



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGUKURAN DENSITAS KEPULAN ASAP DARI  
PEMANASAN MATERIAL POLIMER SEBAGAI DASAR  
UNTUK PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI ASAP  
BERBASIS CITRA**

**SKRIPSI**

**FAKHRURROZI**

**0706266992**

**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM  
STUDI TEKNIK MESIN DEPOK**

**JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGUKURAN DENSITAS KEPULAN ASAP DARI  
PEMANASAN MATERIAL POLIMER SEBAGAI DASAR  
UNTUK PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI ASAP  
BERBASIS CITRA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**FAKHRURROZI**

**0706266992**

**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM**

**STUDI TEKNIK MESIN DEPOK**

**JULI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### **PENGUKURAN DENSITAS KEPULAN ASAP DARI PEMANASAN MATERIAL POLIMER SEBAGAI DASAR UNTUK PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI ASAP BERBASIS CITRA**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Skripsi ini merupakan bagian dari skripsi yang dikerjakan bersama dengan rekan saya saudara Tri Cahyu Wibowo (0706267383) sehingga harap maklum jika terdapat beberapa bagian dari buku ini yang memiliki kesamaan.

Nama : Fakhurrozi

NPM : 0706266992

Tanda Tangan



Tanggal : 12 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama Fakhurrozi  
NPM 0706266992  
Program Studi Tekn.ik Mesin  
Judul Skripsi Pengukuran Densitas Kepulan Asap Dari Pemanasan Material Polimer Sebagai Dasar Untuk Pengembangan Sistem Deteksi Asap Berbasis Citra.

Telah berhasil dipertahankan di depan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Ir. Yulianto Sulistyono Nugroho M.Sc., Ph.D

Penguji : Ardiyansyah, ST., MEng.

Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim, MEng.

Penguji : Dr.Ir.H. Danardono AS, DEA.



✓

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 Juli 2011

## KATA PENGANTAR

Puji serta syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa terlaksananya skripsi penulis dan selesainya laporan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua yang telah mendidik penulis sejak kecil hingga saat ini. Juga tak lupa pula untuk keluarga besar penulis yang telah menyokong dan memberikan semangat serta membantu kelancaran kuliah penulis.
2. Prof. Yulianto Nugroho sebagai pembimbing skripsi, seluruh dosen teknik mesin dan staf-staf DTM lainnya yang telah banyak membantu dalam proses pembuatan skripsi ini.
3. Tri Cahyo Wibowo selaku rekan seperjuangan skripsi, Arian Dwi Putra dan Hendra Gunawan selaku rekan Lab. Fire Safety, serta rekan-rekan mahasiswa departemen teknik mesin FTUI lainnya.
4. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian dan juga dalam penulisan skripsi ini sehingga penulis dapat menyelesaikannya.

Pada kesempatan ini penulis juga ingin mengucapkan maaf yang sebesar-besarnya kepada semua pihak atas kesalahan yang sengaja maupun tidak sengaja selama pelaksanaan penelitian. Dan juga penulis menyadari adanya ketidaksempurnaan dalam penyusunan skripsi ini karena keterbatasan pengetahuan penulis. Semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat.

Depok, 12 Juni 2011

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKADEMIS UNTUK KEPERLUAN JURNAL AKADEMIK

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang benanda tangan di bawah ini:

Nama                   Fakhrurrozi  
NPM                    0706266992  
Program Studi       Teknik Mesin  
Fakultas              Teknik  
Jenis karya           Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan yang saya nyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengukuran Densitas Keputihan Asap Dari Pemanasan Material Polimer Sebagai Dasar Untuk Pengembangan Sistem Deteksi Asap Berbasis Citra.

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di               : Depok

Pada tanggal        : 12 Juni 2011

Yang menyatakan



(Fakhrurrozi)

## ABSTRAK

Nama : Fakhurrozi  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Pengukuran Densitas Kepulan Asap Dari Pemanasan Material Polimer Sebagai Dasar Untuk Pengembangan Sistem Deteksi Asap Berbasis Citra.

Seiring dengan pesatnya penggunaan kamera pengawas di dalam maupun di luar gedung, maka dalam beberapa tahun terakhir berkembang teknik pendeteksian asap memanfaatkan CCD camera berbasis *computer vision*. Namun tidak begitu jelas atas dasar apa nilai *threshold* harus ditetapkan untuk memenuhi persyaratan keselamatan. Penelitian ini mencoba melanjutkan pengembangan sistem deteksi asap berbasis video dengan mencari karakter dari asap, baik secara fisik (*optical density*) maupun berbasis citra, dari berbagai material jenis polimer. Kemudian akan dicari korelasi antara karakteristik asap secara fisik terhadap karakteristik asap berbasis pengolahan citra, untuk dapat meningkatkan akurasi sistem deteksi asap berbasis video.

Kata kunci :

Pendeteksian asap, pengolahan citra, karakteristik asap, polimer, *optical density*.

## ABSTRACT

Name : Fakhurrozi  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Measurement of Smoke Plume Density Originated From Heating of Polymer Materials as a Basis For The Development of a Video Smoke Detection System.

Following the rapid expansion of surveillance video camera inside or outside the building, the development of smoke detection based on computer vision has increase as well in recent years. But it is still not very clear on what basis the threshold value of detection system for image processing should be set to meet the safety requirement. This research attempt to continue the development of smoke video detection by search for the characteristics of the smoke itself, physically (optical density) as well as digital imaging, from a variety of polymer materials. Afterwards this research will find out the correlation between them, in order to improving video smoke detection accuracy.

Keywords :

Smoke detection, image processing, smoke characteristics, polymer, optical density.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penulisan .....	3
1.4. Batasan Penelitian .....	3
1.5. Metodologi Penelitian .....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. Polimer .....	6
2.2. Karakteristik Termal.....	8
2.3. Panas Dari Aliran Arus Listrik.....	8
2.4. Asap.....	9
2.4.1. Produksi Asap .....	10
2.4.2. Pergerakan Asap.....	10
2.4.3. Optical Density.....	13
2.5. Pengolahan Citra .....	14
2.6. Korelasi Antara <i>Pixel Intensity</i> Dengan <i>Optical Density</i> .....	17
2.7. Sistem Deteksi Asap Berbasis Video .....	17
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	19

3.1.	Sistematika Penelitian .....	19
3.2.	Sampel Pengujian dan Perangkat Eksperimen .....	21
3.2.1.	Sampel Pengujian.....	21
3.2.2.	Alat Pemanas Kabel .....	23
3.2.3.	Alat Pengukur Temperatur.....	23
3.2.4.	Smoke Density Photometric System (DIN 50055) .....	24
3.2.5.	Kamera Perekam Video (CCD Camera).....	27
3.3.	Kalibrasi Perangkat Eksperimen .....	28
3.4.	Prosedur Eksperimen.....	30
3.5.	Pengolahan Data Video .....	32
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS .....		35
4.1.	Hubungan Karakteristik Material Dengan Asap .....	35
4.1.1.	Temperatur Permukaan Material.....	35
4.1.2.	Awal Kemunculan Asap .....	37
4.1.3.	Luas Asap.....	38
4.1.4.	<i>Smoke Plume Density</i> Pada Variasi Ketinggian.....	40
4.2.	Korelasi Pengukuran Langsung Dengan Metode Pengolahan Citra .....	46
BAB 5 PENUTUP .....		57
5.1.	Kesimpulan.....	57
5.2.	Saran .....	58
DAFTAR REFERENSI .....		59

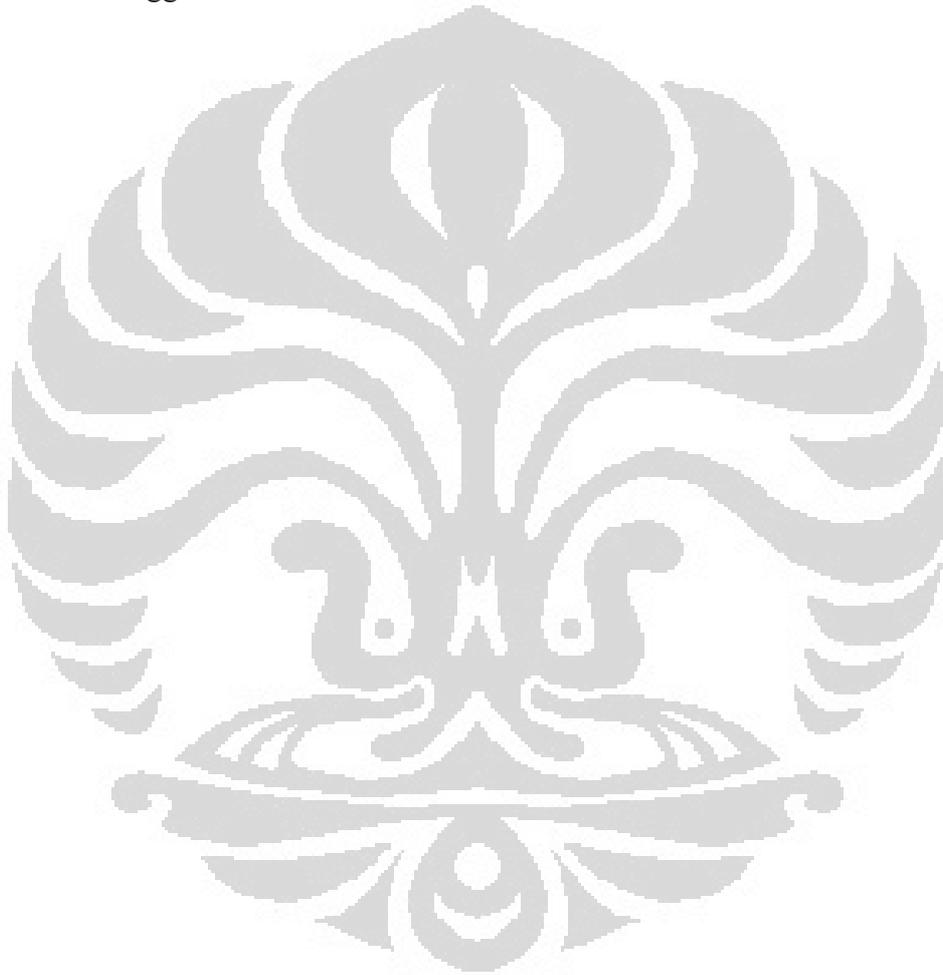
## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Berbagai metode perubahan fasa dari material solid menjadi uap . . .	1
<b>Gambar 2.2.</b> Skematis pembentukan material volatil, atau asap, dari polimer. ....	7
<b>Gambar 2.3.</b> Pemodelan <i>buoyant plume</i> (a) ideal, dan (b) mendekati kenyataan. .....	12
<b>Gambar 2.5.</b> Representasi dari sebuah citra digital, (a) koordinat <i>pixel</i> ,(b) bagi komputer, citra berupa susunan angka-angka intensitas [OpenCV] .....	15
<b>Gambar 2.6.</b> Histogram nilai pixel dari sebuah citra digital .....	16
<b>Gambar 2.7.</b> Hasil pengolahan sistem deteksi asap berbasis video, (a) citra sebenarnya, (b) citra <i>blob</i> .....	19
<b>Gambar 3.1.</b> Kabel NYA 2.5 mm <sup>2</sup> dengan lilitan 0.0.....	19
<b>Gambar 3.2.</b> Metode eksperimen skala lab.....	19
<b>Gambar 3.3.</b> Material Uji PVC.....	21
<b>Gambar 3.4.</b> Material Uji Foam.....	22
<b>Gambar 3.5.</b> Material Uji Karet.....	22
<b>Gambar 3.6.</b> FLUKE <sup>®</sup> Infrared Thermometers 568 Series. ....	23
<b>Gambar 3.7.</b> Hubungan antara jarak dan area pengukuran <i>Infrared Thermometers</i> .....	24
<b>Gambar 3.8.</b> Smoke Density Photometric System (DIN 50055).....	25
<b>Gambar 3.9.</b> Gambar skematis sumber cahaya.....	25
<b>Gambar 3.10.</b> Gambar skematis penerima cahaya. ....	26
<b>Gambar 3.11.</b> Tampilan <i>control unit</i> pada DIN 50055.....	26
<b>Gambar 3.12.</b> CCD Camera (a) IP Camera Vivotek <sup>®</sup> IP7132, (b) TelView <sup>®</sup> WPC 236 IR.....	28
<b>Gambar 3.14.</b> Perangkat kalibrasi DIN 50055 (a) lensa kalibrasi (b) sertifikat kalibrasi (c) penyangga lensa. ....	29
<b>Gambar 3.15.</b> Hasil kalibrasi densitas DIN 5005. ....	30
<b>Gambar 3.16.</b> Variasi ketinggian pengukuran densitas asap.....	31
<b>Gambar 3.17.</b> <i>Software Club Video Decompiler</i> <sup>®</sup> .....	32
<b>Gambar 3.15.</b> Pengukuran pixel intensity dengan ImageJ <sup>®</sup> (a) Citra asap (b) Histogram dari citra.....	33
<b>Gambar 4.1.</b> Perbandingan laju kenaikan temperatur kabel dan polimer.....	36
<b>Gambar 4.2.</b> Perbandingan awal kemunculan asap pada berbagai polimer. ....	37
<b>Gambar 4.3.</b> Frame video hasil pendeteksian dan blob-nya.....	38
<b>Gambar 4.4.</b> Grafik perbandingan luas asap polimer dari waktu ke waktu.....	39

<b>Gambar 4.5.</b> Tinggi momentum jet sebagai fungsi dari kecepatan, serta perubahan aliran dari laminar menuju turbulen. ....	41
<b>Gambar 4.6.</b> <i>Smoke Plume Density</i> PVC pada variasi ketinggian.....	43
<b>Gambar 4.7.</b> <i>Smoke Plume Density</i> karet pada variasi ketinggian. ....	44
<b>Gambar 4.8.</b> <i>Smoke Plume Density</i> foam pada variasi ketinggian. ....	45
<b>Gambar 4.9.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> PVC maksimum terhadap waktu. ....	46
<b>Gambar 4.10.</b> Hasil korelasi PVC pada ketinggian maksimum. ....	47
<b>Gambar 4.11.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> PVC medium terhadap waktu. ....	47
<b>Gambar 4.12.</b> Hasil korelasi PVC pada ketinggian medium. ....	48
<b>Gambar 4.13.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> PVC minimum terhadap waktu. ....	48
<b>Gambar 4.14.</b> Hasil korelasi PVC pada ketinggian minimum. ....	49
<b>Gambar 4.15.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> karet maksimum terhadap waktu. ....	50
<b>Gambar 4.16.</b> Hasil korelasi karet pada ketinggian maksimum. ....	50
<b>Gambar 4.17.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> karet medium terhadap waktu. ....	51
<b>Gambar 4.18.</b> Hasil korelasi karet pada ketinggian medium.....	51
<b>Gambar 4.19.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> karet minimum terhadap waktu. ....	52
<b>Gambar 4.20.</b> Hasil korelasi karet pada ketinggian minimum. ....	52
<b>Gambar 4.21.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> foam maksimum terhadap waktu. ....	53
<b>Gambar 4.22.</b> Hasil korelasi foam pada ketinggian maksimum.....	53
<b>Gambar 4.23.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> foam medium terhadap waktu. ....	54
<b>Gambar 4.24.</b> Hasil korelasi foam pada ketinggian medium. ....	54
<b>Gambar 4.25.</b> Perbandingan <i>optical density</i> dan <i>pixel intensity</i> foam minimum terhadap waktu. ....	55
<b>Gambar 4.26.</b> Hasil korelasi foam pada ketinggian minimum.....	55

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Aturan fuzzy untuk klasifikasi asap. ....	18
<b>Tabel 3.1.</b> Karakteristik termal material.....	22
<b>Tabel 3.2.</b> Hasil pengukuran densitas menggunakan lensa kalibrasi. ....	30
<b>Tabel 4.1.</b> Bilangan Grashof aliran asap pada kondisi densitas optimum.....	42
<b>Tabel 4.2.</b> Nilai densitas ( $m^{-1}$ ) optimum asap berbagai material polimer pada variasi ketinggian. ....	45



## DAFTAR SIMBOL

$b$	radius plume (m)
$c$	<i>specific heat</i> (J/kg.K)
$c_p$	<i>specific heat</i> pada tekanan konstant
$Gr$	bilangan Garshof
$g$	konstanta percepatan gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
$I$	arus listrik (A)
$I$	intensitas sinar
$K$	<i>effective emission coefficient</i> ( $\text{m}^{-1}$ )
$k$	konduktivitas termal (W/m.K)
$L$	jarak (m)
$OD$	<i>optical density</i>
$Q_{\text{konvektif}}$	kalor konvektif dari sumber
$Q$	kalor (J)
$q''$	fluks kalor (W/m <sup>2</sup> )
$r$	radius (m)
$R$	tahanan listrik ( $\Omega$ )
$T$	temperatur (K)
$t$	waktu (s)
$u$	kecepatan aliran (m/s)
$v$	kecepatan linear (m/s)
$z$	tinggi (m)

### Huruf Yunani

$\alpha$	difusivitas termal ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\beta$	cooling modulus
$\rho$	massa jenis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

### Subscripts

o	nilai awal
$\infty$	lingkungan

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Api bersifat seperti dua sisi koin yang berbeda dan saling bertolak belakang, di satu sisi bermanfaat namun di sisi yang lainnya merugikan. Api bisa bermanfaat apabila dapat dikendalikan dengan baik, jika tidak api akan menjadi musibah yang disebut sebagai peristiwa kebakaran. Kebakaran yang bersifat merusak dapat muncul dimanapun, selama oksigen dan bahan bakar tersedia. Dengan bantuan sumber panas serta proses rentetan reaksi kimia dari bahan tersebut, maka kebakaran tak dapat dihindari lagi. Kebakaran dapat mengakibatkan jatuhnya korban jiwa, merusak lingkungan dan bangunan, serta dampak negatif lainnya.

Untuk itu, pemerintah Indonesia melalui departemen pekerjaan umum mengeluarkan peraturan nomor 26/PRT/M/2008 tentang persyaratan teknis sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan. Sistem ini dapat dilakukan secara pasif maupun aktif. Sistem proteksi kebakaran pasif adalah sistem yang terbentuk atau terbangun melalui pengaturan penggunaan bahan dan komponen struktur bangunan, sedangkan sistem proteksi kebakaran aktif adalah sistem pendeteksian kebakaran baik manual ataupun otomatis [1].

Salah satu contoh sistem proteksi aktif adalah pendeteksian asap. Asap yang merupakan salah satu produk awal dari proses kebakaran, pada dasarnya adalah udara panas yang mengapung ditambah berbagai kontaminasi [2]. Melakukan pendeteksian asap tentu saja sama dengan melakukan pencegahan agar kebakaran tidak meluas, sehingga resiko kerusakan yang ditimbulkan dapat dikurangi.

Seiring dengan pesatnya penggunaan kamera pengawas atau Closed Circuit Television (CCTV) berbasis Charge Coupled Device (CCD) Camera di dalam maupun di luar gedung, maka dalam beberapa tahun terakhir berkembang teknik pendeteksian asap memanfaatkan CCD camera berbasis *computer vision*. Metode yang digunakan ialah pengolahan citra yang diperoleh dari video CCTV, kemudian dengan perangkat lunak berisi algoritma tertentu citra diolah untuk

menentukan apakah terdapat asap atau tidak di dalam gambar tersebut. Penerapan algoritma pengolahan citra untuk deteksi otomatis asap dan api hasil kebakaran terus mengalami perkembangan yang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Ini disebabkan oleh kemampuannya untuk mengatasi kelemahan utama dari detektor asap konvensional dengan memberikan informasi lebih mengenai kebakaran yang terjadi, seperti lokasi, ukuran, tingkat pertumbuhan, dan dapat diterapkan di ruangan besar dengan geometri yang kompleks [3-9].

Namun, sebagian besar eksperimen pengembangan sistem tersebut menggunakan video dengan isi yang terbatas dan dengan pengetahuan apriori dari apa yang diujikan. Lebih jauh lagi, ketiadaan data primer penggunaan nilai *threshold* secara heuristik, dan kurangnya dalam evaluasi standar, membuat verifikasi eksperimental, khususnya perbandingan algoritma, menjadi suatu pekerjaan yang rentan terhadap kesalahan dan menghabiskan waktu. Selain itu, masih tidak begitu jelas atas dasar apa nilai *threshold* harus ditetapkan untuk memenuhi persyaratan keselamatan [10].

Di Indonesia, salah satu penelitian mengenai pendeteksian asap berbasis video dilakukan oleh Suwarno dengan tesisnya yang berjudul “Sistem Deteksi Asap Berbasis Video Untuk Deteksi Dini Kebakaran Menggunakan Adaptive Gaussian Mixture Model dan Sistem Inferensi Fuzzy” [11].

Untuk itu penelitian ini mencoba melanjutkan pengembangan sistem deteksi asap berbasis video dengan mencari karakter khusus dari asap itu sendiri, baik secara fisik maupun berbasis citra, dari berbagai material jenis polimer. Pendekatan karakteristik secara fisik dapat dilihat dari kenaikan temperatur material, serta pengukuran langsung *optical density* asap yang dihasilkan material. Pendekatan karakteristik berbasis citra dilakukan dengan mencari nilai histogram dari citra, serta luas area asap. Kemudian akan dicari hubungan atau korelasi antara karakteristik asap secara fisik terhadap karakteristik asap berbasis pengolahan citra.

Mencari korelasi antara hasil pengukuran langsung secara fisik dengan hasil pengolahan citra perlu dilakukan, sebab diharapkan dapat meningkatkan akurasi sistem deteksi asap berbasis video. Dengan demikian diharapkan data-data tersebut akan menjadi kumpulan data dalam mendefinisikan citra asap.

## 1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang akan dibahas pada skripsi ini adalah mencari karakteristik khusus dari asap yang dihasilkan berbagai material polymer, dengan cara:

1. Pengukuran langsung *optical density* asap yang dihasilkan material polimer.
2. Korelasi hasil *optical density* asap secara pengukuran langsung dengan hasil *optical density* secara pengolahan citra.
3. Melihat dinamika perkembangan asap dari berbagai material polimer.
4. Proses pengolahan video menggunakan *software* yang dikembangkan oleh Suwarno [11].

