



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS TERMAL PEMANASAN BERLEBIH PADA KABEL UNTUK
DETEKSI ASAP MENGGUNAKAN PENCITRAAN GAMBAR**

SKRIPSI

GUNAWAN MUHAMAD ALIF

06 06 07 315 2

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS TERMAL PEMANASAN BERLEBIH PADA KABEL UNTUK
DETEKSI ASAP MENGGUNAKAN PENCITRAAN GAMBAR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

GUNAWAN MUHAMAD ALIF

06 06 07 315 2

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

ANALISIS TERMAL PEMANASAN BERLEBIH PADA KABEL UNTUK DETEKSI ASAP MENGGUNAKAN PENCITRAAN GAMBAR

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 dengan jelas sebagaimana mestinya.

Nama : Gunawan Muhamad Alif

NPM : 06 06 07 315 2

Tanda Tangan :



Tanggal : 21 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Gunawan Muhamad Alif

NPM : 06 06 07 315 2

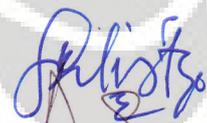
Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi :

ANALISIS TERMAL PEMANASAN BERLEBIH PADA KABEL UNTUK
DETEKSI ASAP MENGGUNAKAN PENCITRAAN GAMBAR

Telah berhasil dipertahankan di hadapan 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 S. Nugroho, M.Sc, Ph.D ()

Penguji 1 : Dr. Agus Pamitran, S.T., M.Eng ()

Penguji 2 : Prof. Dr.-ing. Ir. Nandy Putra ()

Penguji 3 : Dr. Gandjar Kiswanto S.T., M.Eng. ()

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 21 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan banyak nikmat-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul:

ANALISIS TERMAL PEMANASAN BERLEBIH PADA KABEL UNTUK DETEKSI ASAP MENGGUNAKAN PENCITRAAN GAMBAR

Penulisan skripsi ini dilakukan guna memenuhi salah satu persyaratan pendidikan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Banyak bimbingan, arahan, dan juga semangat dari para pihak yang telah sangat banyak membantu penulis dalam menyusun dan melakukan penelitian. Oleh karena itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Baba dan Mama yang telah menjadi perpustakaan hidup serta sumber ilmu pertama bagi penulis, dari sejak mulai bisa membaca hingga bisa berkarya. Dan juga untuk kakak perempuan, Yola Siti Aisyah, serta dua adik laki-laki penulis, Mawardi dan Fahrurrozi.
2. Seluruh keluarga besar Baba dan Mama, Keluarga besar Alm. Kakek H. Haris, serta para Om dan Tante yang telah memberikan dukungan materiil maupun immateriil guna menunjang kelangsungan pendidikan yang layak bagi penulis hingga saat ini.
3. Bapak Prof. Yulianto S. Nugroho sebagai pembimbing skripsi, terima kasih atas ide-ide dan masukan yang diberikan kepada penulis. Kepada Bapak Ir. Tris Budiono, MT., sebagai pembimbing akademis, dan juga kepada seluruh dosen serta pegawai Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas yang telah banyak membantu dalam pembuatan skripsi ini.
4. Bapak M. Rahmat Widyanto, Bapak Dadang, Mas Suwarno, dan Lutfi Adriansyah dari Fakultas Ilmu Komputer Universitas Indonesia yang telah bersedia menyisihkan waktu, membimbing, dan berbagi ilmu kepada penulis dalam rangka penyusunan materi dan pembahasan skripsi ini dari mulai pembuatan bahasa pemrograman hingga analisa dari sudut pandang ilmu komputer.

5. Bapak Ir. Adrianus Pangaribuan, MT. yang telah mau berbagi waktu dan pengalaman serta alat uji kabel yang beliau rancang untuk bisa penulis gunakan dalam pengambilan data skripsi ini.
6. Edwin Waskito Jati, sebagai rekan skripsi dan teman baik penulis dalam melakukan penelitian yang telah banyak membantu dalam berbagi ilmu dan waktu untuk mencapai target penyelesaian skripsi ini.
7. Aridho Obstrian, ST., Barnas Danu Aditya, Hafiz Alfath, dan Makhfril Lindiono. Sahabat - sahabat penulis sejak SMA yang merupakan sumber inspirasi bagi penulis dalam periode awal perkuliahan hingga saat ini dan Afrike Wahyuni Saputri, atas kesabaran dan pengertiannya dalam menemani penulis menyusun skripsi ini.
8. Teman-teman dari Departemen Teknik Mesin dan juga termasuk di dalamnya Teknik Perkapalan Universitas Indonesia Angkatan 2006 lainnya yang senantiasa memberikan semangat dan bersedia menjadi kawan dalam bermain serta berbagi canda dan tawa.

