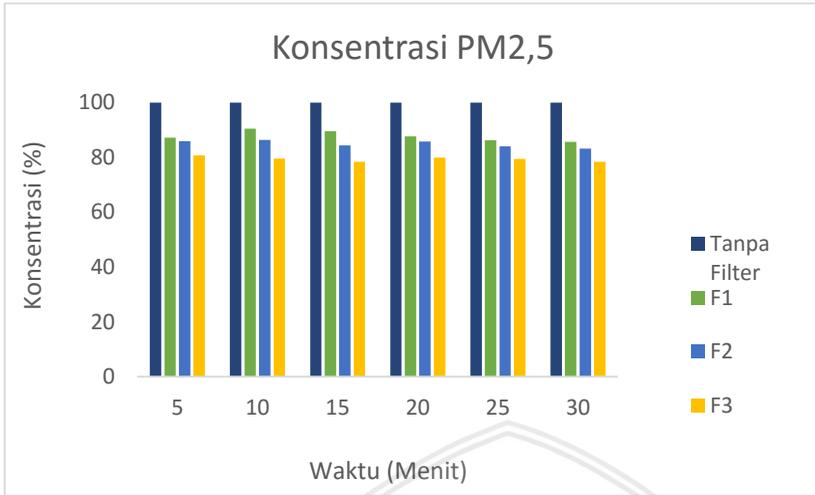
Lampiran 2. Data hasil pengukuran motor 2

Time (minute)	Concentration of PM _{2.5} (x10 ³ mg/m ³)																							
	Tanpa Knalpot						Standar			F0			F1			F2			F3					
	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD			
5	33	33	0	23	23	0	32	32	0	29	29	0	28	28	0	27	27	0	26	26	0			
	33	33	0	24	23	0	32	29	0	29	29	0	29	29	0	27	27	0	26	26	0			
	34	33	0	23	23	0	32	29	0	29	29	0	28	28	0	29	29	0	26	26	0			
	33	33	0	23	23	0	32	28	0	29	29	0	28	28	0	28	28	0	25	25	0			
	33	33	0	24	23	0	31	30	0	30	30	0	27	27	0	26	26	0	26	26	0			
10	32	32	0	21	21	0	31	29	0	29	29	0	29	29	0	26	26	0	26	26	0			
	32	32	0	22	21	0	31	28	0	28	28	0	27	27	0	26	26	0	26	26	0			
	32	32	0	22	21	0	31	28	0	28	28	0	28	28	0	26	26	0	26	26	0			
	32	32	0	20	21	0	30	28	0	28	28	0	27	27	0	26	26	0	26	26	0			
	32	32	0	21	21	0	30	28	0	28	28	0	27	27	0	25	25	0	26	26	0			
15	32	32	0	19	19	0	28	27	0	27	27	0	27	27	0	25	25	0	25	25	0			
	32	32	0	21	19	1	29	27	0	27	27	0	27	27	0	26	26	0	24	24	0			
	32	32	0	20	19	0	30	28	0	28	28	0	28	28	0	26	26	0	24	24	0			
	32	32	0	19	19	0	30	26	0	26	26	0	26	26	0	24	24	0	24	24	0			
	32	32	0	18	19	0	29	27	0	27	27	0	27	27	0	26	26	0	24	24	0			
20	31	31	0	22	22	0	30	26	0	26	26	0	26	26	0	25	25	0	24	24	0			
	31	31	0	24	23	0	30	27	0	27	27	0	26	26	0	25	25	0	24	24	0			
	31	31	0	23	23	0	28	27	0	27	27	0	26	26	0	25	25	0	24	24	0			
	31	31	0	24	23	0	30	26	0	26	26	0	27	27	0	24	24	0	24	24	0			
	31	31	0	23	23	0	29	27	0	27	27	0	26	26	0	24	24	0	24	24	0			
25	29	29	0	20	20	0	28	25	0	25	25	0	24	24	0	22	22	0	22	22	0			
	29	29	0	20	20	0	28	25	0	25	25	0	24	24	0	22	22	0	22	22	0			
	29	29	0	20	20	0	27	24	0	24	24	0	25	25	0	22	22	0	22	22	0			
	29	29	0	19	19	0	26	25	0	25	25	0	24	24	0	22	22	0	22	22	0			
	29	29	0	19	19	0	27	24	0	24	24	0	24	24	0	22	22	0	22	22	0			
30	27	27	0	17	17	0	24	23	0	23	23	0	21	21	0	20	20	0	20	20	0			
	27	27	0	18	17	0	24	23	0	23	23	0	22	22	0	20	20	0	20	20	0			
	27	27	0	18	17	0	25	22	0	22	22	0	22	22	0	20	20	0	20	20	0			
	27	27	0	17	17	0	25	22	0	22	22	0	23	23	0	21	21	0	21	21	0			
	27	27	0	17	17	0	27	24	0	24	24	0	23	23	0	21	21	0	21	21	0			