## 1.3. Tujuan Penulisan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk :

1. Memberikan perbandingan laju kenaikan temperatur pada material polimer yang berbeda.
2. Mencari pengaruh karakteristik material terhadap asap yang dihasilkan oleh polimer.
3. Memberikan perbandingan nilai *optical density* asap yang dihasilkan berbagai polimer.
4. Mencari korelasi karakteristik asap secara fisik dengan karakteristik asap berbasis pengolahan citra.

## 1.4. Batasan Penelitian

Mengingat lingkup penelitian yang sangat luas, maka pada penelitian ini hanya dibatasi pada :

1. Area eksperimen berupa area indoor, serta objek yang bergerak pada area tersebut hanya asap.
2. Material yang digunakan sebagai sumber asap hanya berasal dari jenis polimer.

3. Sumber panas berasal dari lilitan kabel tembaga yang dialiri arus.
4. *Smoke plume density* dari satu material polimer diambil pada 3 ketinggian berbeda.

### 1.5. Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian digunakan pada skripsi ini adalah sebagai berikut :

- a. Pengamatan Masalah  
Merumuskan masalah yang ada dengan cara mengolah berbagai informasi yang tersedia.
- b. Studi Literatur  
Pada tahap ini dilakukan studi literatur tentang teori-teori yang melandasi penelitian ini.
- c. Melakukan Eksperimen  
Melakukan percobaan dalam skala laboratorium untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan.
- d. Analisis Data  
Berdasarkan hasil dari tahap satu hingga empat, maka dapat dilakukan analisa hasil data eksperimen untuk mendapatkan korelasi karakteristik asap secara fisik dengan karakteristik asap berbasis pengolahan citra.

### 1.6. Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari 5 (lima) bab dan disusun dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

#### Bab 1. Pendahuluan

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, batasan penelitian dan metodologi penelitian yang digunakan paada laporan skripsi ini beserta sistematika penulisan yang digunakan.

**Bab 2. Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi tentang landasan teori yang dapat menunjang proses penelitian.

**Bab 3. Metode Penelitian**

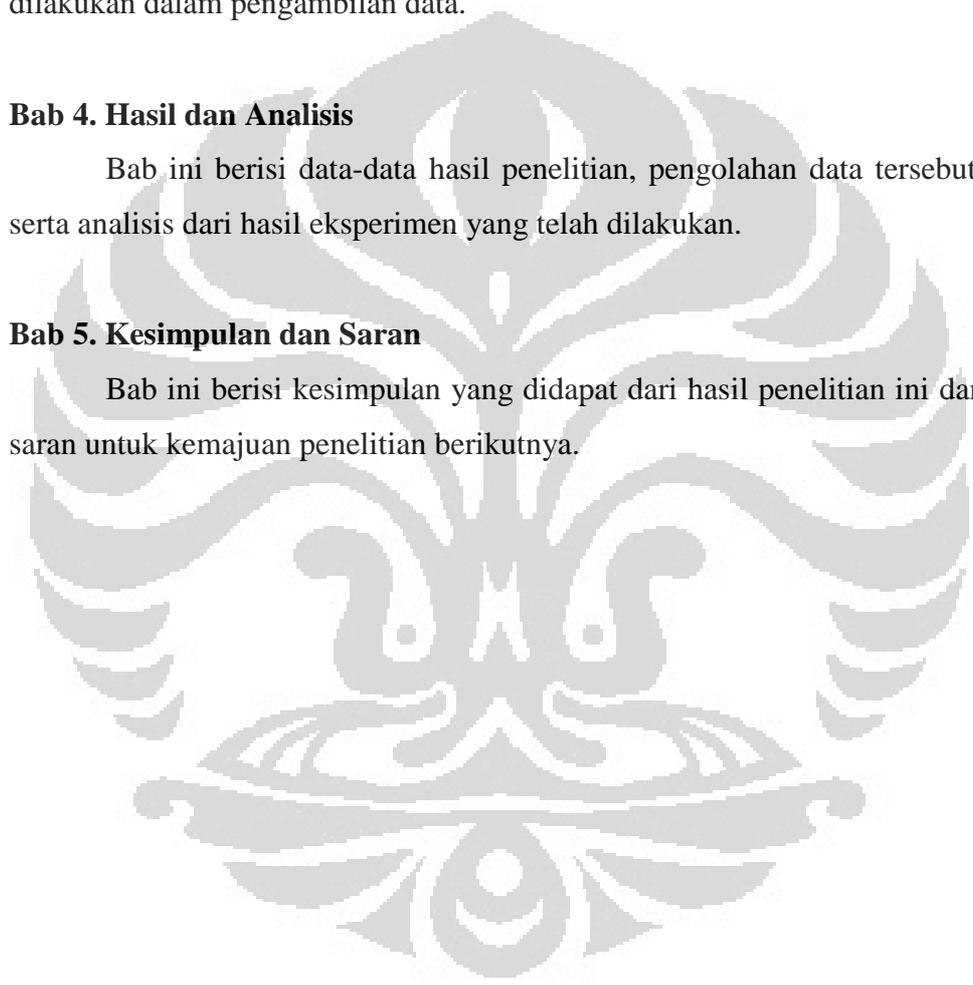
Bab ini menjelaskan tentang keseluruhan tahapan eksperimen. Termasuk didalamnya peralatan yang digunakan, prosedur penelitian, serta kondisi yang dilakukan dalam pengambilan data.

**Bab 4. Hasil dan Analisis**

Bab ini berisi data-data hasil penelitian, pengolahan data tersebut, grafik serta analisis dari hasil eksperimen yang telah dilakukan.

**Bab 5. Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisi kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian ini dan saran-saran untuk kemajuan penelitian berikutnya.

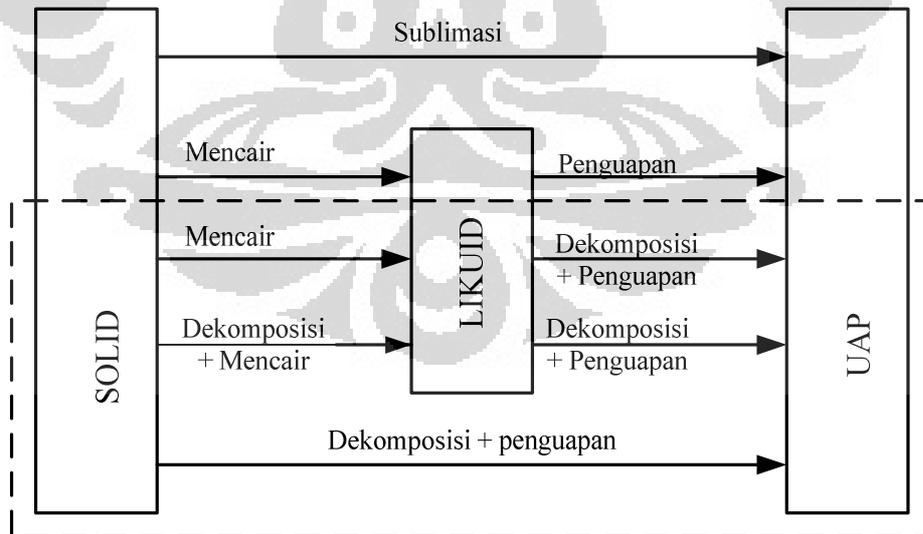


## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Polimer

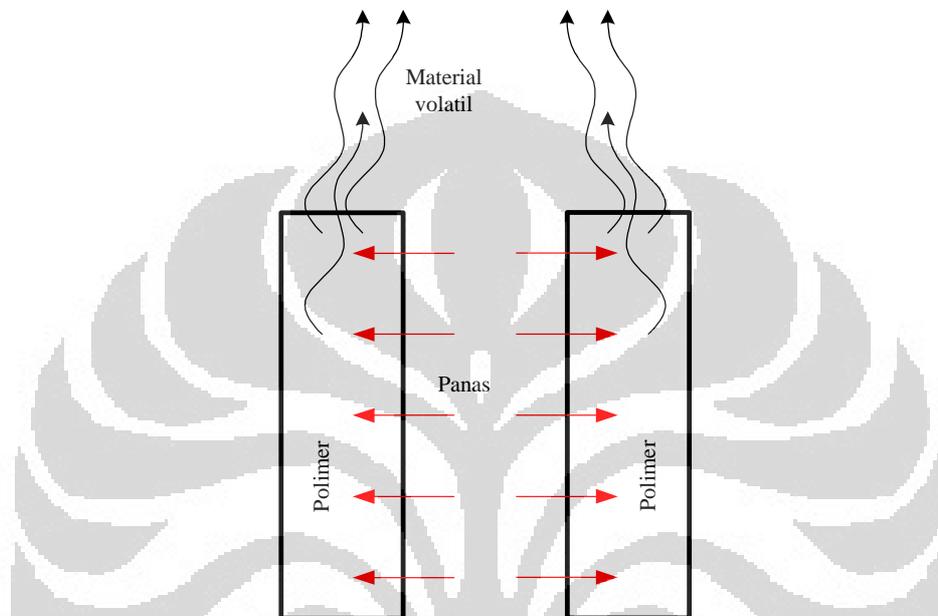
Salah satu material yang paling banyak terdapat di dalam suatu gedung adalah material polimer. Polimer adalah zat yang dihasilkan dengan cara polimerisasi dari molekul yang sangat banyak dengan struktur berantai panjang, baik lurus, bercabang, maupun menyilang yang berulang. Polimerisasi merupakan reaksi kimia yang menggabungkan dua molekul kecil atau lebih untuk membentuk molekul yang lebih besar, yaitu polimer. Sifat fisik maupun kimia dari polimer akan berubah ketika material ini menerima panas dari luar.

Dalam ruang lingkup *fire safety*, dekomposisi termal adalah parameter terpenting yang harus diperhatikan. Dimana dekomposisi termal merupakan proses perubahan struktur kimia akibat adanya panas yang berlebihan. Proses ini akan menghasilkan material berbentuk uap, baik uap air maupun uap gas bahan bakar yang dapat terbakar.



**Gambar 2.1.** Berbagai metode perubahan fasa dari material solid menjadi uap [12].

Gasifikasi pada polimer, seperti terlihat pada gambar 2.1 dan 2.2, secara umum lebih kompleks daripada cairan yang mudah terbakar, sebab polimer bukan tipe material yang mudah menguap. Molekul-molekul raksasa penyusun polimer harus pecah atau terurai terlebih dahulu menjadi molekul lebih kecil yang mudah menguap.



**Gambar 2.2.** Skematis pembentukan material volatil, atau asap, dari polimer.

Material jenis polimer dapat diklasifikasikan dengan berbagai macam cara. Namun, metode yang paling bermanfaat dalam melakukan klasifikasi polimer yaitu berdasarkan sifat fisiknya, terutama sekali modulus elastisitas dan tingkat pemanjangan. Menurut kriteria tersebut polimer diklasifikasikan kedalam tiga kelompok, yaitu elastomer, plastik, dan fiber.

Elastomer atau karet memiliki sifat dapat regang yang hampir dapat kembali ke bentuk semula pada suhu ruang. Plastik hanya memiliki nilai deformasi tertentu saja, sedangkan fiber memiliki tenaga rentang yang tinggi namun sifat dapat renggang yang rendah. Material-material ini merupakan material umum yang terdapat didalam suatu bangunan.

## 2.2. Karakteristik Termal

Angka kecepatan panas berpindah dan tersimpan dalam material polimer menjadi sangat fundamental karena proses ini dapat menentukan nilai temperatur material yang dipanaskan serta proses yang sedang terjadi, salah satunya adalah proses pirolisis. Karakteristik material untuk proses ini berbeda beda, sangat bergantung dari komposisinya. Konduktivitas, panas jenis, densitas, serta *thermal diffusivity* adalah besaran-besaran yang mempengaruhi karakteristik termal dari suatu material.

*Thermal diffusivity* dari material didefinisikan sebagai rasio konduktivitas termal terhadap panas jenis volumetriknya. Besaran ini mengukur angka kecepatan perpindahan panas yang terjadi di dalam material tersebut. Semakin besar angkanya, maka panas akan semakin cepat merambat. Artinya kenaikan temperatur dari material tersebut akan semakin cepat. *Thermal diffusivity*,  $\alpha$ , dapat dihitung dengan persamaan :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.1)$$

## 2.3. Panas Dari Aliran Arus Listrik

Untuk mengetahui fenomena panas dihasilkan oleh kabel yang dialiri arus listrik, ada beberapa parameter dan asumsi yang harus ditentukan dan diterapkan untuk tujuan penyederhaan. Sehingga fenomena dasar yang terjadi dapat dipahami.

Ketika arus listrik mengalir melalui material padat maupun likuid dengan nilai konduktivitas elektrik tertentu, energi listrik diubah menjadi panas melalui rugi-rugi tahanan dari material itu sendiri. Ini disebut sebagai pemanasan Joule.

$$q = I^2 R \quad (2.2)$$

Dimana  $q$  adalah panas yang dihasilkan oleh arus konstan  $I$  melalui konduktor dengan tahanan listrik  $R$ .

Model matematika [13] sederhana perpindahan panas dari kabel ke material yang melapisinya dapat dijabarkan, dengan asumsi sebagai berikut :

- Panas yang berpindah dari kabel sebagian besar secara radial kearah sekelilingnya, atau keadaan kontak termal yang sempurna. Ini dapat menyederhanakan analisis, dan juga bersifat konservatif karena diasumsikan material pelapis kabel menutupi seluruh sumber panas.
- Komposisi material yang melapisi kabel bersifat homogen.
- Karakteristik termal –konduktivitas, kapasitas panas, dan densitas- dari material diasumsikan homogen dan tidak dipengaruhi oleh temperatur. Pada kenyataannya, baik konduktivitas termal maupun kapasitas panas dari polimer bergantung kepada temperatur. Namun sangat sulit diperoleh informasinya secara lebih spesifik.

Berdasarkan asumsi diatas, persamaan yang mengatur temperatur material,  $T(r,t)$ , adalah :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} k r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.3)$$

dimana  $\rho$ ,  $c$ , dan  $k$  secara berurutan adalah densitas, *specific heat*, serta konduktivitas termal dari material, semuanya diasumsikan konstan. Kondisi batas pada lapisan batas terluar,  $r = R$ , adalah :

$$k \frac{\partial T}{\partial r}(R, t) = \dot{q}'' \quad (2.4)$$

Dimana  $\dot{q}''$  adalah heat flux, yang diasumsikan simetris secara axial, ke lapisan permukaan internal material.

#### 2.4. Asap

Merujuk kepada Kamus Besar Bahasa Indonesia, asap diartikan sebagai uap yang dapat terlihat yang dihasilkan dari proses pembakaran. Kepulan gas panas

yang dihasilkan kebakaran biasanya dibagi ke dalam 3 (tiga) kelompok dibawah ini, yaitu :

- a. Uap panas serta gas hasil pembakaran suatu material.
- b. Material-material tidak terbakar yang mengalami penguraian dan terkondensasi (warna bervariasi dari seperti cahaya hingga kehitaman)
- c. Sejumlah udara sekitar yang dipanaskan oleh api dan masuk ke dalam kepulan diatas api.

#### 2.4.1. Produksi Asap

Asap dihasilkan dengan 3 cara pembakaran, yaitu *flaming*, *pyrolysis*, dan *smoldering*. Flaming adalah proses pembakaran dengan api yang menyala-nyala. Asap yang diproduksi dari proses *flaming combustion* cenderung memiliki kandungan karbon yang besar, sehingga asap berwarna hitam.

Pirolisis muncul pada permukaan bahan bakar sebagai hasil kenaikan temperatur yang tinggi, umumnya tanpa ada campur tangan dari oksigen. Pirolisis didefinisikan sebagai perubahan komposisi material secara kimiawi yang terjadi karena panas. Produk dari pirolisis berupa material volatil berbentuk uap. Selama uap bergerak naik, tekanan uap yang rendah menyebabkan komponen dari uap tersebut mengalami kondensasi. Fenomena ini yang membuat asap hasil proses pirolisis memiliki warna seperti cahaya ,atau terang.

Sedangkan *smoldering* adalah proses pembakaran yang lambat, pada keadaan temperatur, tanpa nyala api, serta ditopang oleh panas yang dihasilkan ketika oksigen langsung bereaksi dengan permukaan bahan bakar yang terkondensasi. Asap yang dihasilkan memiliki karakter yang hampir sama dengan asap hasil proses pirolisis.

#### 2.4.2. Pergerakan Asap

Asap merupakan salah satu dari berbagai jenis fluida, sehingga sifat pergerakannya akan mengikuti hukum-hukum mekanika fluida yang berlaku. Asap akan bergerak dengan pengaruh dari gaya apung atau *buoyancy*.

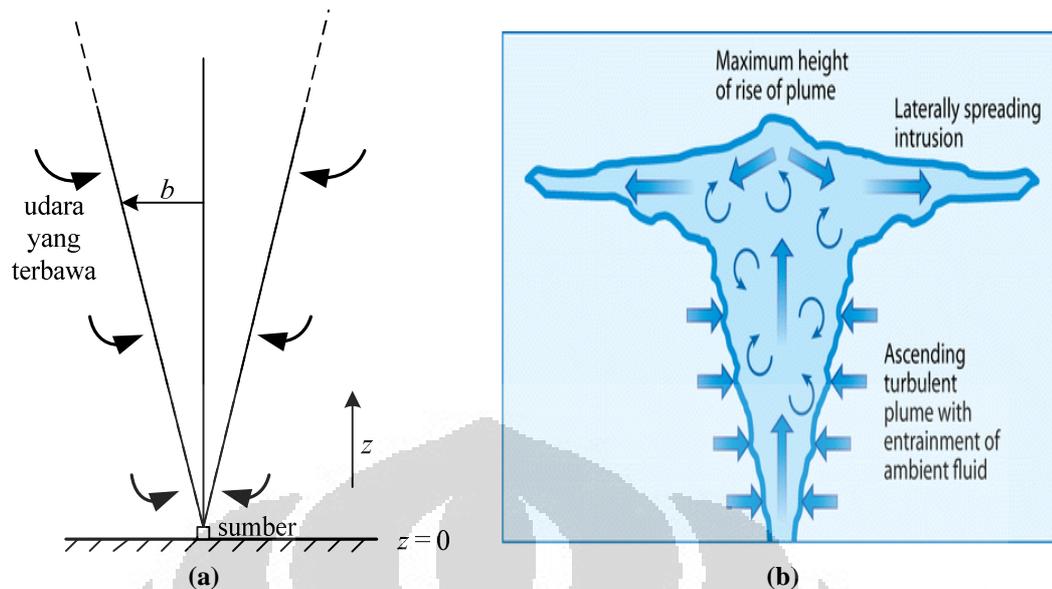
Pengertian gaya apung yang terjadi pada pergerakan asap terkait secara langsung dengan konveksi alamiah. Dalam suatu sistem, jika terdapat perbedaan massa jenis antara massa fluida yang berdekatan sebagai hasil dari perbedaan temperatur, maka gaya apung akan menyebabkan fluida dengan massa jenis lebih rendah akan naik terhadap lingkungan sekitarnya. Gaya apung per satuan volume ditahan oleh gaya drag, terutama viskositas, antara asap dengan udara sekitar. Besaran relatif antara dua gaya berbeda ini dinyatakan sebagai bilangan Grashof, yang pada dasarnya adalah rasio dari gaya apung ke atas terhadap tahanan drag viskositas :

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_\infty - \rho)}{\rho v^2} = g \left[ \frac{T_s - T_\infty}{T_\infty} \right] \frac{l^3}{v^2} \quad (2.5)$$

$g(\rho_\infty - \rho)$  = Gaya apung per satuan volume.

Kumpulan asap, yang bergerak ke atas dari sumber panas, dipengaruhi fenomena konveksi diistilahkan sebagai *buoyant plume*. Bentuk dari *buoyant plume* sangat ditentukan oleh interaksinya dengan fluida lingkungan. Pemodelan matematika dari *buoyant plume* sederhana dibuat berdasarkan sumber panas berupa titik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.(a). Kondisi yang ideal dari *buoyant plume* terjadi ketika atmosfer dalam keadaan tak hingga dan diam, sehingga bentuknya akan simetris dan terus mengembang secara vertikal dimana gaya apung akan semakin lemah untuk mengatasi drag viskositasnya.

Pada kondisi sebenarnya, seperti pada gambar 2.3.(b), temperatur awal asap lebih tinggi daripada temperatur lingkungan dan asap akan naik karena gaya apung positif. Selama proses naiknya asap, dan dengan adanya udara lingkungan dengan temperatur lebih rendah yang ikut terbawa, maka suhu asap semakin rendah sedangkan suhu udara semakin tinggi. Proses tersebut akan mengurangi *plume buoyancy* asap. Sehingga asap akan berhenti bergerak keatas pada titik ketinggian tertentu.