Akhir kata, penulis berharap kepada Allah SWT agar berkenan membalas segala kebaikan yang telah diberikan oleh semua pihak yang telah membantu penulis dari awal hingga akhir penyusunan skripsi ini.

Semoga para pembaca sekalian dapat memahami dan memaklumi apabila terdapat kesalahan baik dari segi isi maupun penulisan . Penulis berharap adanya masukan berupa kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan selanjutnya.

Depok, 21 Juni 2010

Penulis

Gunawan Muhamad Alif

NPM 06 06 07 315 2

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Gunawan Muhamad Alif

NPM : 06 06 07 315 2

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

ANALISIS TERMAL PEMANASAN BERLEBIH PADA KABEL UNTUK
DETEKSI ASAP MENGGUNAKAN PENCITRAAN GAMBAR

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusive ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih-media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan 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 : 21 Juni 2010

Yang menyatakan

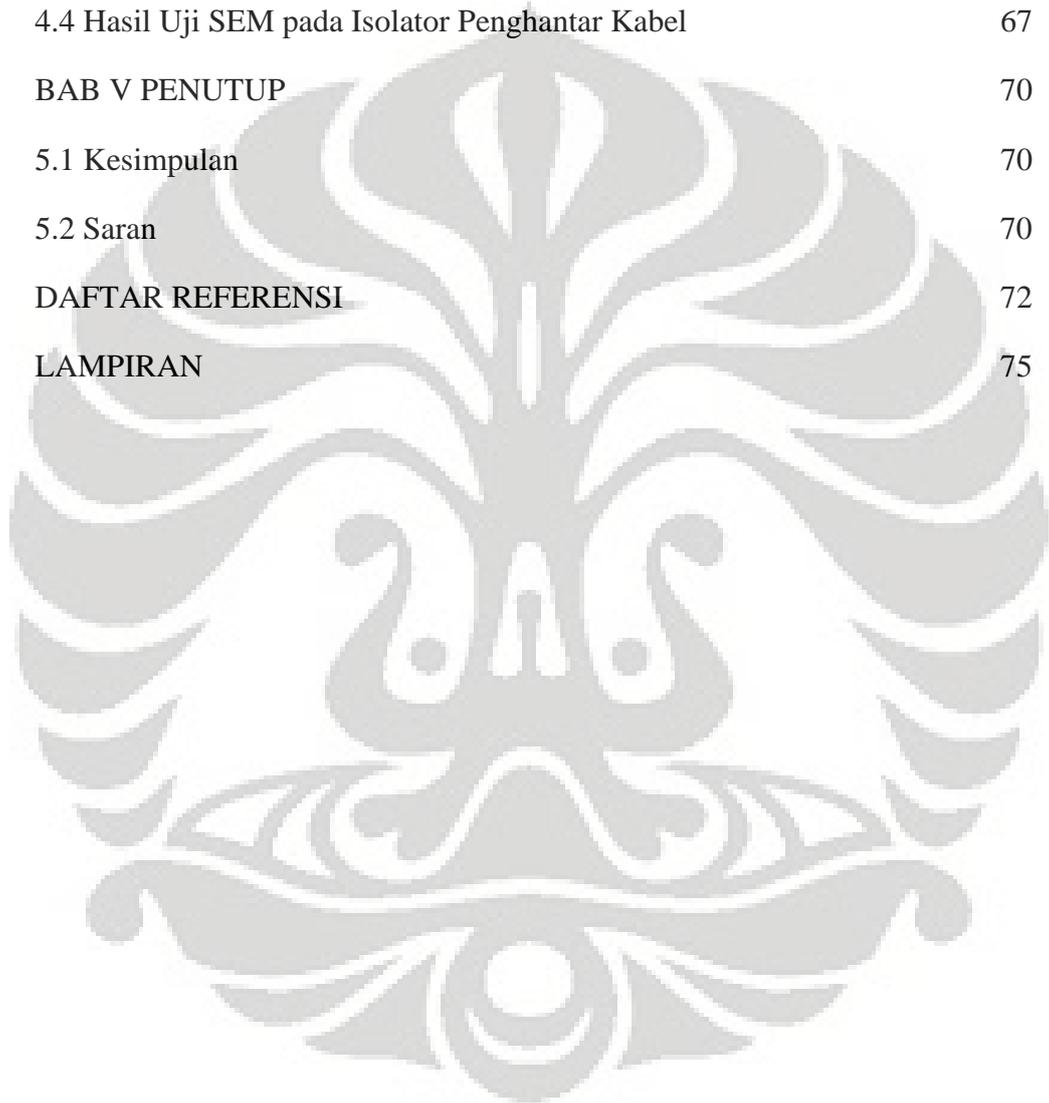


(Gunawan Muhamad Alif)