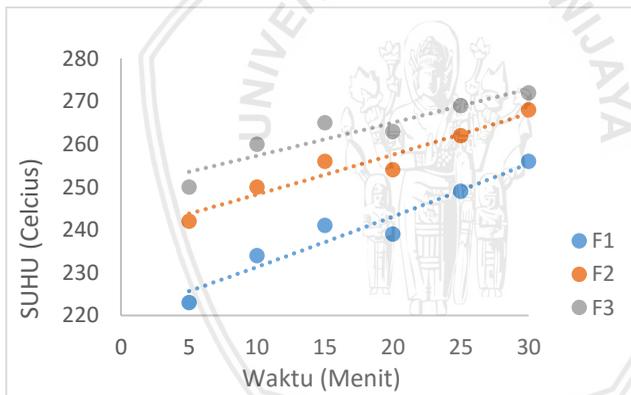
Lampiran 3. Data hasil pengukuran motor 3

Time (minute)	Concentration of PM _{2.5} (x10 ⁻³ mg/m ³)																							
	Tanpa Knalpot						Standar			F1			F2			F3			F0					
	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD	Data	Mean	SD			
5	31	25	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	30	30	0	
	31	25	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	30	30	0	
	31	24	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	29	29	0	
	31	24	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	29	29	0	
	32	25	28	28	28	0	28	28	0	28	28	0	28	28	0	28	28	0	28	28	0	31	31	0
	29	24	26	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	29	29	0
10	29	23	23	23	0	23	23	0	23	23	0	23	23	0	23	23	0	23	23	0	28	28	0	
	29	23	23	23	0	23	23	0	23	23	0	23	23	0	23	23	0	23	23	0	28	28	0	
	30	22	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	28	28	0	
	30	23	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	28	28	0	
	27	26	25	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0
	27	26	24	24	24	0	24	24	0	24	24	0	24	24	0	24	24	0	24	24	0	25	25	0
15	27	27	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	26	26	0	
	27	27	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	26	26	0	
	26	27	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	26	26	0	
	27	27	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	26	26	0	
	31	24	28	28	28	0	28	28	0	28	28	0	28	28	0	28	28	0	28	28	0	29	29	0
	31	24	27	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	31	31	0
20	31	31	31	31	0	31	31	0	31	31	0	31	31	0	31	31	0	31	31	0	30	30	0	
	31	31	31	31	0	31	31	0	31	31	0	31	31	0	31	31	0	31	31	0	30	30	0	
	31	25	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	27	27	0	30	30	0	
	30	25	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	29	29	0	
	27	23	22	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	26	26	0
	26	23	22	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	25	25	0
25	26	26	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	25	25	0	
	26	26	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	25	25	0	
	26	26	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	25	25	0	
	26	26	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	26	26	0	25	25	0	
	25	25	21	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	23	23	0
	25	25	21	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	23	23	0
30	25	25	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	23	23	0	
	25	25	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	23	23	0	
	25	25	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	25	25	0	23	23	0	
	26	24	22	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	23	23	0
	24	24	22	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	22	22	0	23	23	0
	24	26	21	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	0	24	24	0



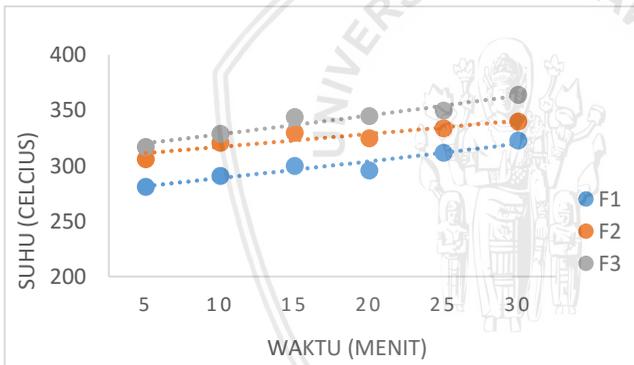
Lampiran 4. Data hasil pengukuran suhu motor 1

Suhu M1			
Time	TF1	TF2	TF3
5	223	242	250
10	234	250	260
15	241	256	265
20	239	254	263
25	249	262	269
30	256	268	272
Mean	240	255	263



Lampiran 5. Data hasil pengukuran suhu motor 2

Suhu M2			
Time	TF1	TF2	TF3
5	281	306	317
10	291	321	329
15	300	330	344
20	296	325	345
25	312	334	350
30	323	340	364
Mean	301	326	342



Lampiran 6. Data hasil pengukuran suhu motor 3

Suhu M3			
Time	TF1	TF2	TF3
5	266	275	279
10	274	278	284
15	278	280	289
20	274	277	286
25	282	285	293
30	285	288	300
Mean	277	281	289