**Gambar 2.3.** Pemodelan *buoyant plume* (a) ideal, dan (b) mendekati kenyataan.

Bentuk dari *plume* dapat diturunkan secara teoritis melalui persamaan konservasi momentum, massa, dan energi. Dimulai dengan hubungan yang diturunkan dari persamaan kekekalan, analisis dimensional sederhana dapat diterapkan untuk mendapat korelasi fungsional antara temperatur dengan kecepatan aliran ke atas di satu sisi, serta antara besar sumber panas dan ketinggian di sisi lainnya. Untuk konservasi momentum, persamaan berikut ini digunakan untuk kondisi *buoyant plume* ideal (pada radius  $b$  di ketinggian  $z$  dari sumber di dalam keadaan atmosfer tak hingga (massa jenis  $\rho_\infty$ ), serta jika gaya viskositas diabaikan dan perbedaan temperatur rendah :

$$\frac{d}{dz}(\rho_o u_o^2 b^2) \approx g(\rho_o - \rho_\infty) b^2 \quad (2.6)$$

dimana  $u_o$  dan  $\rho_o$  adalah kecepatan aliran secara vertikal dan massa jenis plume pada ketinggian  $z$  di atas sumber. Dengan cara yang sama, untuk konservasi massa:

$$\frac{d}{dz}(\rho_o u_o b^2) \approx \rho v b \approx \rho_o b \quad (2.7)$$

artinya peningkatan laju aliran massa terhadap ketinggian bergantung dari udara yang terbawa melalui batas *plume*. Kecepatan udara yang terbawa ( $v$ ) diasumsikan

berbanding lurus terhadap kecepatan aliran plume secara vertikal ( $u_o$ ). Terakhir, untuk kekekalan energi digambarkan melalui persamaan dibawah ini :

$$c_p \rho_o u_o b^2 \Delta T \approx \dot{Q}_{conv} \quad (2.8)$$

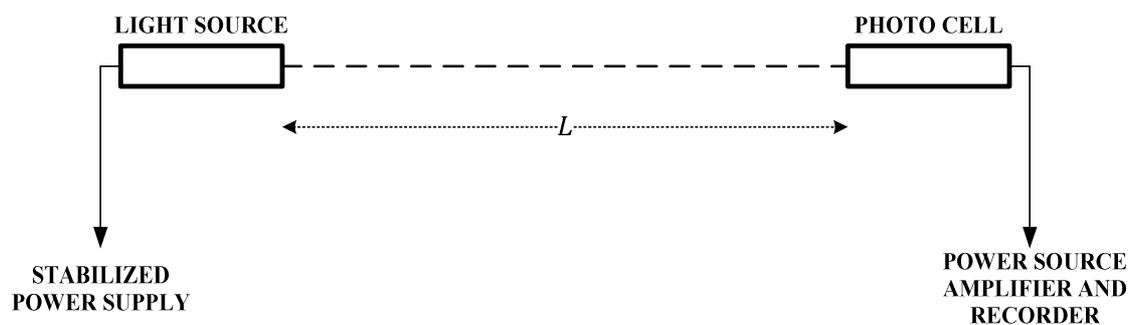
dimana  $\Delta T$  adalah temperatur diluar ambient pada ketinggian  $z$  dan  $\dot{Q}_{conv}$  adalah besar panas yang dihasilkan secara konveksi dari sumber, panas yang hilang dari *buoyant plume*.

Untuk pergerakan asap di dalam ruangan, gaya-gaya yang bekerja diberikan oleh :

- (a) Gaya apung yang dihasilkan langsung oleh sumber panas.
- (b) Gaya apung dari perbedaan temperatur internal asap dan temperatur eksternal dari lingkungan sekitar.
- (c) Efek yang disebabkan oleh angin dan pergerakan udara.
- (d) Sistem tata udara di dalam ruangan.

#### 2.4.3. Optical Density

*Optical density* (OD) dari asap dapat diartikan sebagai ukuran tingkat pelemahan cahaya intensitas sinar cahaya yang melewati kumpulan asap, dengan metode pengukuran seperti yang ditunjukkan gambar 2.4. Jika pada keadaan awal pengukuran tidak terdapat asap, artinya sinar yang dipancarkan sama dengan sinar yang diterima, maka nilai intensitas adalah  $I_o$ . Nilai intensitas akan berkurang jika diantara alat pengukuran tersebut terdapat asap dengan ketebalan tertentu, sebab sinar yang diterima lebih sedikit daripada sinar yang dipancarkan. Maka nilai intensitas adalah  $I$ .



Gambar 2.4. Skematis peralatan untuk mengukur optical density.

Hubungan antara  $I_o$  dan  $I$  dijelaskan didalam Bouguer's Law :

$$I = I_o \exp (-kL) \quad (2.9)$$

dimana  $k$  adalah koefisien absorsi dari asap, sedangkan  $L$  adalah jarak sinar cahaya yang melalui asap. Sedangkan nilai  $OD$  dapat direpresentasikan dengan persamaan dasar logritma :

$$OD = \log_{10} \left( \frac{I_o}{I} \right) = kL \quad (2.10)$$

dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa nilai optical density dari asap berbanding lurus dengan jarak atau ketebalan asap. Untuk nilai transmisi cahaya serta opasitas asap dapat diketahui melalui persamaan dibawah ini :

$$T = \left( \frac{I}{I_o} \right) = \left( 1 - \frac{N}{100} \right) \quad (2.11)$$

T = Transmisi cahaya (%)

N = Opasitas (%)

Dengan melakukan substitusi sederhana dari persamaan (2.10) dengan persamaan (2.11), maka diperoleh korelasi antara transmisi cahaya dengan nilai *optical density* :

$$T = \exp(-OD) \quad (2.12)$$

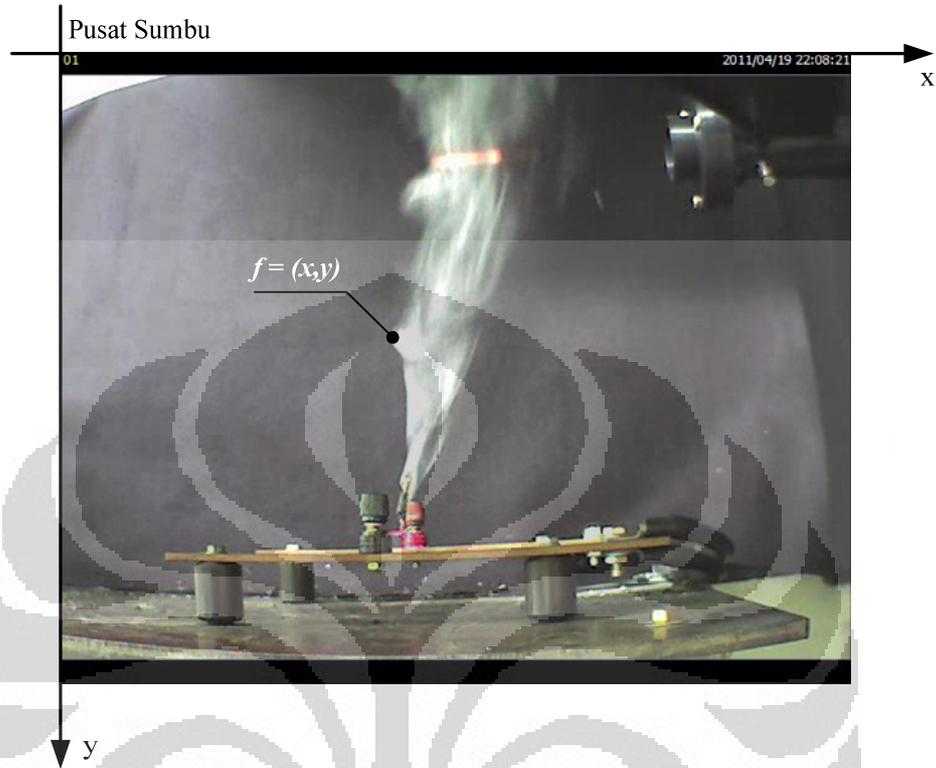
Sehingga :

$$OD = \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2.13)$$

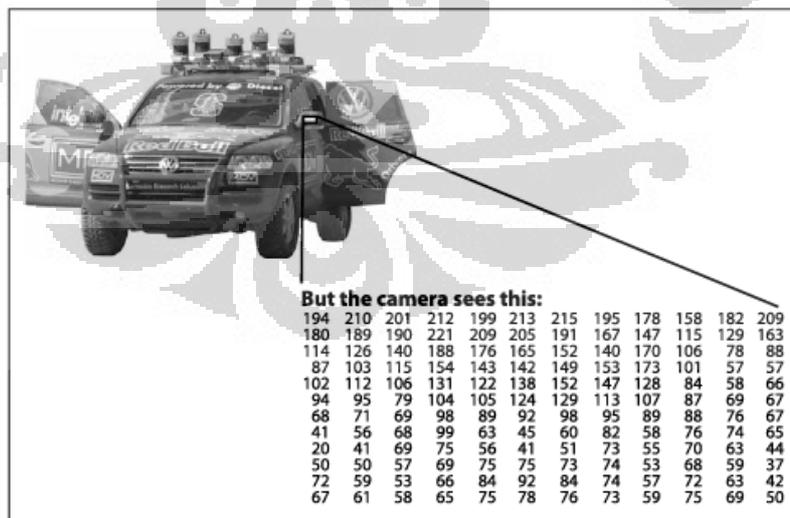
## 2.5. Pengolahan Citra

Sebuah citra [digital image processing] didefinisikan sebagai fungsi dua dimensi,  $f(x,y)$ , dimana  $x$  dan  $y$  adalah koordinat spasial, dan amplitudo dari  $f$  dari pasangan koordinat titik  $(x,y)$  disebut sebagai intensitas atau derajat keabuan dari citra pada titik tersebut. Ketika  $x,y$ , dan nilai dari  $f$  semuanya terbatas, dengan jumlah tertentu dengan nilainya masing-masing, maka inilah yang disebut sebagai citra digital.

Pengolahan citra digital artinya melakukan pengolahan citra dalam bentuk digital menggunakan komputer digital.



(a)



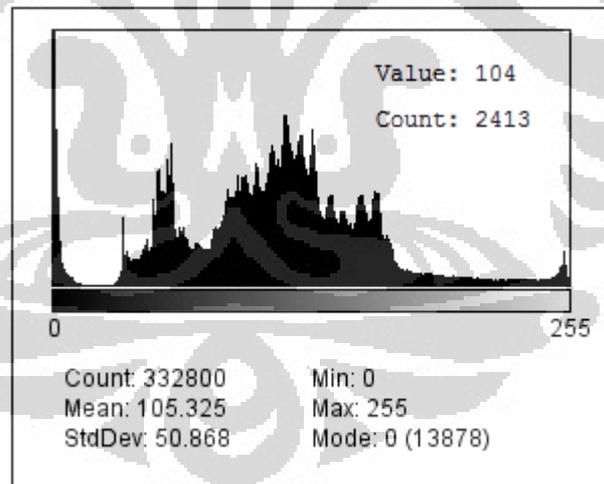
(b)

Gambar 2.5. Representasi dari sebuah citra digital, (a) koordinat *pixel*, (b) bagi komputer, citra berupa susunan angka-angka intensitas [OpenCV].

Pada gambar 2.5. (a) dan (b) terlihat sebuah citra digital, yang tersusun dalam bentuk raster atau *grid*. Setiap kotak yang terbentuk disebut *pixel* (*picture element*) dengan koordinat  $(x,y)$ . Setiap *pixel* memiliki nilai intensitasnya sendiri. Citra tersebut memiliki resolusi 640 x 520, artinya penyusun citra terdiri dari 640 *pixel* sejajar sumbu  $x$  dan 520 *pixel* sejajar sumbu  $y$ .

Derajat keabuan atau gray level merepresentasikan tingkat abu-abu atau kode warna. Kisaran nilai ditentukan oleh bit yang dipakai dan akan menunjukkan resolusi tingkat abu-abu (*grey level resolution*)

- 1 bit – 2 warna : [0,1]
- 4 bit – 16 warna : [0,15]
- 8 bit – 256 warna : [0,255]
- 1 bit – 16.777.216 warna (*true color*)
  - Merah – Red (R) : [0,255]
  - Hijau – Green (G) : [0,255]
  - Biru – Blue (B) : [0,255]



**Gambar 2.6.** Histogram nilai pixel dari sebuah citra digital .

Histogram adalah grafik yang menggambarkan penyebaran nilai intensitas pixel dari suatu citra. Grafik ini menyimpan informasi jumlah pixel menurut derajat keabuan (gray level), sehingga bisa digunakan untuk mengidentifikasi objek dalam citra. Histogram pada gambar 2.6. menggambarkan nilai intensitas pixel dari citra yang terdapat pada gambar 2.5.(a).

## 2.6. Korelasi Antara *Pixel Intensity* Dengan *Optical Density*

Nilai pixel intensity citra asap, atau disebut juga sebagai tingkat kebuhan rata-rata asap (mean gray value), dapat dikorelasikan langsung dengan nilai optical density asap hasil pengukuran langsung. Korelasi kedua nilai ini merupakan hubungan kompleks yang tidak linier [15].

Ada dua persamaan yang umum digunakan didalam melakukan korelasi antara pixel intensity dengan optical density, yaitu :

- Persamaan polinomial pangkat 2 :

$$y = a + bx + cx^2 \quad (2.14)$$

- Persamaan rodboard :

$$y = a + (a - d) / \left( 1 + \left( \frac{x}{c} \right)^b \right) \quad (2.15)$$

Dimana :

y = optical density ( $m^{-1}$ )

x = pixel intensity (8-bit)

a,b,c,d = parameter kurva

## 2.7. Sistem Deteksi Asap Berbasis Video

Pendeteksian gerak dan objek merupakan salah satu hasil yang bisa dimanfaatkan dari proses pengolahan citra. Video pada dasarnya adalah kumpulan rekaman citra, sehingga pengolahan video dapat memanfaatkan metode pengolahan citra.

Suwarno [11] telah mengembangkan sistem deteksi asap berbasis video untuk deteksi dini kebakaran. Sistem pendeteksian ini menggunakan segmentasi pada objek yang bergerak dari latar belakangnya yang tetap, dengan asap sebagai objek yang ingin dideteksi.

Metode yang digunakan untuk mendeteksi objek yang bergerak pada sistem ini adalah Adaptive Gaussian Mixture Model (GMM). Metode ini dianggap cocok untuk diterapkan dalam citra yang dihasilkan dari sistem kamera pengawas, dimana biasanya cahaya yang berubah-ubah, dan terdapat objek baru yang masuk kedalam sistem, maupun objek lama yang keluar dari sistem.

Sedangkan untuk menentukan apakah objek yang bergerak adalah asap atau bukan digunakan sistem inferensi *fuzzy*.

Secara umum, metode pendeteksian asap berbasis video terdiri dari 4 langkah berikut :

- Segmentasi objek
  - Memisahkan video menjadi frame citra RGB menggunakan adaptive GMM.
  - Memisahkan objek bergerak dari latar belakangnya yang tetap.
- Pengolahan citra
  - Mengubah citra RGB menjadi citra *grayscale*.
  - Menyesuaikan citra terhadap kondisi pencahayaan.
  - *Filtering, blurring, thresholding*, erosi, dan dilasi citra.
- Klasifikasi asap (sistem inferensi *fuzzy*)

Pada sistem pendeteksian asap ini, terdapat tiga sistem *fuzzy* yang dipakai untuk klasifikasi asap, yaitu :

- Desain sistem *fuzzy* untuk ukuran objek yang bergerak.
- Desain sistem *fuzzy* untuk arah objek yang bergerak.
- Desain sistem *fuzzy* untuk kecepatan objek yang bergerak.

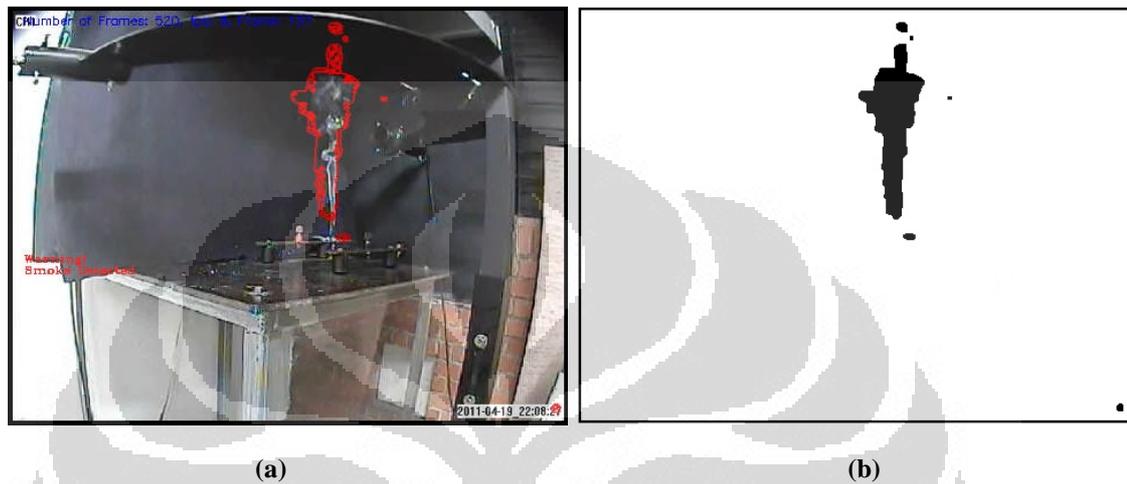
Aturan-aturan *fuzzy* tersebut terangkum pada tabel 2.1 berikut :

**Tabel 2.1.** Aturan fuzzy untuk klasifikasi asap.

Ukuran	Kecepatan	Arah	Intensitas	Tipe
Small	Still	up, up-right, right, down-right, down, down-left, left, up-left, down	Low	Smoke/ Other
Small	Not still	up, up-right, right, down-right, down, down-left, left, up-left, down	High	Smoke
Medium	Still	up, up-right, right, down-right, down, down-left, left, up-left, down	Low	Smoke/ Other
Medium	Not still	up, up-right, right, down-right, down, down-left, left, up-left, down	High	Smoke
Large	Still	up, up-right, right, down-right, down, down-left, left, up-left, down	Low	Smoke-dangerous
Large	Not Still	up, up-right, right, down-right, down, down-left, left, up-left, down	High	Smoke-dangerous

- Hasil deteksi asap

Hasil dari sistem deteksi asap berbasis video dapat dilihat dari contoh pengolahan citra *blob*, seperti pada gambar 2.7.(b). Sedangkan pada citra sebenarnya, terlihat pada gambar 2.7.(a), menampilkan kontur objek yang diduga sebagai asap.



**Gambar 2.7.** Hasil pengolahan sistem deteksi asap berbasis video, (a) citra sebenarnya, (b) citra *blob*.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

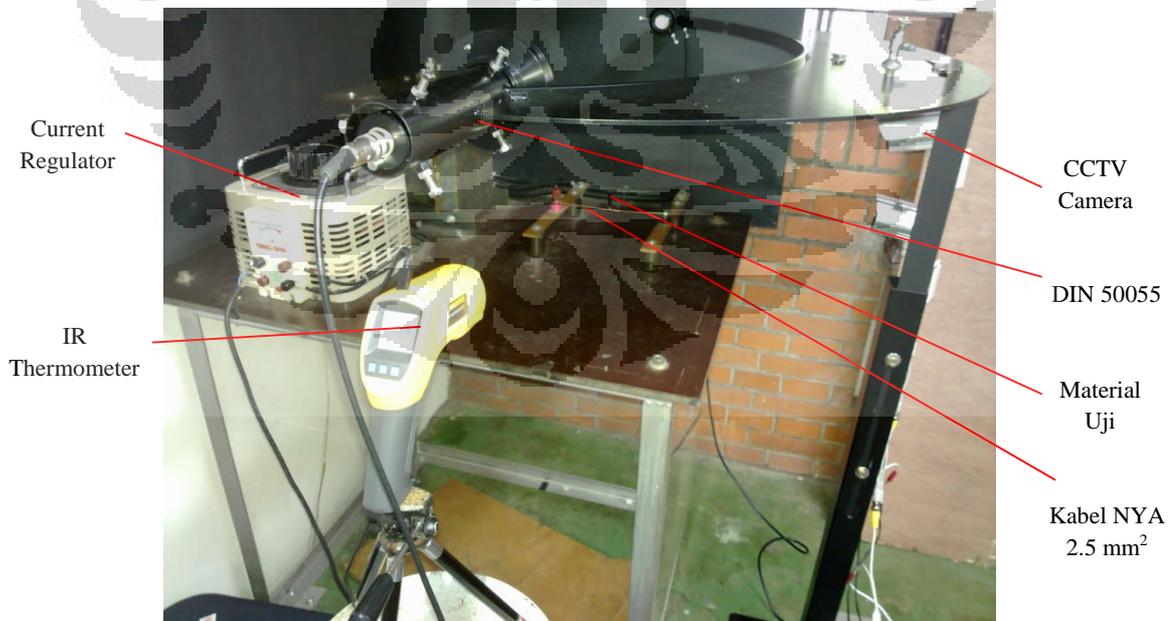
### 3.1. Sistematika Penelitian

1. Menggunakan kabel NYA 2.5 mm<sup>2</sup> yang disambung dengan metode lilitan 0.0. Kabel kemudian dibebankan arus untuk menghasilkan panas dengan titik kritis terletak pada lilitan. Material diletakkan pada jointing, sehingga asap akan muncul hanya dari sambungan tersebut. Hal ini akan memudahkan dalam mengamati perkembangan terbentuknya asap serta memahami fenomena mekanikal dari asap.



**Gambar 3.1.** Kabel NYA 2.5 mm<sup>2</sup> dengan lilitan 0.0.

2. Penelitian akan dilakukan berdasarkan metode eksperimen yang diperlihatkan pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2.** Metode eksperimen skala lab.

3. Parameter yang diujikan dalam eksperimen ini adalah variasi material jenis polimer. Hal ini didasari oleh banyaknya material jenis ini ditemukan didalam suatu bangunan, sehingga penting untuk mencari informasi lebih banyak mengenai karakteristik dari polimer. Waktu pengambilan data dilakukan selama 90 detik setelah arus dibebankan ke kabel NYA.
4. Temperatur material, opasitas asap, serta hasil rekaman video adalah data-data primer yang diperoleh dari eksperimen ini. Data tersebut kemudian diolah lebih lanjut untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan.

### 3.2. Sampel Pengujian dan Perangkat Eksperimen

#### 3.2.1. Sampel Pengujian

Kabel yang digunakan adalah kabel tembaga NYA 2.5 mm<sup>2</sup> re (*round solid conductor*) dengan jenis konduktor *annealed plain copper solid* sesuai dengan standar SLPN 41-1. Kabel yang digunakan pada satu kali eksperimen berjumlah dua buah, dengan panjang masing-masing 15 cm. Kemudian kedua kabel dililit seperti gambar 3.1., dengan panjang lilitan 4 cm dan jumlah lilitan 6 kali.

Material polimer yang digunakan sebagai variabel eksperimen berjumlah 3 material, yaitu :

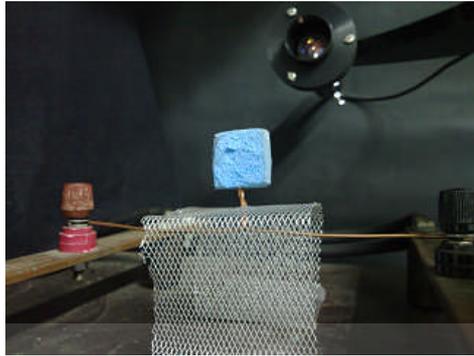
- PVC (Polyvinylchloride)



**Gambar 3.3.** Material Uji PVC.

Spesifikasi : Selotip dengan 7 lilitan, lebar 1.25 cm.