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah dan Ruang Lingkup Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Metodologi Penelitian	6
1.7 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Teori Dasar Asap	8
2.2 Teori Dasar Kabel	12
2.3 Teori Dasar Pemrograman	32
2.4 Teori Dasar Mikroskop Pemindai Elektron (SEM)	37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	42
3.1 Sistematika Penelitian	42
3.2 Alat Uji Penelitian	43

3.3 Prosedur Penelitian	45
BAB IV HASIL DAN ANALISIS	54
4.1 Grafik Temperatur dengan Waktu	54
4.2 Peristiwa Kemunculan Asap	59
4.3 Hubungan Luas Asap dengan <i>Image Processing</i>	64
4.4 Hasil Uji SEM pada Isolator Penghantar Kabel	67
BAB V PENUTUP	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	70
DAFTAR REFERENSI	72
LAMPIRAN	75



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Fire triangle	1
Gambar 1.2 Statistik kebakaran DKI Jakarta	2
Gambar 1.3 Asap yang muncul pada kebakaran suatu gedung	3
Gambar 1.4 Kebakaran ruang yang diakibatkan oleh listrik	4
Gambar 2.1 Asap muncul pada batang kayu	8
Gambar 2.2 Api yang menyala pada batang korek api menyisakan arang	9
Gambar 2.3 Proses yang menghasilkan bahan bakar uap dari zat padat	10
Gambar 2.4 Kabel tembaga jenis NYA	13
Gambar 2.5 Kabel tembaga jenis NYAF	13
Gambar 2.6 Kabel tembaga jenis NYM	13
Gambar 2.7 Kabel tembaga jenis NYY	14
Gambar 2.8 Teknik penyambungan pada kabel berinti 3	14
Gambar 2.9 Contoh kabel listrik yang digigit oleh binatang pengerat	15
Gambar 2.10 Jalinan yang kurang bagus/kuat menimbulkan celah udara	16
Gambar 2.11 Sambungan kabel yang terdapat pada ruang lobi DTM UI	16
Gambar 2.12 Kondisi sekring pada PHB yang kurang bagus	17
Gambar 2.13 Visualisasi isometrik kabel pada peristiwa konduksi	19
Gambar 2.14 Tahanan termal pada permukaan melintang kabel	20
Gambar 2.15 Visualisasi batang konduktor berpenghantar arus I	21
Gambar 2.16 Visualisasi penampang kabel dengan ketebalan isolatornya	25
Gambar 2.17 Celah udara pada sambungan kabel Jointing 0.0	26
Gambar 2.18 Visualisasi kabel yang sedang mengalami pirolisis	28
Gambar 2.19 (a) Visualisasi evolusi waktu dan (b) grafik terhadap efek pirolisis pada permukaan isolator kabel PE pada tahap preheating hasil percobaan Leung et al (1998)	29