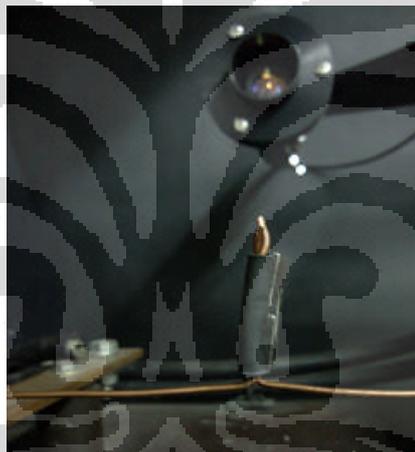
- Foam



Gambar 3.4. Material Uji Foam.

Spesifikasi : Foam solid warna biru, dimensi 2.5 x 2.5 x 2.5 cm.

- Karet



Gambar 3.5. Material Uji Karet.

Spesifikasi : Karet ban berdimensi 4.5 x 2.5 cm

Karakteristik termal material [15] :

**Tabel 3.1.** Karakteristik termal material.

Jenis Material	$k$	$\rho$	$c_p$	$\alpha$
Tembaga	398	8931	0.384	0.1157
PVC	0.17	1255	1.38	$0.98 \times 10^{-7}$
Foam	0.21	1265	1.67	$0.99 \times 10^{-7}$
Karet	0.15	1200	2.01	$0.62 \times 10^{-7}$

### 3.2.2. Alat Pemanas Kabel

Alat ini dibuat oleh Adrianus [16], yang melakukan penelitian tentang pengaruh jenis sambungan kabel listrik terhadap potensi bahaya kebakaran. Secara sederhana, alat ini merupakan variable trafo step-down. Dimana arus yang dibebankan terhadap kabel dapat diatur sesuai kebutuhan. Untuk mengukur arus yang dibebankan ke kabel, digunakan alat pengukur *clamp-meter*.

### 3.2.3. Alat Pengukur Temperatur

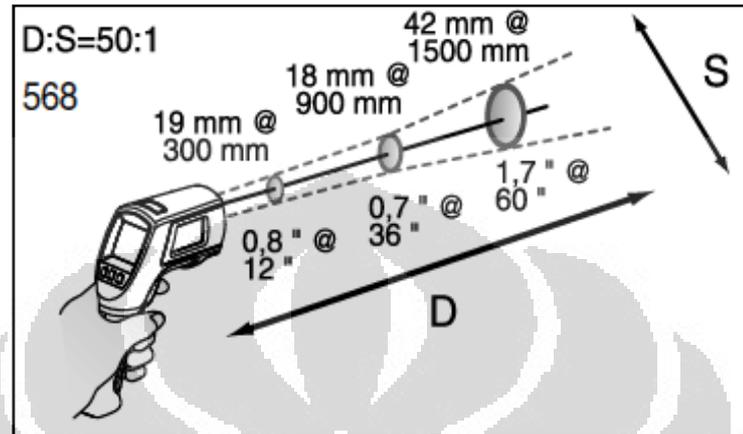
Temperatur yang diukur dalam eksperimen ini adalah temperatur kabel yang dipanaskan, serta temperatur terluar dari material polymer. Disebabkan tingginya nilai temperatur yang akan diukur, maka jenis pengukur temperatur yang digunakan ialah non-contact infrared thermometer. Jika menggunakan alat pengukur temperatur konvensional, maka panas yang berlebih akan merusak peralatan. Termometer infra merah yang digunakan adalah produk dari FLUKE® *Infrared Thermometers 568 Series* [17]. Produk ini dilengkapi dengan perangkat lunak, yaitu Flukeview®, sehingga dapat langsung dihubungkan ke komputer untuk pengambilan data.



**Gambar 3.6.** FLUKE® Infrared Thermometers 568 Series.

Termometer inframerah mengukur temperatur permukaan dari suatu objek. Peralatan optik dari termometer dapat merasakan energi yang dipancarkan, dipantulkan, dan yang ditransmisikan. Peralatan elektronik dari alat menerjemahkan sinyal yang diterima menjadi besaran temperatur.

Jika jarak ( $D$ ) antara termometer dan objek yang diukur semakin bertambah, maka area pengukuran ( $S$ ) yang terukur menjadi lebih besar. Hubungan antara jarak dan area pengukuran ( $D:S$ ) diperlihatkan pada gambar 3.4. Area pengukuran mengindikasikan 90% energi yang dikelilinginya.



**Gambar 3.7.** Hubungan antara jarak dan area pengukuran *Infrared Thermometers* .

#### 3.2.4. Smoke Density Photometric System (DIN 50055)

DIN 50055 [18] adalah standarisasi sistem *Light Measurement System for Testing Smoke Development*, atau disebut juga *Smoke Density Photometric System*. Alat ini diproduksi oleh Fire Testing Technology Inc., yang berbasis di Inggris. Sistem DIN 50055 dirancang untuk mengukur opasitas asap dari material yang terbakar. Sesuai dengan *Bouguer's law*, nilai densitas asap (*smoke optical density*) dapat diketahui dengan mendapatkan nilai opasitas. Hasil pengukuran data melalui alat ini berupa tegangan  $0-1 \text{ V} = 100 \%$  transmisi. Sistem peralatan ini juga dilengkapi kabel data acquisition, sehingga data dapat ditampilkan melalui komputer. Sedangkan untuk sistem data acquisition untuk dihubungkan ke komputer digunakan Digital Multimeter APPA-109N, produk dari APPA Technology Corp.

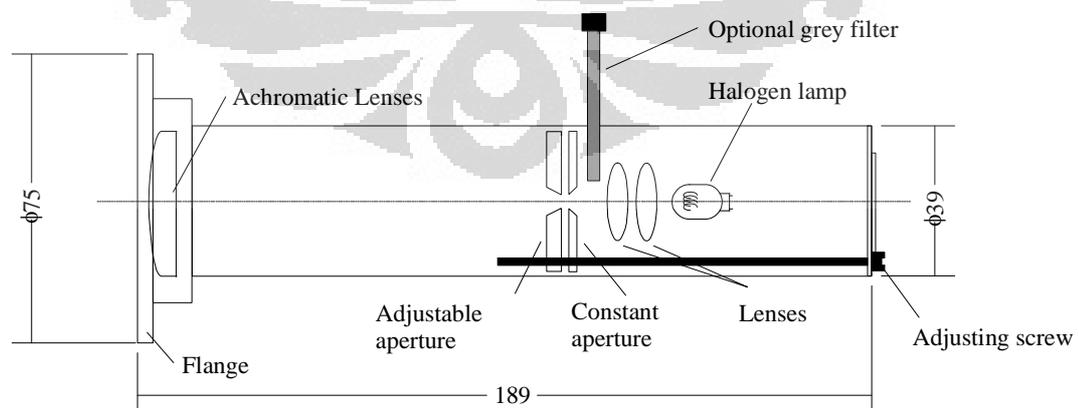


**Gambar 3.8.** Smoke Density Photometric System (DIN 50055).

Perangkat sistem DIN 50055 terdiri dari :

- *Light Source*

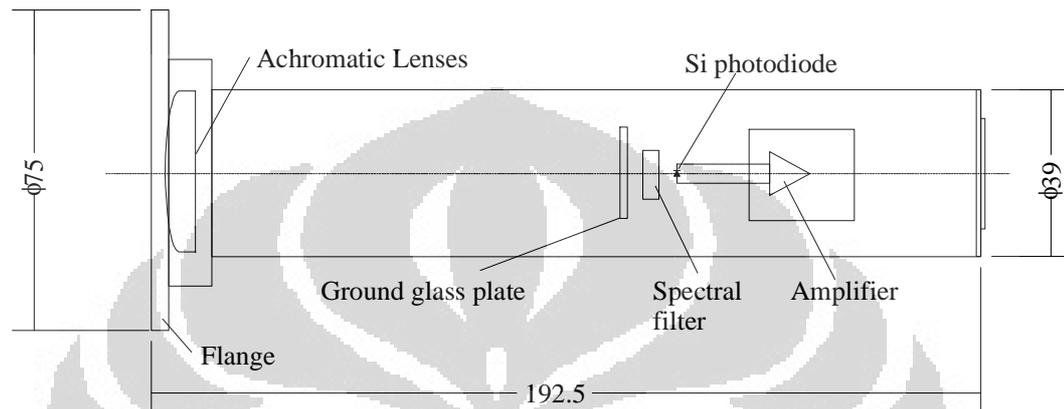
*Light source* merupakan sumber sinar atau cahaya yang terdiri dari lampu halogen dan sistem lensa. Alat ini diperkirakan menghasilkan sinar cahaya dengan diameter 25 mm pada ujung pemancar sinar ini. Alat ini juga memiliki pengatur lubang bidik kamera yang dapat mengatur intensitas cahayanya, sehingga densitas fluks cahaya yang diterima *light receiver* dapat diatur untuk setiap jarak tertentu.



**Gambar 3.9.** Gambar skematis sumber cahaya.

- *Light Receiver*

*Light receiver* merupakan alat penerima sinar cahaya yang dipancarkan oleh *light source*. Alat ini terdiri dari sebuah sistem lensa *achromatic*, *ground glass plate*, *silicon photoelectric cell*, serta sebuah *amplifier system*.



**Gambar 3.10.** Gambar skematis penerima cahaya.

- *Control Unit*



**Gambar 3.11.** Tampilan *control unit* pada DIN 50055.

*Control unit system* terdiri dari :

- a. 'Power On/Off' – Tombol untuk menyalakan alat yang terletak didasar kotak.
- b. 'Lamp On/Off' – Tombol untuk menyalakan atau mematikan *light source*.
- c. 'Transmission %' – Menampilkan tegangan yang sudah diperkuat dalam persentasedari nilai awal.
- d. 'Damping' – Mengatur waktu respon dari pengukuran alat.
- e. 'Zero' – Potensiometer untuk mengatur transmisi ke 0% ketika *light source* ditutup.
- f. 'Span' – Potensiometer untuk mengatur transmisi ke 100% ketika *light source* tidak tertutup.
- g. 'Calibrate/Measure' – Biasanya diatur dalam posisi *measure* sehingga nilai transmisi yang ditampilkan dalam persentase. Jika posisi diubah ke *calibrate*, maka yang ditampilkan adalah voltase. Nilai yang ditampilkan seharusnya 150 pada keadaan transmisi penuh. Jika nilai ini dibagi 100, maka nilai akan menjadi 1,5 V.

### 3.2.5. Kamera Perekam Video (CCD Camera)

Kamera perekam untuk eksperimen ini menggunakan jenis kamera pengawas, karena tujuan akhir dari penelitian ini ialah untuk memanfaatkan banyaknya kamera pengawas atau kamera CCD (Charged Coupled Device) yang dipasang didalam gedung-gedung untuk mendeteksi asap.

Eksperimen ini menggunakan dua kamera video yang berbeda, untuk tujuan yang berbeda pula. Pertama adalah kamera pengawas produk Vivotek<sup>®</sup>, dengan tipe IP Camera Vivotek IP7132. Kamera ini memiliki *frame rate* hingga 30 fps, sehingga dapat menghasilkan video yang lebih baik dari sisi kualitas. Hasil dari IP7132 ini digunakan untuk pengolahan citra asap.

Kamera kedua merupakan produk dari TelView<sup>®</sup>, dengan tipe WPC 236 IR. Kamera ini hanya memiliki *frame rate* sebesar 8 fps, sehingga kualitas video yang dihasilkan kamera ini kurang bagus. Video hasil rekaman menggunakan video ini digunakan untuk diolah menggunakan *software smokedetection*.

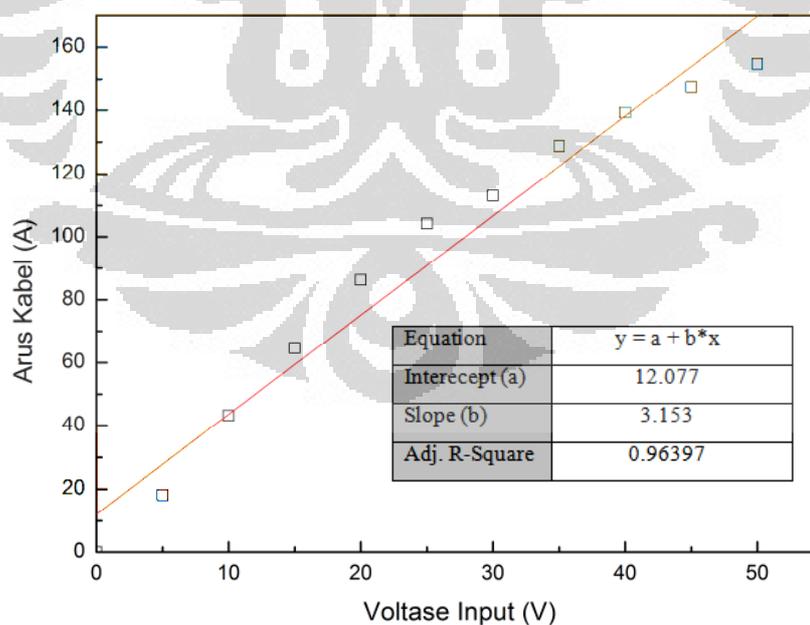


Gambar 3.12. CCD Camera (a) IP Camera Vivotek® IP7132, (b) TelView® WPC 236 IR.

### 3.3. Kalibrasi Perangkat Eksperimen

#### 3.3.1. Kalibrasi Arus

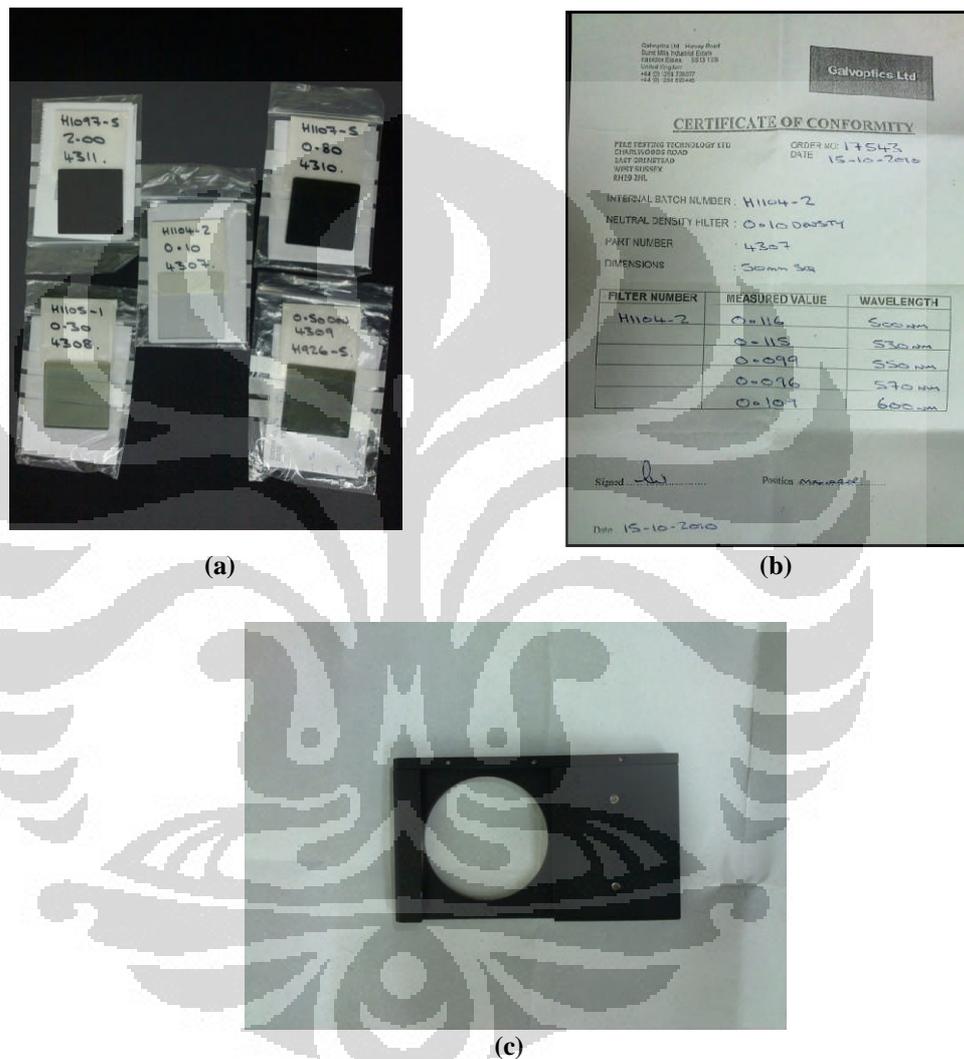
Dari gambar 3.10., dapat dilihat hasil pengukuran arus yang melalui kabel NYA  $2.5 \text{ mm}^2$  pada berbagai variasi voltase. Arus diukur menggunakan *clamp meter*.



Gambar 3.13. Hasil kalibrasi arus alat penguji kabel.

### 3.3.2. Kalibrasi DIN 50055

Kalibrasi hasil densitas asap atau *smoke optical density* dilakukan dengan menggunakan lensa-lensa dengan nilai densitas yang sudah dikalibrasi dari Galvoptics Ltd. Lensa diletakkan pada receiver dengan menggunakan alat penyangga lensa.

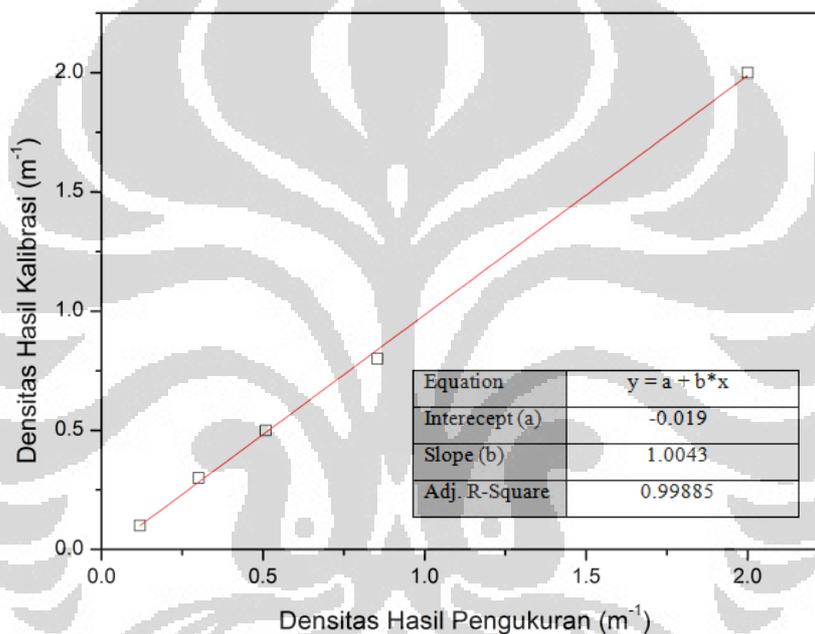


**Gambar 3.14.** Perangkat kalibrasi DIN 50055 (a) lensa kalibrasi (b) sertifikat kalibrasi (c) penyangga lensa.

Hasil pengukuran transmisi dengan lensa-lensa tersebut kemudian diubah menjadi nilai densitas dengan persamaan 2.13. Densitas hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan densitas yang telah dikalibrasi, terlihat seperti pada gambar 3.15., Hasil penyesuaian grafik menunjukkan hasil pengukuran linier dengan hasil terkalibrasi.

**Tabel 3.2.** Hasil pengukuran densitas menggunakan lensa kalibrasi.

Transmisi (%)	Densitas Hasil Pengukuran ( $m^{-1}$ )	Densitas Hasil Kalibrasi ( $m^{-1}$ )
76	0.119	0.1
50	0.301	0.3
31	0.508	0.5
14	0.853	0.8
1	2	2

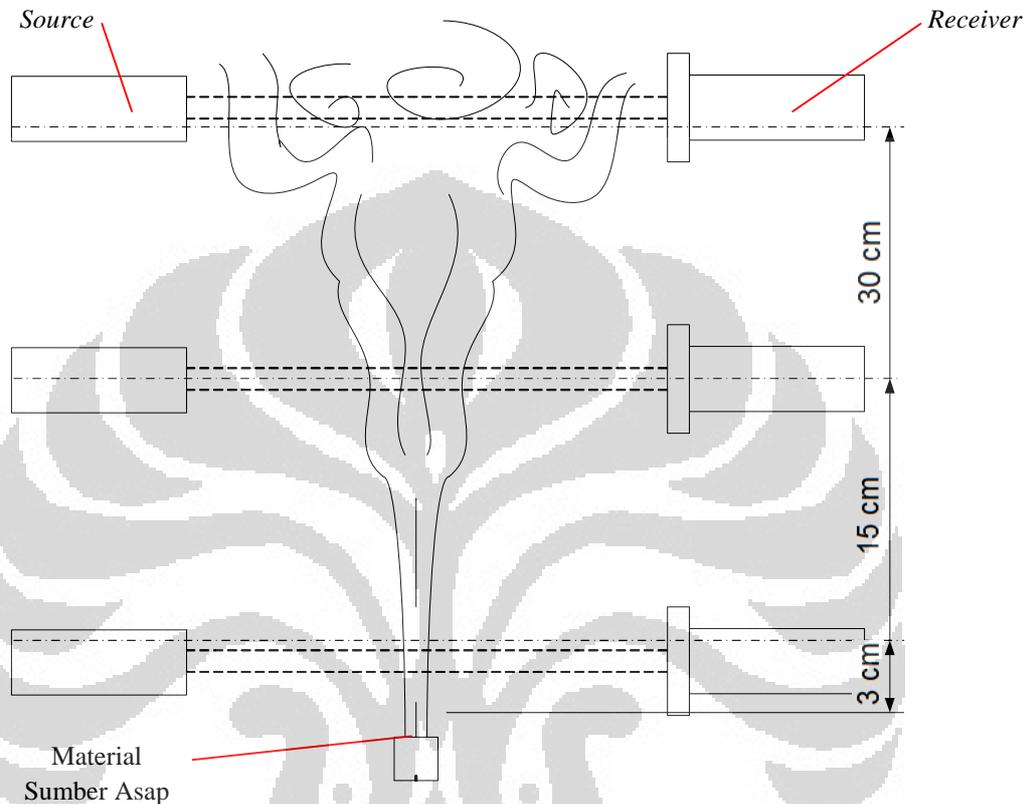
**Gambar 3.15.** Hasil kalibrasi densitas DIN 5005.

### 3.4. Prosedur Eksperimen

Prosedur dalam melakukan eksperimen ini adalah :

1. Mempersiapkan kabel NYA sesuai dengan spesifikasi yang sudah ditentukan.
2. Mempersiapkan material uji dengan spesifikasi di bawah ini :
3. Mengatur FLUKE® *Infrared Thermometer 568 Series* agar selalu mengukur pada material uji yang dipanaskan.

4. Mempersiapkan *Smoke Density Photometric System* (DIN 50055). Alat ini mengukur pada tiga ketinggian yang berbeda, yaitu 3 cm di atas sumber asap (ketinggian minimum), 15 cm di atas sumber asap (ketinggian medium), dan 30 cm di atas sumber asap (ketinggian maksimum).



**Gambar 3.16.** Variasi ketinggian pengukuran densitas asap.

5. Mempersiapkan kamera CCD dalam kondisi merekam.
6. Menempatkan kabel NYA yang telah dililit pada kutup penjepit dari alat pemanas kabel.
7. Material uji diletakkan pada lilitan kabel NYA dengan baik.
8. Memastikan semua alat perekam data, yaitu data temperatur, densitas asap, serta video, telah terhubung ke komputer dan siap dijalankan.
9. Menyalakan alat pemanas kabel, sehingga arus mengalir ke kabel dengan arus konstan sebesar 95 A, bersamaan dengan memuai perekaman data selama 90 detik.

### 3.5. Pengolahan Data Video

Salah satu data yang diperoleh dari penelitian ini adalah rekaman video hasil CCD Camera. Hasil rekaman video ini harus diproses lebih lanjut agar bisa dilakukan pengolahan data sesuai dengan tujuan awal penelitian. Proses tersebut dijelaskan pada uraian dibawah ini :

#### 1. Pemecahan video

Video yang didapat dari penelitian ini dipecah-pecah menjadi *frame* yang memrepresentasikan visualisasi dari setiap detik selama eksperimen. Hal ini sangat penting agar pengolahan data berupa citra dapat dilakukan. Hasil yang dapat diperoleh dari data citra ini berupa waktu awal kemunculan asap, visualisasi pergerakan asap, luas area asap, serta nilai grayscale dari citra asap dari waktu ke waktu.

Pemecahan video dilakukan menggunakan pirani lunak Software Club Video Decompiler® yang mampu memecah video menjadi citra dengan format JPEG. *Software* ini adalah *freeware* sehingga dapat diunduh dengan mudah.



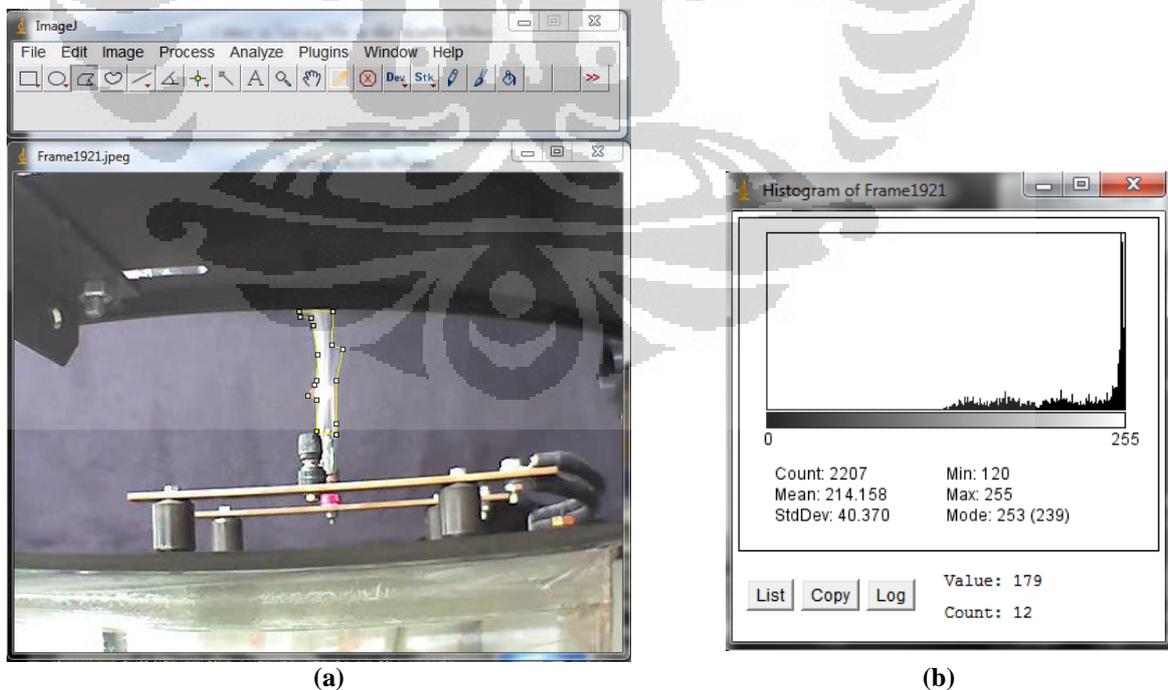
Gambar 3.17. Software Club Video Decompiler®.

## 2. Pendeteksian dengan *software* smokedetection [11]

Bagian terpenting dari tahap ini ialah mengatur nilai *threshold* GMM dari pendeteksian. Hal ini disebabkan karena *threshold* yang tinggi dapat menyebabkan luas asap yang terlihat secara visual tidak terdeteksi. *Threshold* yang terlalu rendah juga menyebabkan kesalahan pendeteksian. Pada sistem ini, kami menggunakan Microsoft Visual Studio 2005 untuk melakukan pemrograman dan juga melakukan debugging program. Setelah itu, didapat citra hasil pendeteksian. Hal ini ditujukan agar hasil luasan yang merupakan output dari pendeteksian dapat diukur.

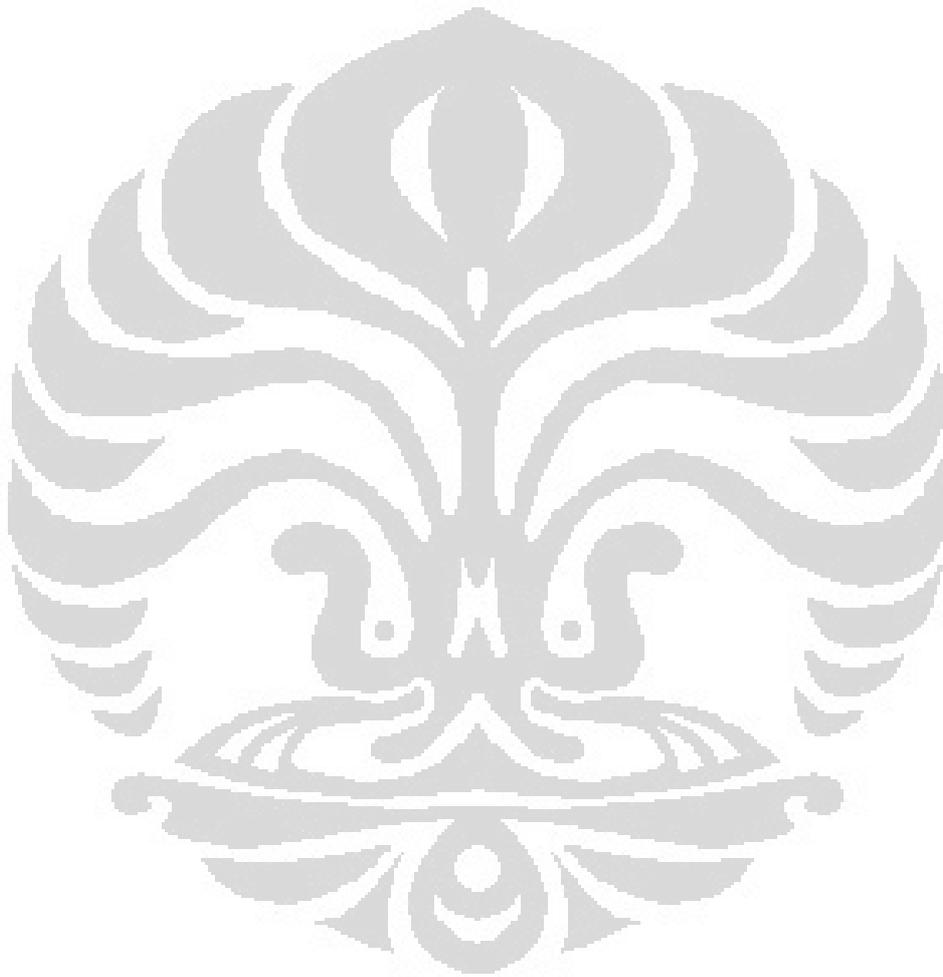
## 3. Pengukuran pixel intensity asap

Untuk pengukuran *pixel intensity* dari citra asap, digunakan *software* ImageJ®. Pertama kali tipe citra dirubah dari RGB *true color* menjadi tipe *grayscale* untuk mempermudah pengolahan. Selain itu, salah satu metode pengolahan citra yang umum dilakukan yaitu memanfaatkan citra *grayscale*.



**Gambar 3.15.** Pengukuran pixel intensity dengan ImageJ® (a) Citra asap (b) Histogram dari citra.

Dari histogram citra yang diperoleh, yang dimanfaatkan adalah nilai *mean gray value* atau rata-rata keabuan dari citra asap. Nilai ini juga merupakan representasi dari *pixel intensity* citra. Nilai inilah yang kemudian akan dikorelasikan dengan pengukuran langsung *smoke plume density* untuk mencari tahu, apakah metode ini bisa dimanfaatkan sebagai salah satu parameter mendefinisikan citra asap.



## BAB 4

### HASIL DAN ANALISIS

#### 4.1. Hubungan Karakteristik Material Dengan Asap

Asap yang dihasilkan oleh polimer yang dipanaskan merupakan proses dekomposisi secara termal dari komponen penyusun polimer itu sendiri. Kemunculan serta banyaknya jumlah asap yang dihasilkan merupakan fungsi dari karakteristik material terhadap perlakuan panas yang diterimanya. Karakteristik tersebut berupa laju perpindahan panas atau kenaikan temperatur, komposisi kimia, serta geometri dari polimer.

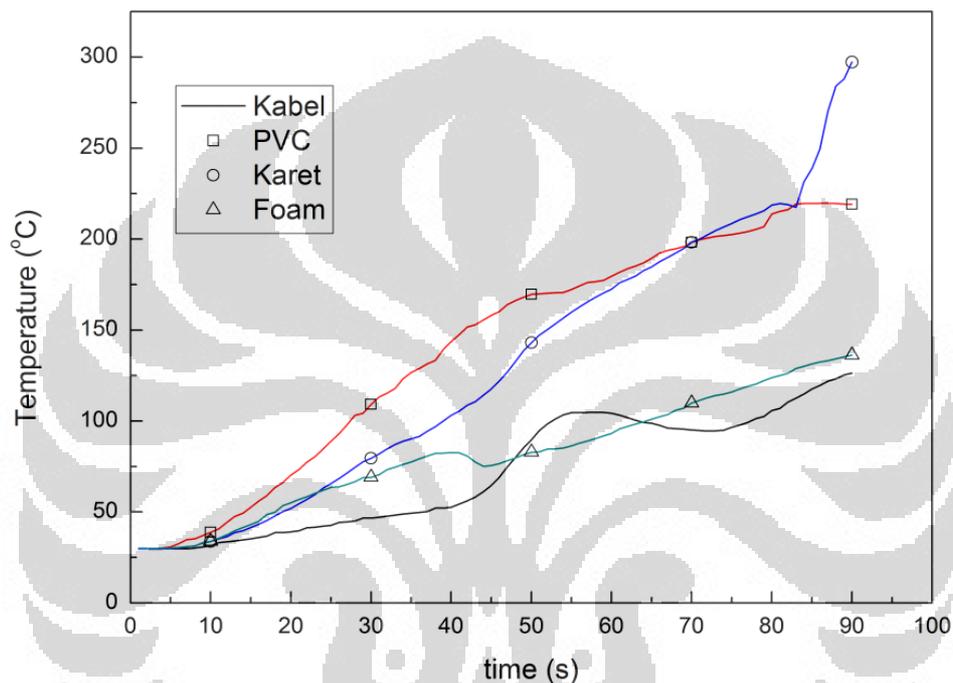
##### 4.1.1. Temperatur Permukaan Material

Laju perpindahan panas, dalam bentuk peningkatan temperatur pada material sangat bergantung dari karakteristik material itu sendiri. Karakteristik yang memberikan dampak signifikan ialah karakteristik termal berupa konduktivitas termal, ekspansi termal, panas jenis, serta difusivitas termal. Metode perpindahan panas pada material *poreless* dengan massa jenis yang besar didominasi oleh konduksi. Namun, mekanisme perpindahan panas pada material jenis *porous solid*, yang umum ditemui dalam bangunan, merupakan kombinasi dari konduksi, konveksi, serta radiasi.

Kenaikan temperatur pada kabel serta material polimer yang tersambung pada lilitan kabel diukur dengan menggunakan temperatur non kontak infra merah. Artinya, temperatur yang diukur adalah temperatur permukaan terluar dari material. Gambar 4.1. menunjukkan grafik laju kenaikan temperatur dari kabel tembaga serta material polimer terhadap waktu. Grafik tersebut memperlihatkan secara jelas bahwa laju perpindahan panas dari sumber menuju permukaan material sangat dipengaruhi oleh karakteristik termalnya, khususnya nilai difusivitas termal.

Temperatur pada lilitan kabel diukur terlebih dahulu sebelum temperatur polimer diukur. Kabel tembaga, yang berperan sebagai sumber panas akibat adanya aliran listrik, justru memiliki laju kenaikan temperatur terendah dibandingkan material-material polimer. Ini menunjukkan adanya pengaruh akibat

metode menghasilkan panas dengan memanfaatkan arus yang besar. Pada persamaan 2.1. dijabarkan bahwa panas yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai resistansi listrik dari material. Tembaga adalah salah satu penghantar panas yang paling baik karena memiliki tahanan atau resistansi listrik yang rendah. Ini berarti panas yang dihasilkan, berdasarkan hukum Joule, lebih rendah dibandingkan material lainnya.



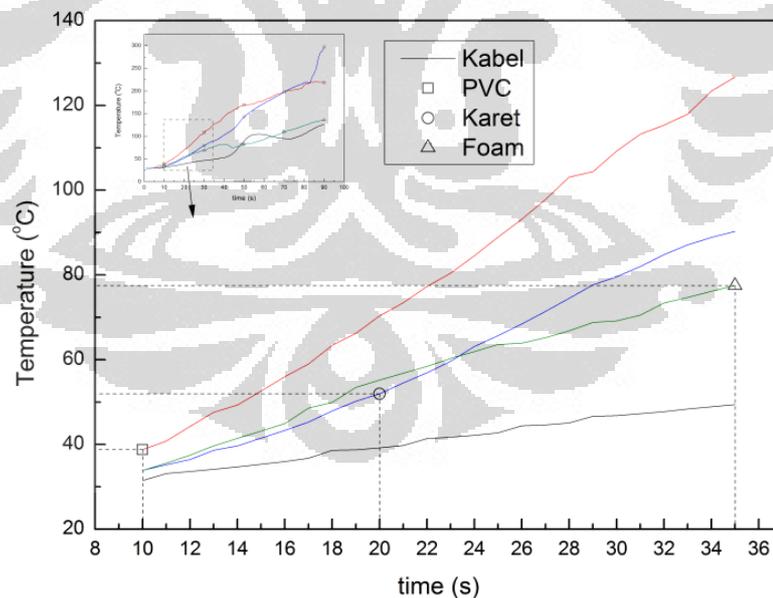
**Gambar 4.1.** Perbandingan laju kenaikan temperatur kabel dan polimer.

Untuk perbandingan kenaikan temperatur 3 material polimer yang diuji, yaitu isolasi PVC, foam, serta karet juga ditunjukkan pada grafik dalam gambar 4.1. Grafik menunjukkan bahwa material yang mengalami tren kenaikan temperatur terbesar adalah isolasi pvc, diikuti oleh karet serta foam. Merujuk kepada tabel 3.1. mengenai karakteristik termal material, foam memiliki laju perpindahan panas tercepat dibanding isolasi pvc maupun karet ( $\alpha_{foam} > \alpha_{pvc} > \alpha_{karet}$ ). Namun, sesuai dengan persamaan 2.4., panas yang diterima oleh permukaan luar polimer tidak hanya bergantung pada karakteristik termal tetapi juga bergantung terhadap jarak antara sumber panas ke permukaan luar, serta waktu pemanasan.

Faktor inilah yang membuat foam memiliki laju kenaikan temperatur lebih rendah daripada polimer lainnya. Jarak antara sumber panas, yaitu lilitan kabel tembaga berarus, dengan permukaan terluarnya lebih besar.

#### 4.1.2. Awal Kemunculan Asap

Asap yang dihasilkan dari pemanasan polimer pada penelitian ini merupakan asap hasil pembakaran secara pirolisis. Pirolisis muncul pada permukaan dalam polimer, bagian yang mengalami kontak secara langsung dengan sumber panas, sebagai hasil kenaikan temperatur yang tinggi. Proses ini umumnya tanpa ada campur tangan dari oksigen, sebab sumber panas dari kabel terisolasi oleh permukaan dalam polimer yang diletakkan pada lilitan kabel tersebut. Pirolisis didefinisikan sebagai perubahan komposisi material secara kimiawi yang terjadi karena panas. Produk dari pirolisis berupa material volatil berbentuk uap. Selama uap bergerak naik, tekanan uap yang rendah menyebabkan komponen dari uap tersebut mengalami kondensasi. Fenomena ini yang membuat asap hasil proses pirolisis memiliki warna seperti cahaya ,atau terang.



**Gambar 4.2.** Perbandingan awal kemunculan asap pada berbagai polimer.

Gambar 4.2. memperlihatkan waktu dan suhu pada kondisi awal kemunculan asap dari material polimer yang diujikan. Dapat dilihat bahwa material isolasi pvc memproduksi asap lebih cepat dan dengan temperatur yang

lebih rendah. Karet menghasilkan asap lebih cepat dibandingkan foam dan dengan suhu yang lebih rendah. Terlihat jelas bahwa material foam membutuhkan waktu yang lama, serta suhu yang lebih tinggi untuk memproduksi asap.

Pada pengujian material isolasi pvc, material dililitkan pada permukaan luar lilitan kabel tembaga. Karena sifatnya yang memang adhesif, maka kontak yang terjadi antara isolasi pvc dengan permukaan lilitan kabel tembaga sangat baik. Sehingga hampir tidak menyisakan udara yang terjebak diantaranya. Inilah yang menyebabkan laju kenaikan temperatur yang cepat serta kemunculan asap yang lebih awal dibandingkan material uji lainnya.

Sedangkan untuk material uji foam, kontak permukaan dalam foam dengan lilitan kabel tidak terjadi begitu baik. Karena pada dasarnya foam memang memiliki pori-pori yang besar, sehingga kontak permukaan secara langsung lebih sedikit. Selain itu kandungan udara yang terdapat didalam pori-pori foam cenderung memperlambat proses dekomposisi kimia, sehingga asap muncul lebih lama.

#### 4.1.3. Luas Asap

Area luasan asap merupakan hasil pengolahan rekaman video yang menggunakan CCD TelView<sup>®</sup> WPC 236 dengan memanfaatkan *software smokedetection* dari Suwarno [11].

Frame hasil pendeteksian



Frame blob

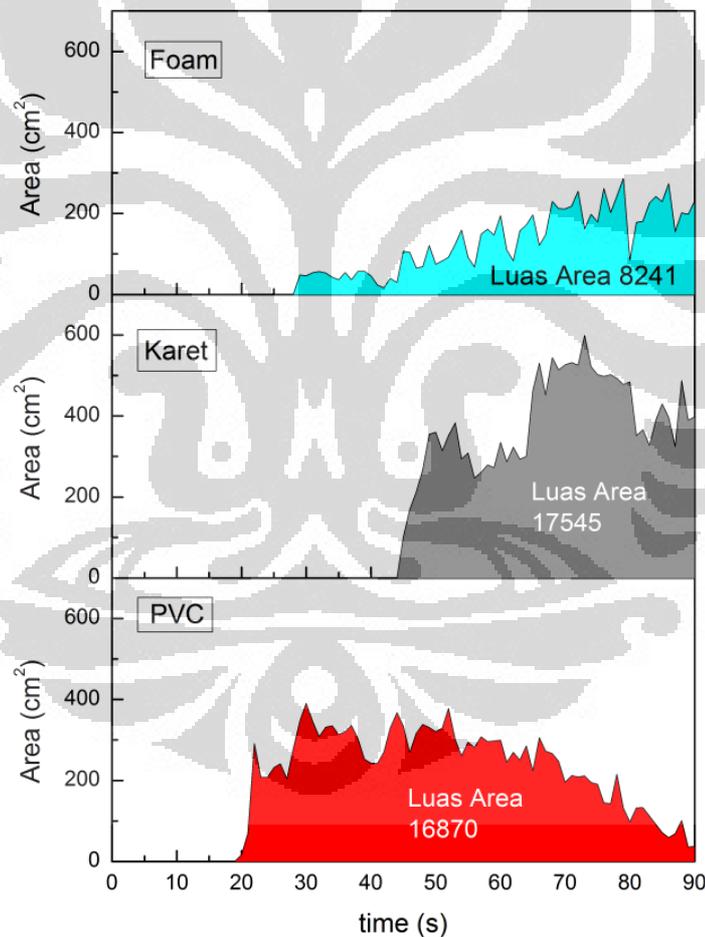


**Gambar 4.3.** Frame video hasil pendeteksian dan blob-nya.

Untuk mempermudah dan meningkatkan keakurasian pengukuran, luasan asap yang diukur merupakan luasan dari citra blob hasil pengolahan citra. Parameter Gaussian Mixture Model dalam metode segmentasi latar belakang

dengan objek yang bergerak adalah pada `bg_thershold` menggunakan 3, sedangkan `std_threshold` menggunakan 0.3. *Threshold* pada Gaussian Mixture Model diatur cukup rendah untuk mendapatkan pendeteksian yang lebih sensitif, sehingga diharapkan asap dapat terdeteksi sejak pertama kali muncul.