Gambar 2.20 Isometri penampang kabel	33
Gambar 2.21 Flow diagram untuk proses pencitraan gambar dari sistem video smoke detector (Suwarno, 2010)	36
Gambar 2.22 Sistem Fuzzy oleh Kwang (2005)	37
Gambar 2.23 Scanning Electron Microscope (SEM)	38
Gambar 2.24 Salah satu citra hasil pemindaian dengan perbesaran 500 kali menggunakan SEM pada bahan material PVC di stop kontak listrik yang terbakar	40
Gambar 2.25 Butiran hasil lelehan inti kabel setelah terjadinya bunga api pada pembesaran (a) 200 kali dan (b) 1000 kali	41
Gambar 3.1 Diagram alir proses penelitian	42
Gambar 3.2 Skematik diagram penelitian	43
Gambar 3.3 Alat penelitian yang berfungsi mengatur beban arus listrik	44
Gambar 3.4 Fluke® 568 Infrared thermometer	44
Gambar 3.5 Vivotek Camera IP7132	45
Gambar 3. 6 Bentuk geometri sampel kabel uji dengan Jointing 0.0.	46
Gambar 3.7 Kabel sampel uji sudah diberikan karet isolator tambahan	47
Gambar 3.8 (a) Integrasi alat-alat dalam melakukan penelitian dan pengambilan data dan (b) alat pengatur arus listrik (electric current regulator)	47
Gambar 3.9 Titik konsentrasi pengambilan nilai temperatur menggunakan sinar infra merah.	48
Gambar 3.10 Tampilan Software Club Video Decompiler®	50
Gambar 3.11 Penentuan skala pada perangkat lunak ImageJ®	51
Gambar 3.12 Perhitungan luas asap pada perangkat lunak ImageJ®.	52
Gambar 3.13 Frame hasil pengolahan dengan video smoke detector	53
Gambar 4.1 Grafik hasil percobaan pembebanan arus untuk kabel NYA 1.5 mm ² (atas) dan NYA 2.5 mm ² (bawah)	55

Gambar 4.2 Grafik kenaikan temperatur berdasarkan kenaikan arus pada $t=180$ sekon untuk NYA 2.5 mm^2	56
Gambar 4.3 Grafik hasil percobaan pemanasan kabel oleh Rahkonen et al (1999)	59
Gambar 4.4 Visualisasi terjadinya pirolisis pada isolator PVC kabel	71
Gambar 4.4 Grafik antara temperatur, waktu, dan jumlah asap pada arus 42 A	61
Gambar 4.5 Asap muncul pada sambungan kabel NYA 2.5 mm^2 yang dialiri arus 42 A pada frame 2101	62
Gambar 4.6 Citra termal dari sambungan kabel NYA 1.5 mm^2 yang dialiri arus 90 A [4]	63
Gambar 4.7 Gelembung udara pada pemanasan lokal permukaan dalam isolator kabel	63
Gambar 4.8 Rangkaian frame pada penambahan jumlah asap dari gelembung isolator	64
Gambar 4.9 Grafik perbandingan luas asap dengan luas asap yang terdeteksi sebagai blob	65
Gambar 4.10 Grafik perbandingan luas asap dengan luas asap yang terdeteksi sebagai blob	65
Gambar 4.11 Logika fuzzy untuk variabel size	66
Gambar 4.12 Rangkaian gambar hasil deteksi	66
Gambar 4.12 Rangkaian foto SEM pada isolator PVC badan kabel listrik	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Proses pembentukan volatile dari zat padat [1]	10
Tabel 2.2 Nilai produksi asap dan propertisnya dari kayu dan plastik.	11
Tabel 2.3 Propertis asap dari bahan bakar padat [10]	11
Tabel 2.4 Termal propertis dari material logam penghantar listrik [25]	28
Tabel 2.4 Termal propertis dari material logam penghantar listrik [25]	35
Tabel 3.1 Spesifikasi alat Fluke Infrared thermometer tipe 568	44
Tabel 3.2 Spesifikasi Vivotek Camera IP7132	45
Tabel 3.3 Spesifikasi kabel sampel uji penelitian dari PT. Kabelindo Murni Tbk	46
Tabel 4.1 Nilai-nilai yang terdapat pada sebuah penghantar kabel	68
Tabel 4.3 Detail peristiwa kemunculan asap	70

ABSTRAK

Nama : Gunawan Muhamad Alif

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Analisis Termal Pemanasan Berlebih pada Kabel untuk Deteksi Asap Menggunakan Pencitraan Gambar