Untuk menghitung luas blob digunakan software `imageJ`<sup>®</sup>. Software ini dipilih karena merupakan program pengolahan citra yang mudah digunakan. Proses perhitungan dimulai dengan mencari skala perbandingan pixel pada citra dengan jarak sebenarnya dalam cm. Kemudian luasan citra asap diukur dari frame ke frame untuk setiap asap hasil pemanasan polimer. Hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.4. dibawah ini.



**Gambar 4.4.** Grafik perbandingan luas asap polimer dari waktu ke waktu.

Seperti yang dijelaskan pada sub-bab 4.1.2. mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi produksi asap dari polimer, terlihat bahwa banyaknya asap yang dihasilkan selama pengujian untuk setiap material uji polimer pun berbeda-beda.

Karet dan isolasi pvc menghasilkan asap dengan jumlah yang hampir sama hingga waktu pengujian selesai. Yang membedakan keduanya adalah waktu kemunculan asap serta akselerasi proses dekomposisi kimia. Karet membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mengurai struktur kimianya karena nilai difusivitas termal lebih kecil dibandingkan material lainnya. Namun angka peningkatan produksi asap karet sangat tinggi sehingga menghasilkan asap dalam jumlah yang banyak.

Untuk asap yang dihasilkan polimer jenis foam padat terlihat lebih sedikit dan lebih tipis dibandingkan polimer lainnya. Ini disebabkan material foam itu sendiri memiliki difusivitas termal yang cukup besar, sehingga membuat material ini mudah meleleh selama proses pemanasan. Observasi yang dilakukan selama eksperimen menunjukkan bahwa permukaan dalam foam tidak bersentuhan langsung dengan lilitan kabel tembaga karena sebagian materialnya meleleh pada awal proses pemanasan.

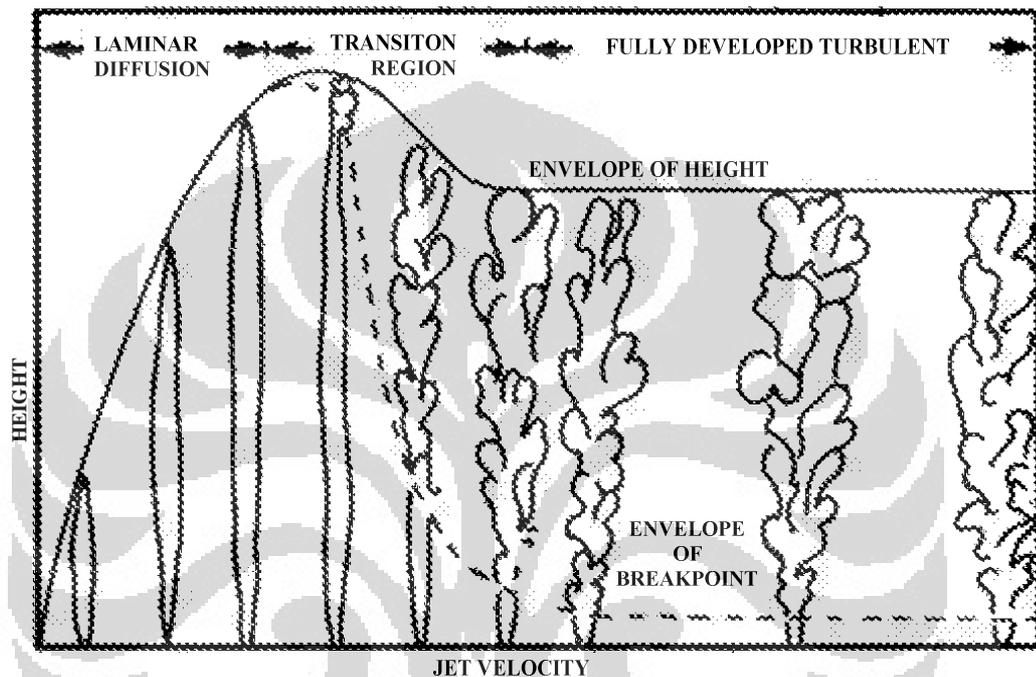
#### 4.1.4. *Smoke Plume Density* Pada Variasi Ketinggian

*Smoke plume*, yang bergerak keatas dari sumber panas, dipengaruhi oleh fenomena konveksi bebas dengan istilah *buoyant plume*. Bentuk dari *buoyant plume* ini ditentukan oleh interaksinya dengan fluida lingkungan sekitarnya. *Buoyancy* itu sendiri merupakan pengaruh dari kombinasi *density gradient* pada fluida dan *body force* yang proporsional terhadap densitas fluida. Pada aliran asap, juga untuk aliran api tentunya, fenomena konveksi bebas dimana *density gradien* dipengaruhi oleh temperatur sedangkan *body force* dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Pada kasus pergerakan asap ini, dimana fluida tidak dipengaruhi oleh permukaan apapun, alirannya dapat terjadi dalam bentuk *buoyant jet*.

Gaya apung per satuan volume ditahan oleh gaya drag, terutama viskositas, antara asap dengan udara sekitar. Besaran relatif antara dua gaya berbeda ini dinyatakan sebagai bilangan Grashof, seperti yang dijabarkan pada persamaan 2.5. Bilangan Grashof memainkan peran yang sama seperti bilangan Reynolds untuk aliran pada umumnya.

Pergerakan asap secara konveksi natural tidak lepas dari gangguan-gangguan kecil, yang membesar seiring dengan arah pergerakan asap yang keatas. Hal ini menyebabkan perubahan kondisi aliran laminar menuju kondisi aliran

turbulen, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5. Gangguan ini menguat atau melemah tergantung dari rasio gaya apung terhadap gaya viskositas (bilangan Garshof). Selama bilangan Garshof pada suatu aliran asap rendah, maka aliran akan tetap laminar. Namun jika bilangan Garshof sudah cukup besar ( $Gr > 1 \times 10^9$ ), maka gangguan akan meningkat, dan aliran akan mengalami transisi menuju turbulensi.



**Gambar 4.5.** Tinggi momentum jet sebagai fungsi dari kecepatan, serta perubahan aliran dari laminar menuju turbulen.

Efek dari turbulensi akan membuat aliran asap memiliki fluktuasi kecepatan yang acak dan tidak stabil. Fluktuasi ini meningkatkan perpindahan energi dan momentum dari aliran asap ke lingkungan sekitarnya, menyebabkan peningkatan gesekan antar permukaan batas mereka. Pencampuran fluida asap dengan fluida lingkungan sekitar akibat dari fluktuasi turbulen juga menyebabkan lapisan fluida dibagian turbulen menjadi lebih tipis dan profil (dari kecepatan, temperatur, dan konsentrasi) lebih kecil dari pada aliran laminar.

Begitu juga pengaruhnya terhadap *optical density* dari asap. Dengan pola aliran yang semakin keatas semakin acak, maka konsentrasi partikel – partiel volatil pembentuk asap akan semakin menyebar dan tipis. Namun, besarnya nilai density dari asap hasil pemanasan polimer bergantung dari karakteristiknya.

Momentum awal serta laju produksi asap untuk setiap material uji polimer pada penelitian ini memiliki nilai maksimal yang berbeda-beda.

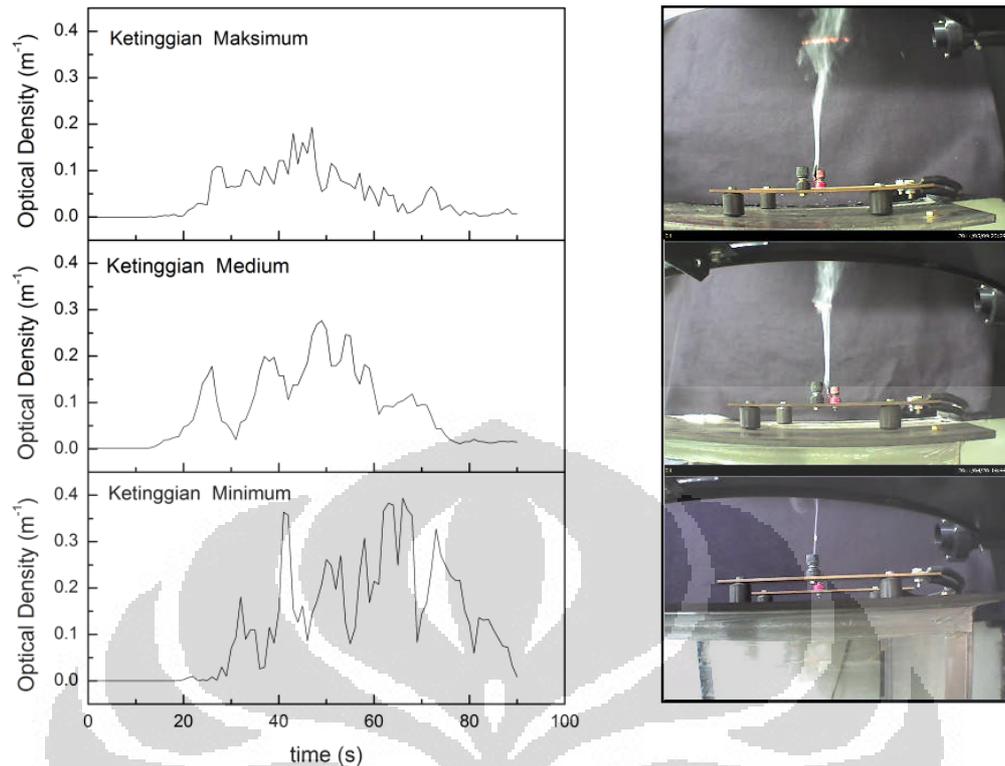
Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6. untuk hasil pengukuran smoke plume density isolasi pvc pada 3 ketinggian berbeda, profil perkembangan dari aliran laminar lebih besar dibandingkan pola aliran turbulen. Sangat jelas terlihat bahwa semakin pola aliran menuju aliran turbulen, maka *smoke plume density* juga akan semakin berkurang.

Ketinggian Material	30 cm	15 cm	3 cm
PVC	2.09 x 108	2.61 x 107	2.09 x 105
Karet	4.65 x 108	5.81 x 107	4.65 x 105
Foam	8.72 x 107	1.09 x 107	8.72 x 104

**Tabel 4.1.** Bilangan Grashof aliran asap pada kondisi densitas optimum.

Penjelasan fenomena yang terjadi ini diperkuat dengan membandingkan nilai bilangan Grashof asap yang dihasilkan material polimer terhadap variasi ketinggian. Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 2.5., tidak ada nilai bilangan Grashof yang mencapai nilai kritisnya ( $Gr > 1 \times 10^9$ ). Hal ini disebabkan oleh nilai temperatur sumber yang terukur adalah nilai temperatur permukaan material saja. Sangat mungkin bahwa nilai bilangan Grashof akan mencapai nilai kritisnya apabila temperatur sumber panas dapat diketahui, sebab nilainya lebih besar daripada temperatur permukaan material.

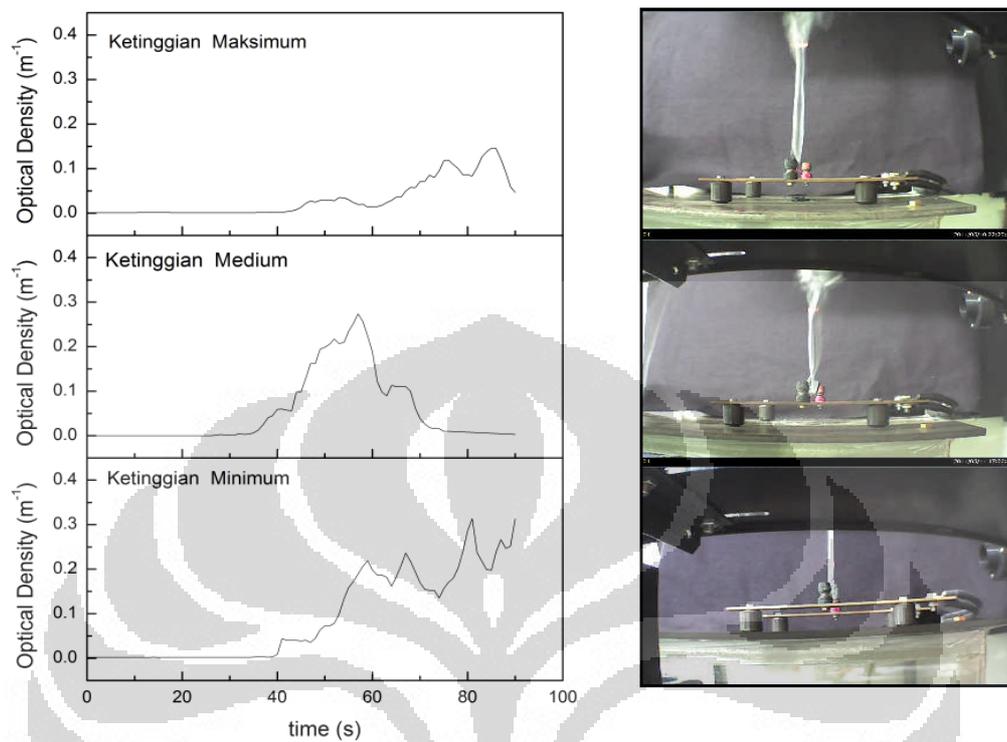
Tetapi dari tren membesarnya nilai Grashof seiring dengan besarnya level ketinggian asap dari sumber menunjukkan adanya perubahan pola aliran asap, dari laminar menuju turbulen. Nilai temperatur yang digunakan untuk mencari bilangan Grashof ditentukan ketika asap sudah mencapai nilai densitas maksimumnya pada setiap ketinggian.



**Gambar 4.6.** *Smoke Plume Density* PVC pada variasi ketinggian.

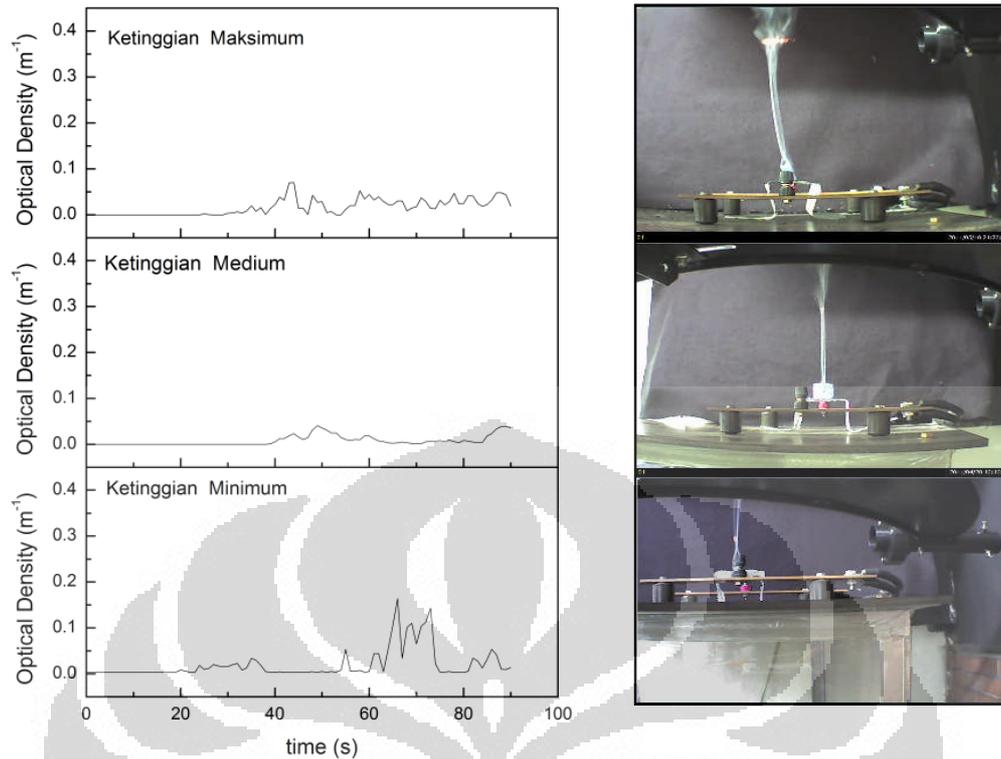
Jika dilihat dari nilai maksimum yang dicapai untuk tiap ketinggian, maka tren yang sama juga akan berlaku. Nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian minimum, medium, dan maksimum berturut-turut adalah  $0.393 \text{ m}^{-1}$ ,  $0.276 \text{ m}^{-1}$ , dan  $0.19 \text{ m}^{-1}$ . Terlihat jelas bahwa pola aliran mempengaruhi nilai *optical density* dari asap. Semakin turbulen pola aliran asap, maka nilai *optical density* dari asap akan semakin berkurang.

Fenomena yang sama juga berlaku untuk hasil pengukuran smoke plume density dari karet, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7. Nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian minimum, medium, dan maksimum berturut-turut adalah  $0.313 \text{ m}^{-1}$ ,  $0.274 \text{ m}^{-1}$ , dan  $0.145 \text{ m}^{-1}$ . Perbedaan yang tipis antara nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian minimum dan medium disebabkan oleh pola alirannya yang tidak begitu berbeda. Sebagian besar pola aliran pada pengukuran *optical density* pada ketinggian medium masih membentuk pola laminar, seperti yang terjadi pada pola aliran ketinggian minimum. Sedangkan untuk nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian maksimum lebih rendah karena pola alirannya sudah sangat acak, sehingga asap menjadi lebih tipis.



**Gambar 4.7.** *Smoke Plume Density* karet pada variasi ketinggian.

Untuk hasil pengukuran smoke plume density dari karet, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7. Nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian minimum, medium, dan maksimum berturut-turut adalah  $0.164 \text{ m}^{-1}$ ,  $0.041 \text{ m}^{-1}$ , dan  $0.069 \text{ m}^{-1}$ . Seharusnya, nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian medium lebih besar daripada nilai *optical density* terbesar untuk ketinggian maksimum. Namun ini tidak terjadi pada pengukuran pada material foam ini. Hal ini kemungkinan disebabkan tidak stabilnya asap selama pengukuran dilakukan.



**Gambar 4.8.** *Smoke Plume Density* foam pada variasi ketinggian.

Jika membandingkan hasil pengukuran *optical density* pada 3 material polimer yang berbeda ini, maka dapat diketahui bahwa nilai *optical density* maksimum dari asap yang dihasilkan oleh material ini berturut-turut dari terbesar ke yang terkecil adalah isolasi PVC, karet, dan terakhir adalah foam. Fenomena ini sejalan dengan tren kenaikan temperatur yang dijabarkan pada subbab 4.1.1. Artinya karakteristik material dari polimer, selain mempengaruhi laju kenaikan temperatur, juga ikut mempengaruhi jumlah serta ketebalan asap yang dihasilkan melalui proses pirolisis.

<b>Ketinggian</b> <b>Material</b>	<b>30 cm</b>	<b>15 cm</b>	<b>3 cm</b>
<b>PVC</b>	0.190	0.276	0.393
<b>Karet</b>	0.145	0.274	0.313
<b>Foam</b>	0.069	0.041	0.164

**Tabel 4.2.** Nilai densitas ( $m^{-1}$ ) optimum asap berbagai material polimer pada variasi ketinggian.

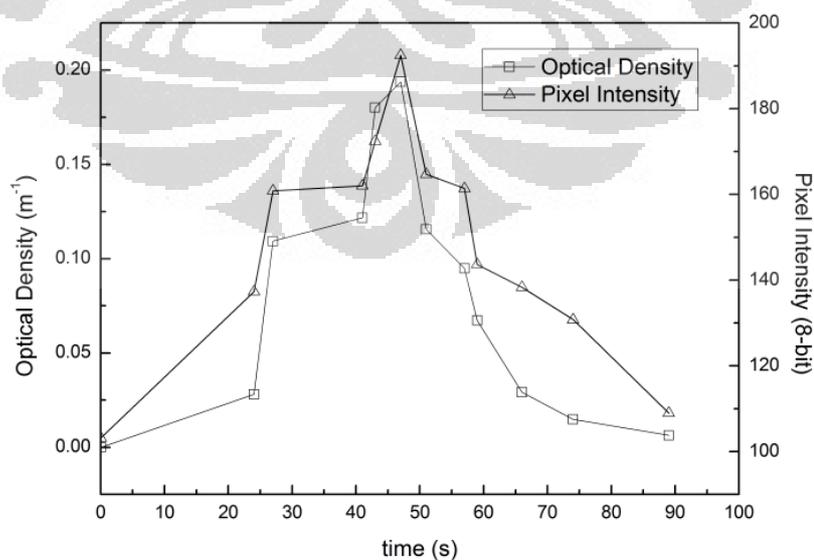
## 4.2. Korelasi Pengukuran Langsung Dengan Metode Pengolahan Citra

Korelasi antara hasil pengukuran *smoke plume density* secara langsung dengan hasil pengolahan citra asap perlu dilakukan, sebab diharapkan dapat meningkatkan akurasi sistem deteksi asap berbasis video. Hasil pengukuran langsung *smoke plume density* telah dijabarkan pada subbab 4.1.4., dengan nilai yang diperoleh adalah optical density ( $m^{-1}$ ). Sedangkan hasil dari pengolahan citra didapat dengan metode yang dijabarkan pada subbab 3.5, dimana hasilnya adalah berupa *pixel intensity* atau *mean gray value* citra dengan interval 0-255. Untuk memudahkan proses korelasi, persamaan yang digunakan ialah persamaan 2.14.