Pada beberapa peristiwa kebakaran, listrik sering kali dikaitkan sebagai salah satu penyebab utama dari kebakaran. Asap menjadi parameter awal yang mendasari terjadi sebuah peristiwa kebakaran. Keracunan asap adalah salah satu penyebab utama kematian korban kebakaran di dalam ruangan. Asap dapat membunuh manusia dengan melakukan kerusakan pada kombinasi termal, keracunan, dan iritasi paru-paru yang disebabkan oleh reaksi karbon monoksida, hidrogen sianida, dan produk pembakaran lainnya. Peristiwa kebakaran terjadi karena dalam beberapa kasus, banyak detektor asap yang gagal mencapai fungsinya sebagai pendeteksi awal asap karena waktu yang dibutuhkan asap untuk menjangkau sebuah detektor asap pada tempat tertentu ternyata membutuhkan waktu yang cukup lama. Penelitian ini difokuskan pada kajian eksperimental untuk pendeteksian asap pada kebakaran kabel dengan parameter laju perkembangan luasan asap terhadap tingkat arus listrik dan perubahan waktu dengan pembebanan arus lebih dari titik kritisnya. Penelitian dilakukan dengan skala eksperimen. Frame hasil rekaman akan diukur luasan asapnya dengan menggunakan perangkat lunak ImageJ. Grafik laju perubahan waktu terhadap laju perkembangan luasan asap dengan perubahan tingkatan arus listrik dan kenaikan temperatur didapatkan guna mencari hubungan yang tepat terhadap tingkat bahaya kebakaran. Hasil dari hubungan tersebut disesuaikan kedalam bahasa pemrograman *Adaptive Gaussian Mixture Model* dengan melakukan segmentasi obyek latar yang bergerak (*foreground*) dari latar belakang diam (*background*) untuk dijadikan parameter dalam penentuan tingkat bahaya asap dalam sistem deteksi asap berbasis pencitraan gambar. Terdapat pula pengujian hasil SEM (*Scanning Electron Microscope*) terhadap isolator PVC hasil percobaan.

Kata kunci:

Kabel listrik, arus listrik, temperatur, perubahan waktu, luas asap, Adaptive Gaussian Mixture Model, SEM (Scanning Electron Microscope)

ABSTRACT

Name : Gunawan Muhamad Alif
Study Programme : Mechanical Engineering
Title : Thermal Analysis of Overheated Cable for Smoke
Detection using Image Processing

At some events of fire, electricity is often attributed as one of the main causes of fires. Smoke becomes the early parameter that underlie a fire occurs. Smoke is also very dangerous to people. The smoke kills by a combination of thermal damage, poisoning and pulmonary irritation caused by carbon monoxide, hydrogen cyanide and other combustion products. In some cases, a lot of smoke detectors failed to achieve its function as an early detector of smoke because of the time needed to reach smoke detector in certain places took a long time. This study focused on experimental studies for the detection of smoke in the fire cable with the rapid expansion parameters of smoke on the level of electrical current, temperature rise, and the time on the cable that deliberately be burned by flowing currents more than its critical point. Research is done by the experiment. In this study, the split frames that will each image area of the smoke were measured using ImageJ software. Graph of the rate changes of time to the extent of the smoke with the rapid changes in electrical current levels and an increase in temperature is obtained in order to find the correct relation to level the danger of fire. Results from the relation are suited into Adaptive Gaussian Mixture Model to segment the moving object (as a foreground) from the background to be used as a parameter in determining the level danger of smoke in the smoke detection using imaging processing. This paper includes SEM (Scanning Electron Microscope) results for the PVC insulator.

Keywords:

Electric cable, electric current, temperature, time, smoke area, Adaptive Gaussian Mixture Model, SEM (Scanning Electron Microscope)

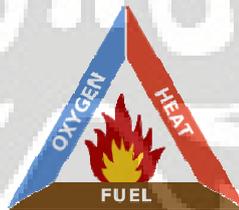
BAB I

PENDAHULUAN

Bab pertama ini berisi mengenai penjelasan tentang latar belakang dari penelitian yang telah dilakukan, rumusan masalah yang dihadapi, serta tujuan penelitian yang ingin dicapai. Selain itu akan dibahas juga mengenai batasan dan ruang lingkup penelitian, metodologi penelitian yang digunakan, dan sistematika penulisan laporan

1.1 Latar Belakang

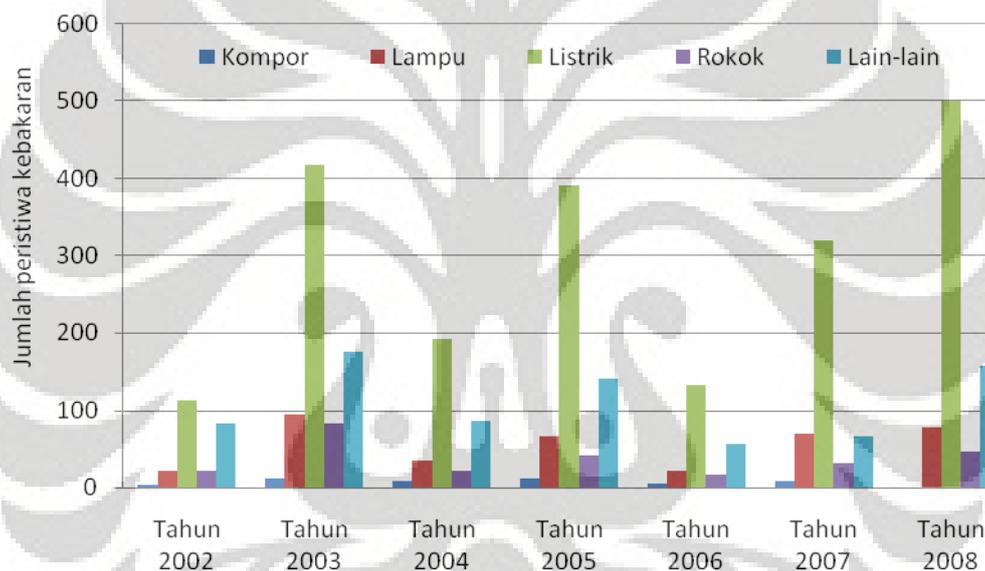
Pada beberapa peristiwa kebakaran, listrik sering kali dikaitkan sebagai salah satu penyebab kebakaran. Penyebab tersebut bisa timbul akibat adanya loncatan bunga api pada sambungan kabel di dalam rumah hingga terbakarnya sebuah gardu/terminal listrik. Api pada sebuah peristiwa kebakaran dapat muncul apabila terdapat tiga unsur, yaitu bahan yang mudah terbakar (*fuel*), oksigen, dan percikan api (*heat*) [1].



Gambar 1.1 *Fire triangle.*

Peristiwa kebakaran dengan penyebab listrik banyak terjadi di kota-kota besar, khususnya DKI Jakarta. Statistik yang dikeluarkan oleh pihak berwenang (Dinas Kebakaran Provinsi DKI Jakarta) seringkali mengkonfirmasi hal tersebut melalui situs resminya [3]. Hal-hal tersebut, peristiwa kebakaran listrik, bisa terjadi karena perlengkapan listrik yang digunakan oleh masyarakat umumnya tidak digunakan sesuai dengan prosedur yang benar dan alat-alat itu sendiri belum memenuhi standar yang ditetapkan oleh LMK (Lembaga Masalah Kelistrikan) PLN, rendahnya kualitas peralatan listrik dan kabel yang digunakan,

serta instalasi yang dilakukan dengan asal-asalan dan tidak sesuai peraturan. Menurut data yang dikumpulkan oleh Dinas Kebakaran DKI sejak dari tahun 1992 s.d. 1997 telah terjadi kebakaran sebanyak 4.244 kasus di mana 2135 kasus disebabkan karena korsleting listrik. Hal tersebut berarti bahwa 50% lebih dari total kasus kebakaran disebabkan oleh listrik. Sampai bulan ini, data statistik kebakaran terhitung per 1 Januari 2009, telah terjadi 46 kali peristiwa kebakaran di wilayah DKI Jakarta, dengan perkiraan kerugian material sebesar Rp. 11.310.000.000 [2]. Berikut ini merupakan grafik/statistik peristiwa kebakaran yang terjadi di DKI Jakarta berdasarkan faktor penyebabnya dalam kurun waktu tujuh tahun.



Gambar 1.2 Statistik kebakaran DKI Jakarta [3].

Pada grafik tersebut, terdapat jumlah peristiwa kebakaran yang diakibatkan oleh listrik jumlahnya tiap tahun selalu bertambah dan mempunyai nilai yang paling tinggi. Hal tersebut diikuti dengan banyaknya peredaran dan pemakaian oleh masyarakat yang hingga saat ini secara umum produk-produk yang tidak memenuhi standar SNI (Standar Nasional Indonesia) [2].

Pada kenyataannya tidak mudah untuk menentukan bahwa listrik, dalam hal ini adalah kabel listrik, menjadi penyebab kebakaran atau justru menjadi korban kebakaran. Untuk bisa membuktikan hal tersebut, perlu dilakukan penelitian yang lebih mendalam dan terarah [11]. Perlu adanya penelitian lintas

disiplin ilmu agar bisa mengetahui akar dari permasalahan penyebab kebakaran listrik selama ini.