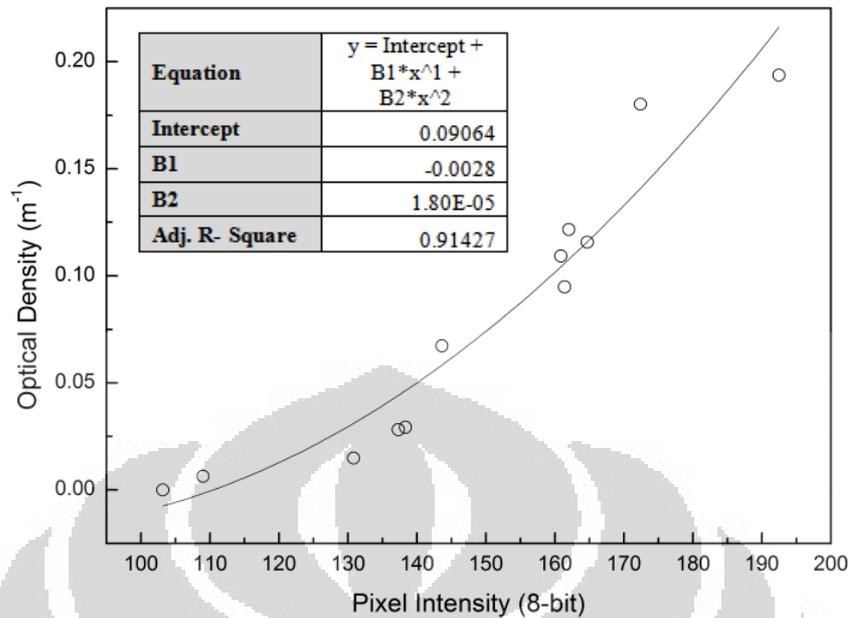
Tingkat keakurasian dari korelasi ini ditentukan dengan mencari nilai coefficient of determination (COD) atau R-Square dari kurva. Semakin nilai R-Square mendekati 1 (interval 0 sampai 1), artinya korelasi antara optical density dengan pixel intensity semakin kuat.

### 4.2.1. PVC

Pengukuran pixel intensity pada citra asap yang dihasilkan isolasi PVC, seperti halnya mengukur smoke plume density, juga dilakukan sesuai dengan variasi ketinggian. Kemudian pada setiap hasil ketinggian yang berbeda dilakukan korelasi. Ini dilakukan untuk menguji tingkat keakurasian korelasi, karena untuk tiap material dilakukan 3 kali korelasi.

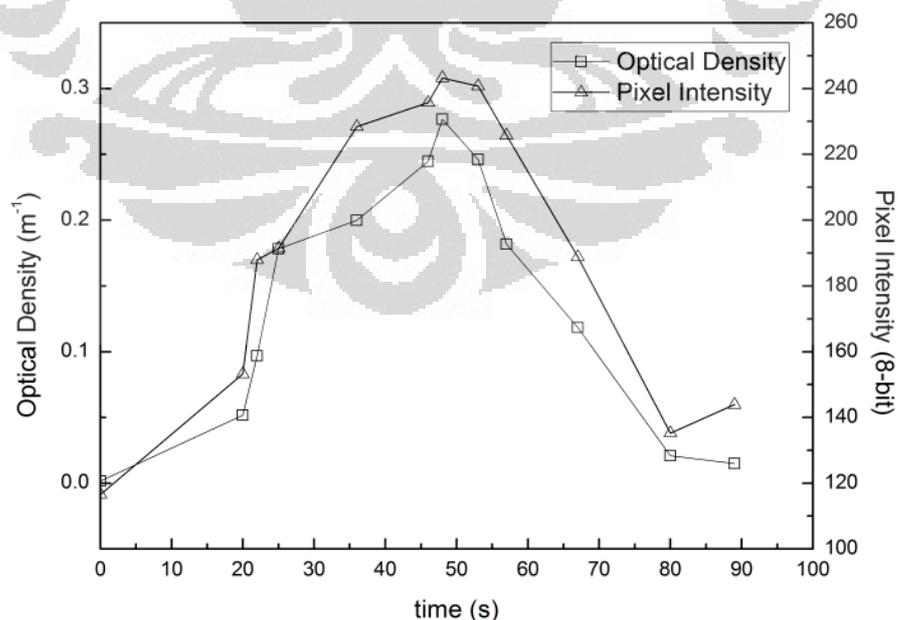


**Gambar 4.9.** Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* PVC maksimum terhadap waktu.

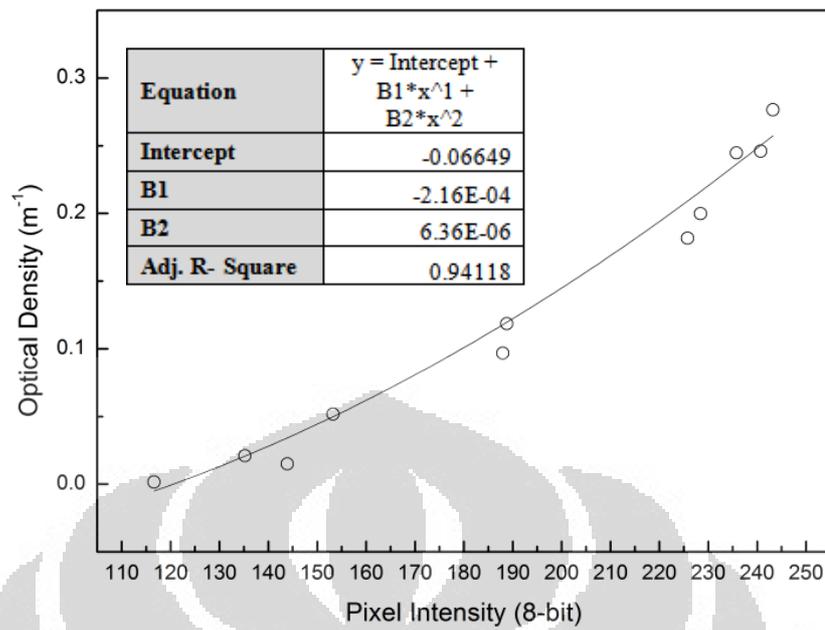


**Gambar 4.10.** Hasil korelasi PVC pada ketinggian maksimum.

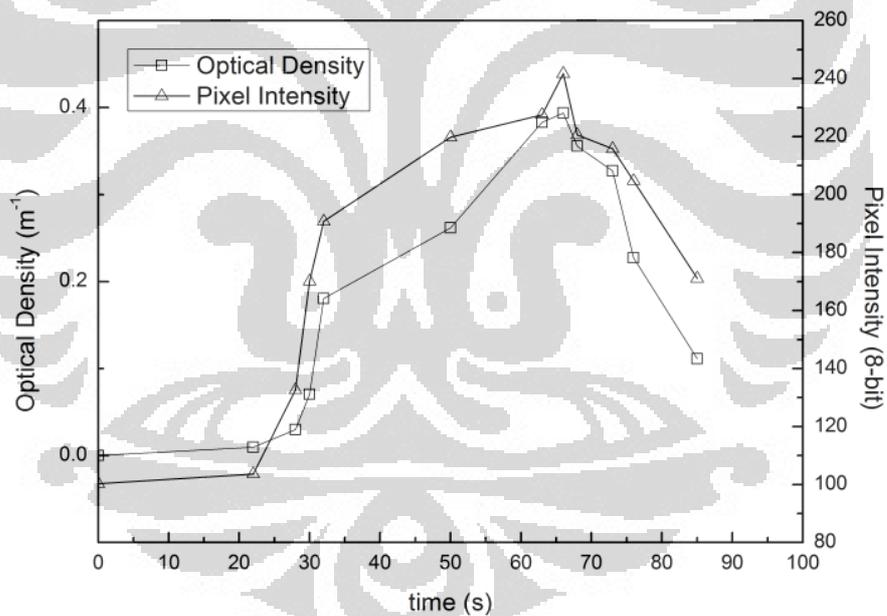
Gambar 4.10. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh isolasi PVC pada ketinggian maksimum. Persamaan polynomial orde 2 digunakan untuk menyesuaikan kurva sebab hal ini juga digunakan untuk kalibrasi *optical density* oleh *software* pengolahan citra ImageJ®. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.914.



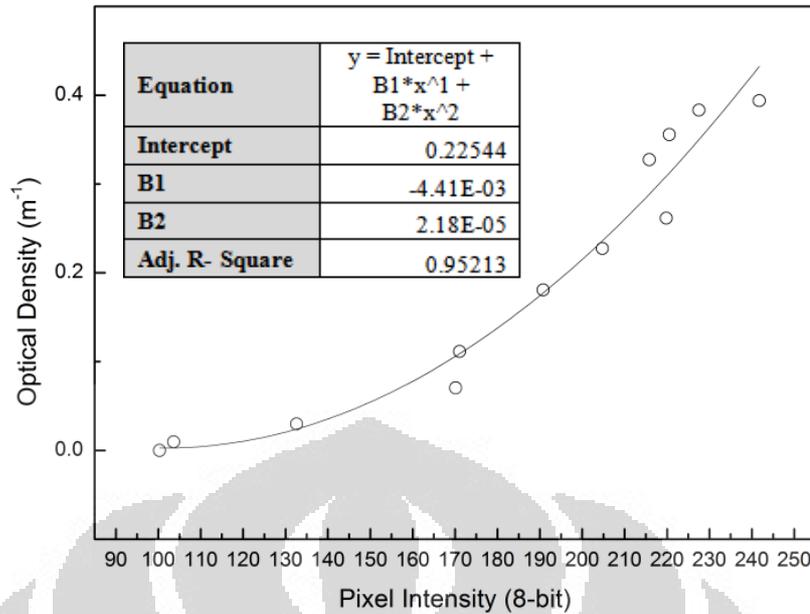
**Gambar 4.11.** Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* PVC medium terhadap waktu.



Gambar 4.12. Hasil korelasi PVC pada ketinggian medium.



Gambar 4.13. Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* PVC minimum terhadap waktu.

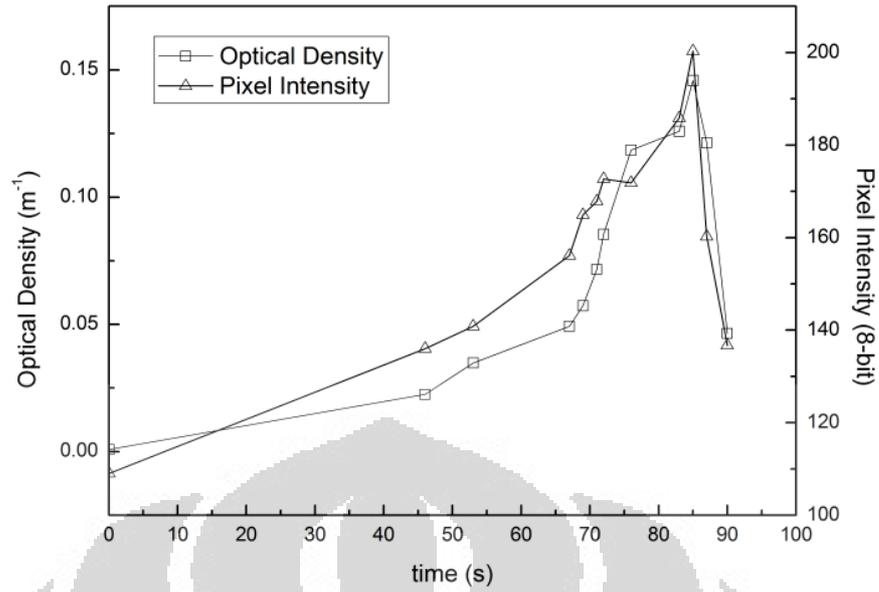


**Gambar 4.14.** Hasil korelasi PVC pada ketinggian minimum.

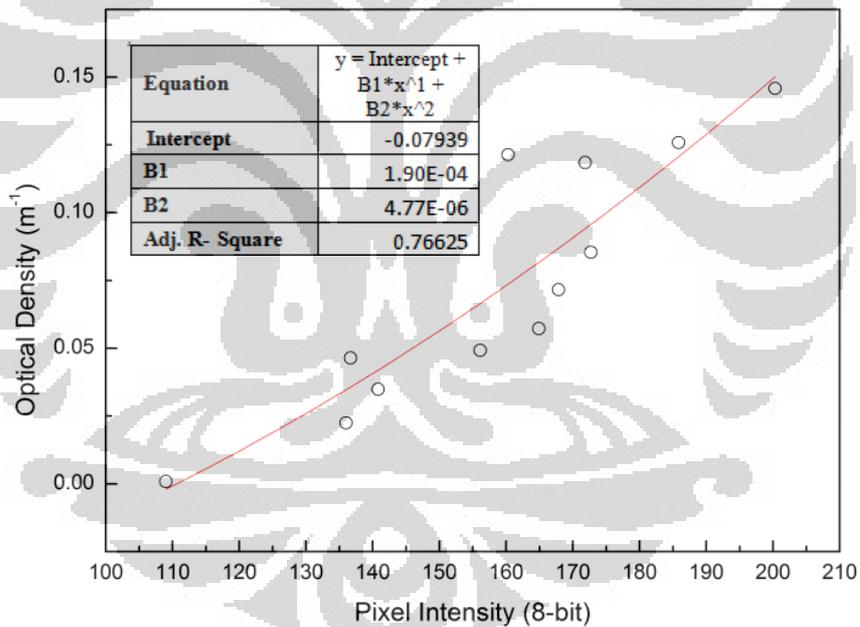
Gambar 4.12. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh isolasi PVC pada ketinggian medium. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.941. Sedangkan gambar 4.14. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh isolasi PVC pada ketinggian minimum. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.952.

#### 4.2.2. Karet

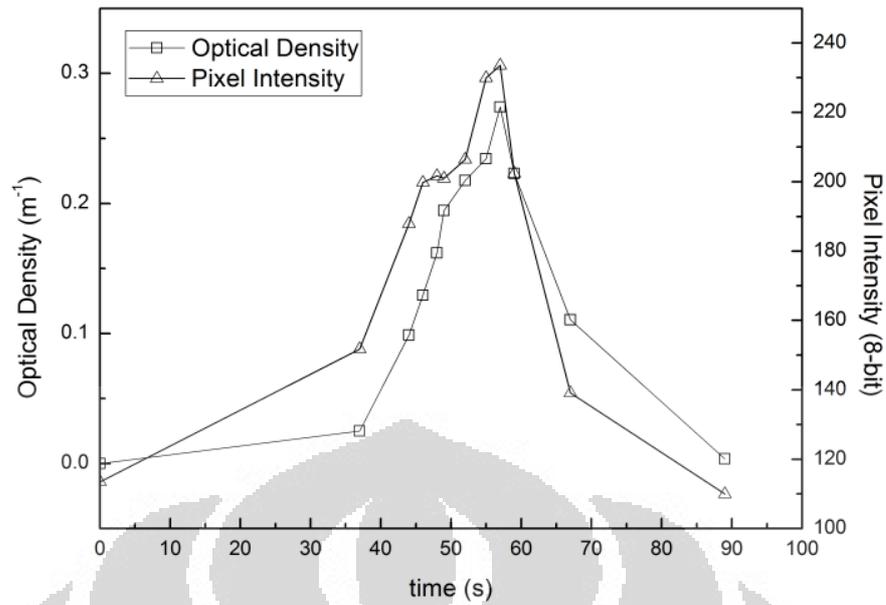
Gambar 4.16. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh karet pada ketinggian maksimum. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.766.



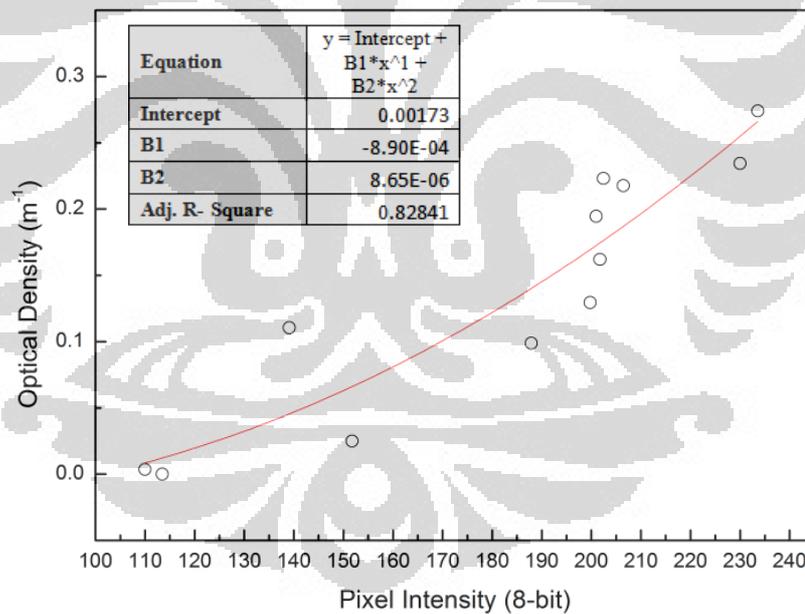
Gambar 4.15. Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* karet maksimum terhadap waktu.



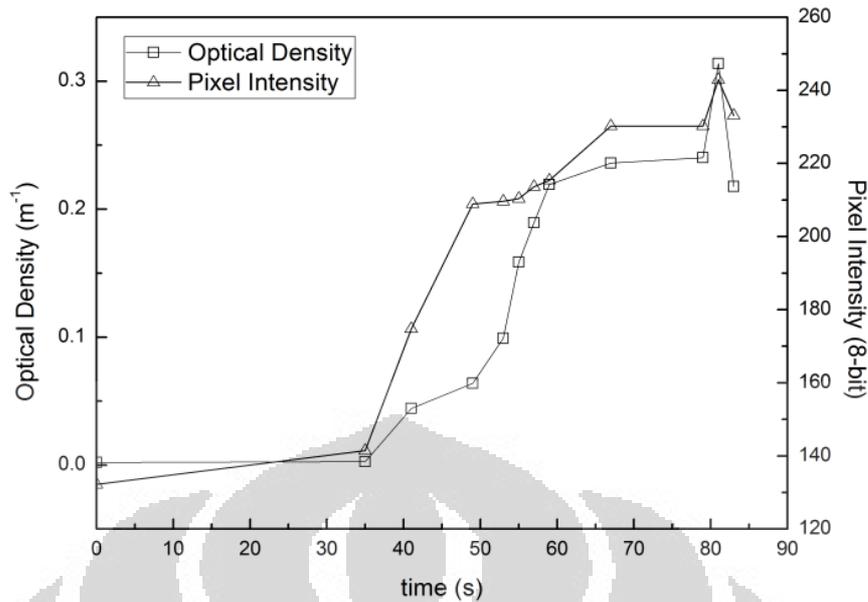
Gambar 4.16. Hasil korelasi karet pada ketinggian maksimum.



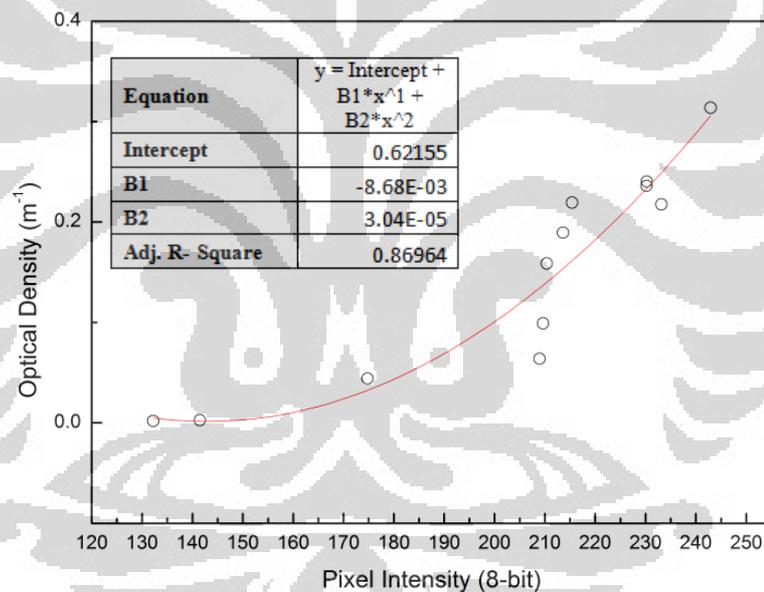
**Gambar 4.17.** Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* karet medium terhadap waktu.



**Gambar 4.18.** Hasil korelasi karet pada ketinggian medium.



Gambar 4.19. Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* karet minimum terhadap waktu.

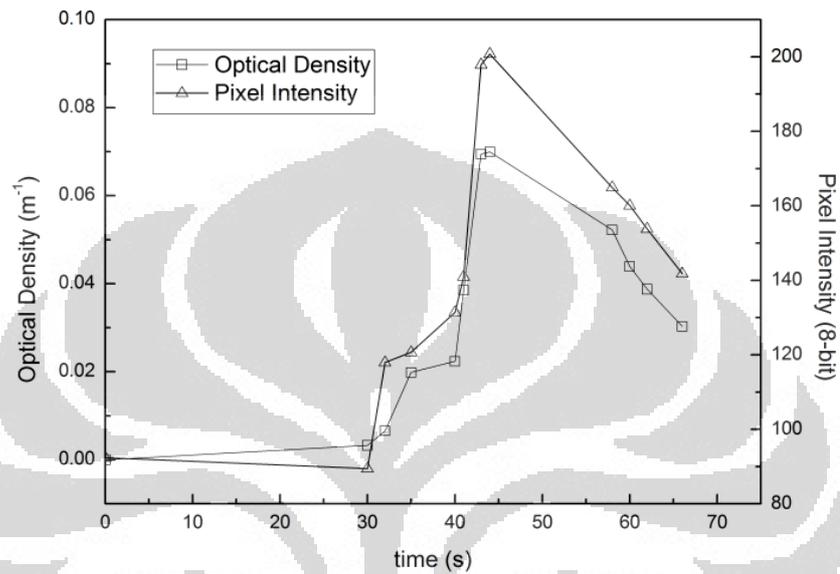


Gambar 4.20. Hasil korelasi karet pada ketinggian minimum.