Pada setiap peristiwa kebakaran, asap muncul pertama kali sebagai pertanda sebelum munculnya api. Peristiwa kebakaran bisa terjadi akibat terjadi kegagalan fungsi detektor asap dalam hal pendeteksian dini. Kegagalan fungsi yang dimaksudkan di sini adalah bukan kerusakan pada sistem detektor asap, melainkan kegagalan dalam faktor peletakan posisi optimal detektor asap itu sendiri dan pemilihan jenis detektor asap yang tidak sesuai dengan lingkungan, serta faktor teknis dan nonteknis lainnya, seperti kehabisan tenaga listrik dari baterai dan lamanya waktu yang dibutuhkan temperatur ruang untuk mencapai temperatur pengaturan detektor asap itu bekerja [6]. Sebagian besar optimalisasi kerja detektor asap berdasarkan pada posisi peletakannya.



Gambar 1.3 Asap yang muncul pada kebakaran suatu gedung.

Kemajuan teknologi pada bidang pengawasan melalui kamera video saat ini telah berkembang cukup canggih. Salah satu dari keunggulan dalam melakukan pengawasan/pemantauan dengan video kamera adalah penyajian ruang dalam area yang luas [6]. Seiring dengan perkembangan teknologi, bahasa pemrograman untuk pengolahan citra atau gambar pun telah berkembang dengan pesat. Dan sejauh ini, aplikasi bahasa pemrograman untuk pendeteksian bahaya kebakaran masih terbatas pada deteksi citra api maupun ekstraksi citra latar belakang [5]. Pada saat ini belum banyak sistem deteksi dengan menggunakan bahasa pemrograman untuk mengolah citra asap secara khusus, baik dari segi properti fisik maupun karakteristik, untuk bisa menerjemahkan menjadi suatu sistem yang secara khusus terintegrasi mengenai tingkat bahaya asap terhadap faktor terjadinya penyebab kebakaran. Lebih banyak penelitian deteksi dilakukan

berdasarkan citra api saja. Beberapa penelitian lebih difokuskan pada deteksi citra api, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Marbach *et al* (2006) yang fokus terhadap variasi sementara dari intensitas warna api [23]. Bahkan penelitian yang dilakukan oleh Schultze *et al* (2006) berfokus pada hasil spektogram dan sonogram yang dihasilkan oleh rekaman citra api serta analisis laju aliran api dengan estimasi gerakan [23].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan mengenai beberapa masalah yang dihadapi. Berikut ini adalah beberapa pertanyaan yang merupakan rumusan masalah dan juga yang melatarbelakangi dilakukannya penelitian ini.

1. Apakah dalam kebakaran listrik, kabel listrik yang menjadi penghantar arus selalu menjadi penyebab terjadinya kebakaran?
2. Bagaimana hubungan yang terjadi antara peristiwa kenaikan temperatur pada kabel akibat terjadinya pemanasan berlebih akibat beban lebih dengan peristiwa muncul dan berkembangnya asap?
3. Apakah sambungan kabel yang kurang baik menjadi tempat pertama kali munculnya asap?
4. Apakah penggunaan *Adaptive Gaussian Mixture Model* dalam sistem deteksi asap ini sudah tepat jika dibandingkan dengan sistem deteksi asap konvensional?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hubungan antara arus listrik dan temperatur sebagai hasil pembebanan berlebih guna mengetahui peristiwa munculnya asap untuk pertama kali dan juga memberikan gambaran serta informasi mengenai apa saja penyebab, ciri-ciri fisik, dan akibat dari kebakaran kabel, terutama hasil uji SEM terhadap isolator kabel.

Parameter yang akan menjadi tolak ukur adalah arus dan temperatur. Pada hasil penelitian mengenai kebakaran pada kabel ini, akan diharapkan adanya korelasi grafik antara arus listrik dan temperatur serta dengan variasi jenis penghantar dan jenis isolator kabel hingga peristiwa asap untuk muncul pertama kalinya. Kemudian terakhir akan terdapat korelasi tingkat bahaya berdasarkan nilai luasan asap yang terjadi yang erat kaitannya dengan nilai arus dengan temperatur dalam periode waktu tertentu.