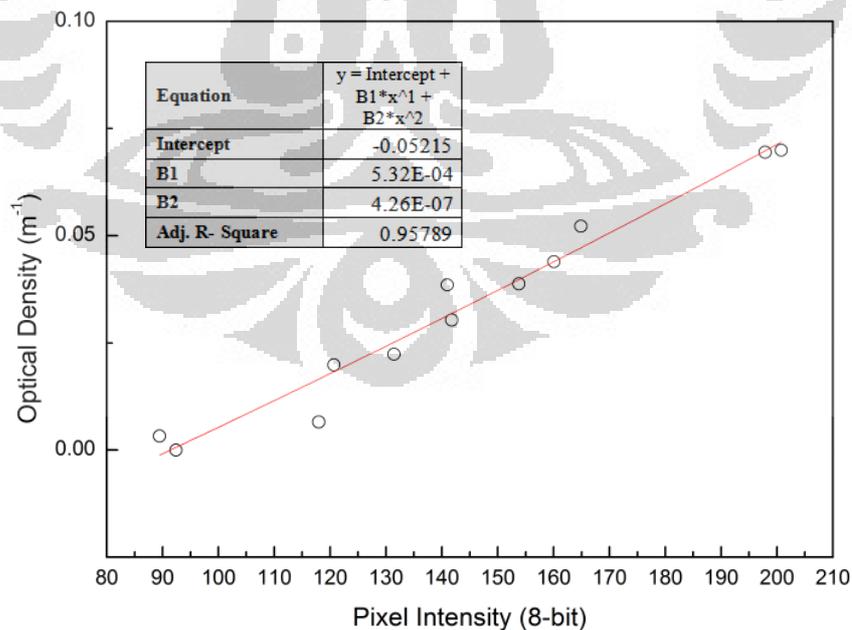
Gambar 4.18. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh karet pada ketinggian medium. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.828. Sedangkan gambar 4.20. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh karet pada ketinggian minimum. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.869.

### 4.2.3. Foam

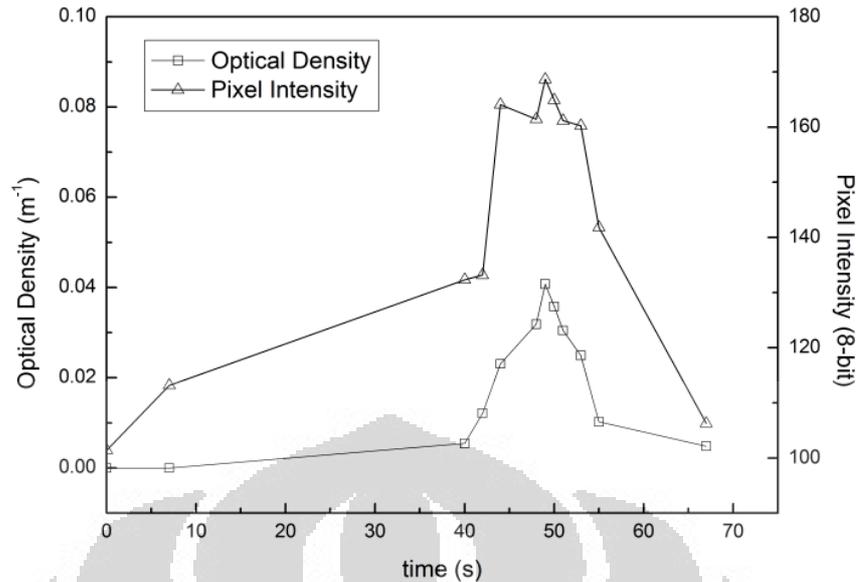
Gambar 4.21. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh foam pada ketinggian maksimum. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.957.



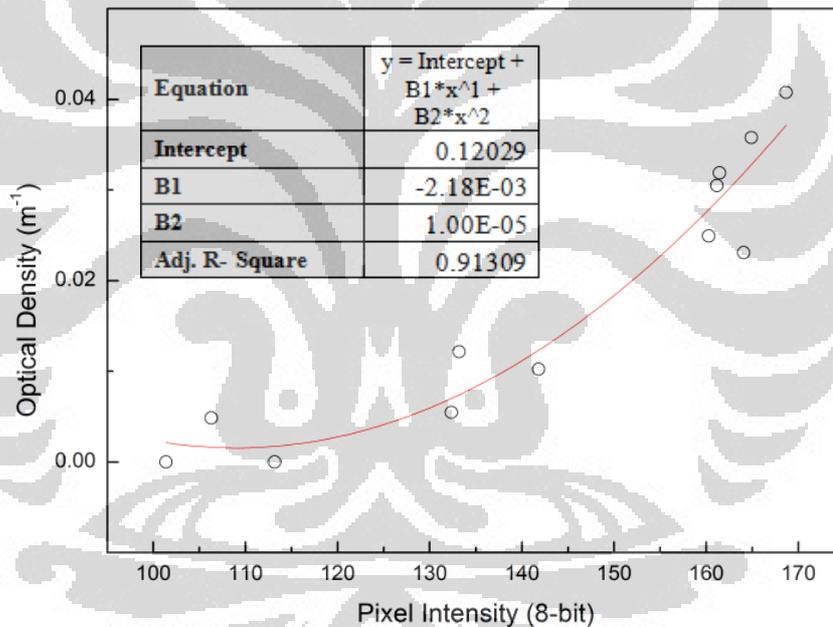
**Gambar 4.21.** Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* foam maksimum terhadap waktu.



**Gambar 4.22.** Hasil korelasi foam pada ketinggian maksimum.

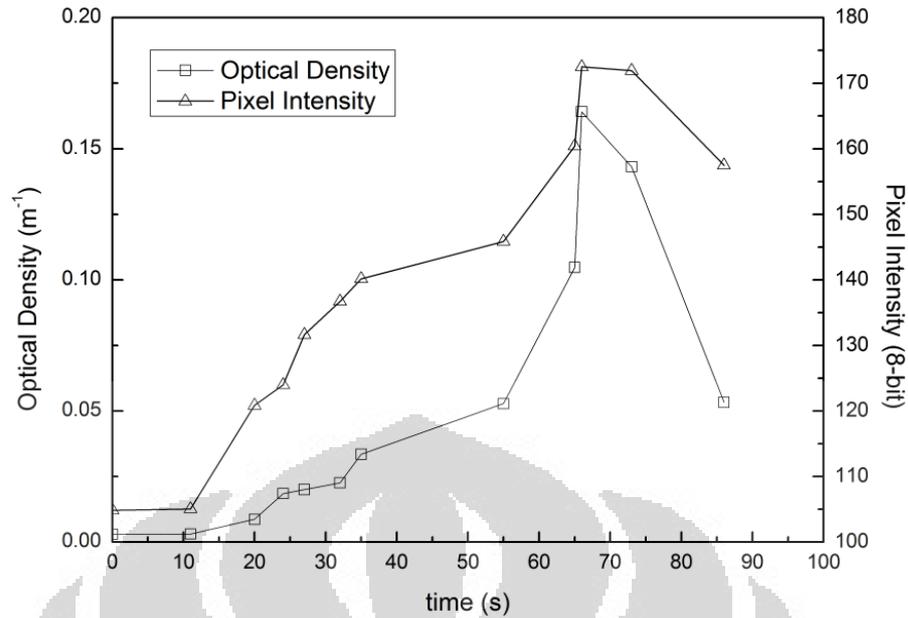


Gambar 4.23. Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* foam medium terhadap waktu.

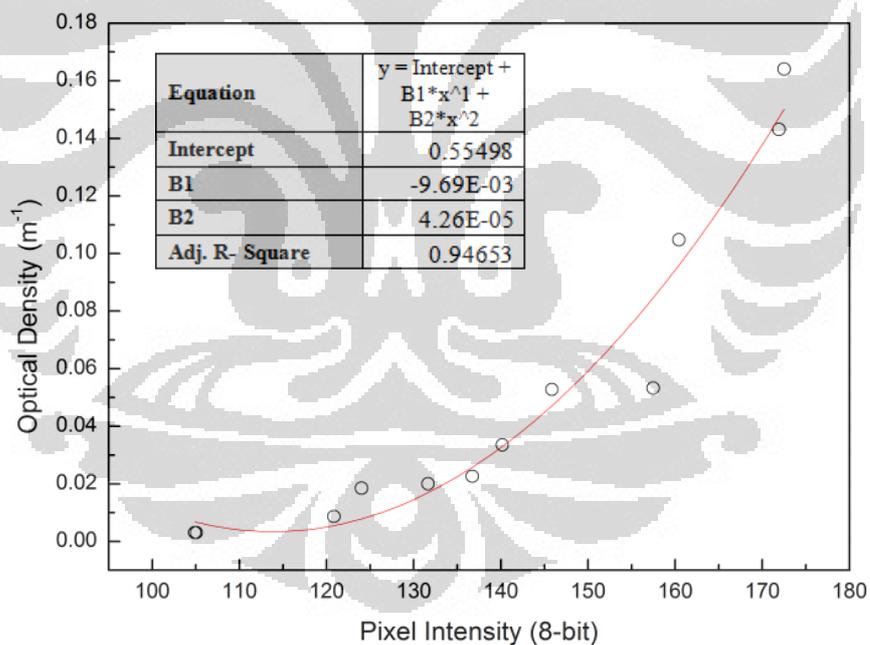


Gambar 4.24. Hasil korelasi foam pada ketinggian medium.

Gambar 4.24. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh karet pada ketinggian medium. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.913. Sedangkan gambar 4.26. menunjukkan korelasi hasil pengukuran secara langsung dengan hasil pengolahan citra dari asap yang dihasilkan oleh karet pada ketinggian minimum. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan nilai R-Square adalah 0.946.



Gambar 4.25. Perbandingan *optical density* dan *pixel intensity* foam minimum terhadap waktu.

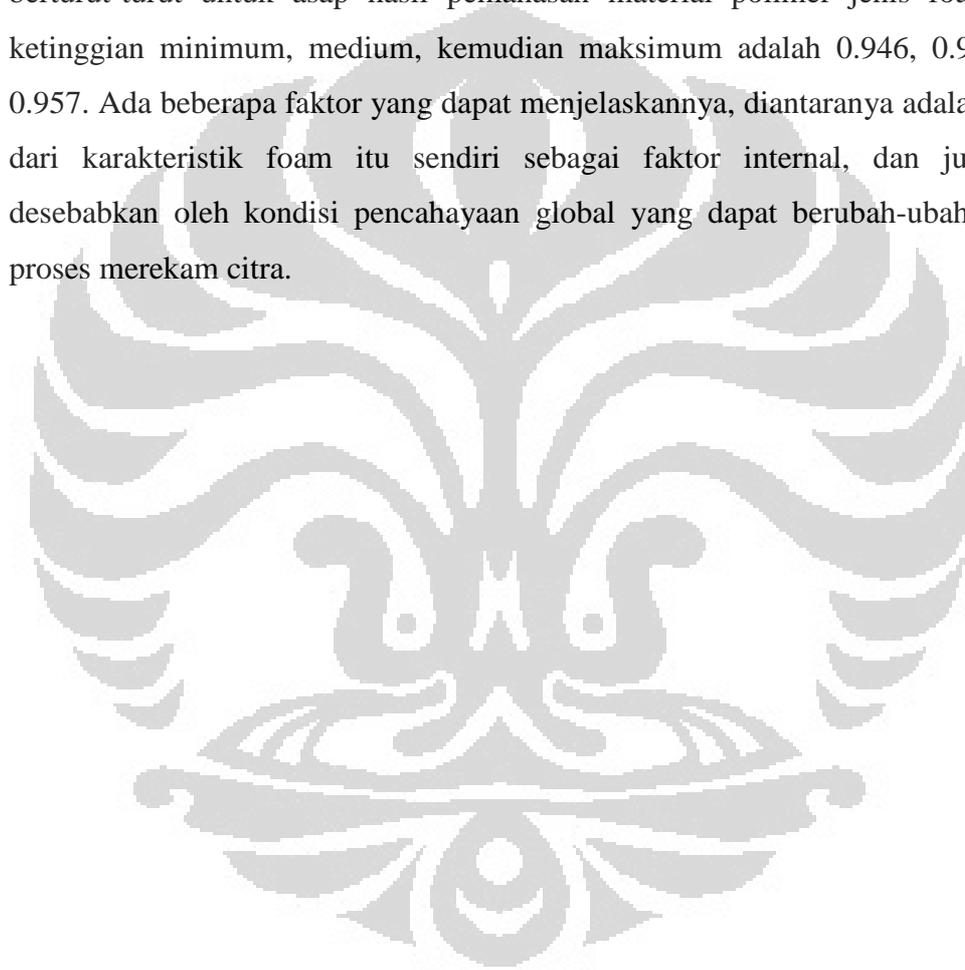


Gambar 4.26. Hasil korelasi foam pada ketinggian minimum.

Terdapat fakta yang cukup menarik untuk dipelajari dari hasil korelasi pada 3 variasi ketinggian ini, yaitu nilai kesesuaian, R-Square, yang mengikuti tren pola aliran smoke plume. Dimana nilai kesesuaian berturut-turut untuk asap hasil pemanasan material polimer jenis pvc pada ketinggian minimum, medium,

kemudian maksimum adalah 0.952, 0.941, dan 0.914. Sedangkan nilai kesesuaian berturut-turut untuk asap hasil pemanasan material polimer jenis karet pada ketinggian minimum, medium, kemudian maksimum adalah 0.869, 0.828, dan 0.766. Artinya nilai kesesuaian akan semakin tinggi untuk pola aliran laminar, dan akan semakin mengecil jika pola aliran semakin acak atau menuju turbulen.

Namun tren ini tidak sesuai dengan hasil yang diperlihatkan pada korelasi untuk asap hasil pemanasan material jenis foam. Dimana nilai kesesuaian berturut-turut untuk asap hasil pemanasan material polimer jenis foam pada ketinggian minimum, medium, kemudian maksimum adalah 0.946, 0.913, dan 0.957. Ada beberapa faktor yang dapat menjelaskannya, diantaranya adalah akibat dari karakteristik foam itu sendiri sebagai faktor internal, dan juga bisa disebabkan oleh kondisi pencahayaan global yang dapat berubah-ubah selama proses merekam citra.



## BAB 5 PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

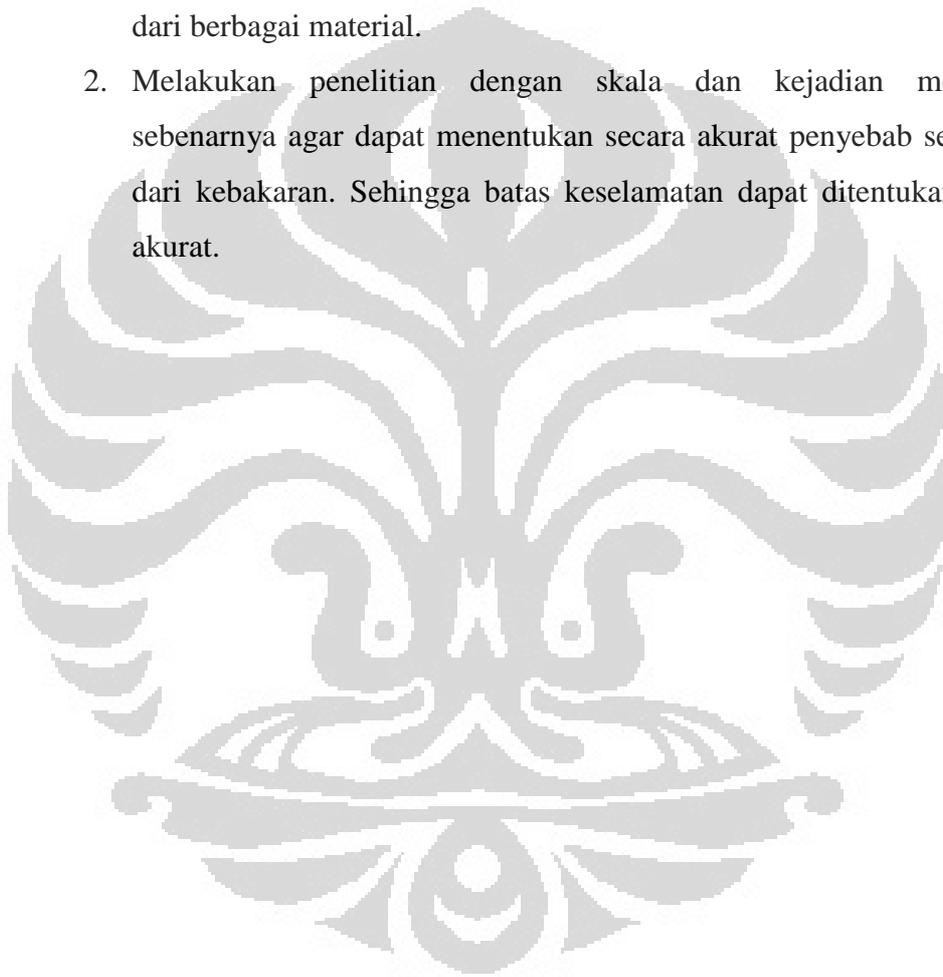
Setelah melakukan eksperimen sehingga memperoleh data untuk dilakukan analisis yang dibahas pada bab-bab sebelumnya, kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Karakteristik termal dari material polimer mempengaruhi laju kenaikan temperatur yang menentukan kecepatan munculnya asap, ketebalan asap, serta banyaknya asap yang dihasilkan dari waktu ke waktu.
2. Pola aliran yang semakin tinggi semakin acak, maka konsentrasi partikel – partiel volatil pembentuk asap akan semakin menyebar dan tipis. Artinya ketinggian pengukuran asap sangat mempengaruhi nilai *optical density* dari asap.
3. Hasil penyesuaian grafik korelasi hasil *optical density* asap secara pengukuran langsung dengan hasil *optical density* secara pengolahan citra menunjukkan adanya kemungkinan untuk mendefinisikan sifat fisik dari asap secara visualisaisi digital.
4. Informasi yang diberikan dengan mendefinisikan asap lebih akurat akan bermanfaat untuk menentukan batas keselamatan pada sistek deteksi asap berbasis video. Pengaturan dari batas keselamatan dapat mencegah kesalahan atau pendeteksian yang terlalu dini.

## 5.2. Saran

Melakukan pendeteksian asap yang akurat secara tidak langsung sama dengan melakukan pencegahan agar kebakaran tidak meluas, sehingga resiko kerusakan yang ditimbulkan dapat dikurangi. Untuk itu, pada penelitian selanjutnya kami menyarankan beberapa hal untuk perkembangan sistem ini.

1. Perlunya pengembangan lanjutan untuk pemrograman dari pencitraan gambar asap dengan memanfaatkan karakteristik *optical density* asap dari berbagai material.
2. Melakukan penelitian dengan skala dan kejadian mendekati sebenarnya agar dapat menentukan secara akurat penyebab serta efek dari kebakaran. Sehingga batas keselamatan dapat ditentukan secara akurat.



## DAFTAR REFERENSI

- [1]. Departemen Pekerjaan Umum, *Peraturan No.26/PRT/M/2008 Tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi Kebakaran Pada Bangunan Gedung Dan Lingkungan*, Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2008.
- [2]. Mulholland, GW., *Smoke Production and Properties, Chapter 1:; The SFPE Handbook*, 3<sup>rd</sup> Edition, 2002.
- [3]. Nugroho, YS, Suwarno, Widyanto M R, Yanuar, Jakti, EW, and Alif, GM., 2010. *Early Detection of Cables Fires Using Image Processing*. Proceeding of the Interflam 2010, pp. 247-256.
- [4]. Verstockt S, Alexander Vanoosthuysse, Bart Merci, Nele Tilley, Bart Sette, Charles F. Hollemeersch, Peter Lambert, Rik Van de Walle, *Performance Evaluation Framework for Vision-Based Fire Detection*, Proceeding of the Interflam 2010, pp. 256-268.
- [5]. Marbach, G. Loepfe, M. *Image Processing Technique For Fire Detection in Video Image*. Fire Safety Journal. Elsevier. 2006.
- [6]. Yuan, F., Liao, G., Fan, W., and Zhou, H., *Vision Based Fire Detection using Mixture Gaussian Model*, Fire Safety Science-Proceeding of the Eight International Symposium, 2005, pp. 1575-1583.
- [7]. Celik, T., and Demirel, H., *Fire Detection in Video Sequence using a Generic Color Model*, Fire Safety Journal 44 (2009) 147-158.
- [8]. Ko, B.C., Cheong, K-H, and Nam, J-Y., *Fire Detection Based On Vision Sensor and Support Vector Machines*, Fire Safety Journal 44 (2009) 322-329.
- [9]. Fang, J., Ji Jie, Hong-Yong, Y., Yong-Ming, Z., *Early fire smoke movements and detection in high large volume spaces*, Building and Environment 41 (2006) 1482-1493.
- [10]. YS Nugroho, et. al., *In situ measurement of early smoke plume density*. Proceeding oh the 1<sup>st</sup> CoSaCM Conference, 2011.
- [11]. Suwarno, *Sistem Deteksi Asap Berbasis Video Untuk Deteksi Dini Kebakaran Menggunakan Adaptive Gaussian Mixture Model dan Sistem*

- [12]. *Inferensi Fuzzy*, Depok : Fakultas Ilmu Komputer Universitas Indonesia, 2010.
- [13]. Drysdale, D. *An Introduction to Fire Dynamics 2<sup>nd</sup> Edition*. England : John Wiley & Sons, 1998.
- [14]. McGrattan K., *Cable Response to Live Fire, Volume 3 : Thermally-Induced Electrical Failure (THIEF) Model*. NIST Building and Fire Research Laboratory, Maryland, 2007.
- [15]. Ferreira T., Rasband W., *The ImageJ Users Guide*. McGill University, Canada, 2001.
- [16]. Lyon, RE., *Handbook of Building Material For Fire Protection, Chapter 3 : Plastics and Rubbers*, New York : McGraw-Hill, 2004.
- [17]. Adrianus, *Pengaruh Jenis Sambungan Kabel Listrik Terhadap Potensi Bahaya Kebakaran*, Depok : Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008.
- [18]. FLUKE<sup>®</sup>, *Infrared Thermometer 568 Users Manual*, Everett, WA., 2007.
- [19]. Fire Testing Technology, *Smoke Density Photometric System (DIN 50055) Users Manual*, West Sussex, UK.