1.4 Batasan Masalah dan Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan batasan yang hanya dilakukan dari sisi propertis fisik tidak pada tingkat bahasa pemrograman untuk pengolahan citra asap. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan peralatan yang ada di Laboratorium Termodinamika Sub-Laboratorium Teknik Keselamatan Kebakaran Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTM FTUI), dengan bahan uji sampel kabel listrik yang didapatkan dari pihak ketiga, yakni PT. Kabelindo Murni Tbk. Penelitian yang dilakukan akan bervariasi dimensi kabel, beban listrik yang diberikan pada kabel, temperatur kabel yang dihasilkan, dan material insulator yang digunakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Aspek manfaat yang bisa dilakukan melalui hasil penelitian ini adalah membuat semua pihak agar lebih peduli terhadap sistem instalasi kelistrikan mereka dan juga untuk sistem deteksi asap berbasis video diharapkan menjadi salah satu alternatif/solusi dalam upaya pencegahan dini untuk menanggulangi terjadinya kebakaran. Dengan adanya penelitian ini, akan menjawab beberapa persoalan yang sering didapatkan, seperti salah satunya adalah apakah kabel listrik menjadi penyebab atau menjadi korban pada sebuah peristiwa kebakaran, dan juga pada sistem deteksi konvensional yang ada sebelumnya sehingga sistem deteksi asap berbasis video ini dapat menjadi salah satu unsur pendukung sebagai pelengkap sistem.

1.6 Metodologi Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, dilakukan beberapa langkah untuk bisa menunjang dasar teori beserta segala isi dan kesimpulan tentang hasil penelitian. Berdasarkan peralatan percobaan yang ada pada Laboratorium Termodinamika Sub-Laboratorium Teknik Keselamatan Kebakaran Departemen Teknik Mesin FTUI, listrik yang dipakai adalah listrik satu phasa (listrik yang sering dipakai pada rumah tangga).

Langkah langkah metodologi penelitian yang akan telah dilakukan adalah:

- Melakukan studi literatur melalui penelusuran buku-buku teks perkuliahan serta jurnal-jurnal internasional.
- Menggunakan pengambilan data dalam skala eksperimental laboratorium dengan alat-alat penelitian dengan komponen-komponen pendukung lainnya seperti termometer sinar infra merah serta kamera perekam video.
- Menganalisis data-data hasil penelitian untuk bisa membuat korelasi yang tepat guna menjelaskan rumusan masalah yang dihadapi serta memberikan jawaban pada tujuan penelitian.

Berdasarkan metodologi penelitian ini pula, maka variasi sampel dalam dimensi kabel, arus listrik yang dilewatkan pada kabel, temperatur kabel yang dihasilkan dan material insulator yang digunakan. Skema alat-alat bantu penelitian dapat dilihat penjelasannya pada bab selanjutnya.

1.7 Sistematika Penulisan

Pada proses penulisan hasil penelitian mengenai sistem deteksi asap dini pada kebakaran kabel, penulis membaginya dalam enam bab yang pada masing-masing bab tersebut terdiri atas beberapa subbab. Penyajian skripsi dari hasil penelitian ini, akan dimulai dari latar belakang permasalahan hingga sampai kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian yang dilakukan.

Kerangka dari penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori sebagai landasan dan pendukung dalam melakukan kegiatan penelitian, dimulai dari teori dasar asap hingga teori dasar pemrograman.

BAB III EKSPERIMENTAL

Bab ini berisikan mengenai percobaan yang dilakukan disertai dengan langkah-langkah prosedur penelitian serta kondisi yang dilakukan dalam penelitian dan pengambilan data. Selain itu dalam awal bab ini terdapat pula tentang penjelasan mengenai alat-alat eksperimen.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini berisi data-data hasil penelitian, perhitungan data-data tersebut, grafik, serta analisis mengenai hasil yang diperoleh. Bagian ini akan membahas data-data yang terkumpul dari kegiatan eksperimen. Dari data yang diperoleh tersebut kemudian dianalisa untuk mendapat sebuah kesimpulan sesuai dengan tujuan yang telah dicantumkan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan berdasarkan data hasil percobaan dan analisisnya untuk menjawab tujuan penulisan beserta saran yang diajukan penulis untuk kemajuan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab kedua ini berisi penjelasan mengenai landasan teori yang digunakan pada penelitian. Teori-teori yang dijelaskan dalam bab ini memiliki tujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam sesuai dengan apa yang akan dibahas serta menjadi penunjang teori dalam melakukan penelitian hingga memberikan penjelasan mengenai hasil penelitian dan analisisnya. Teori-teori yang dijelaskan dalam bab ini adalah teori dasar asap, teori dasar kabel, dan teori dasar pemrograman serta teori dasar tentang mikroskop pemindai elektron (SEM).

2.1 Teori Dasar Asap

Asap adalah partikel kecil di udara yang berasal dari pembakaran tak sempurna oleh suatu bahan bakar [10]. Asap juga merupakan produk sampingan yang tak diinginkan dari sebuah peristiwa pembakaran. Sebelum terjadinya sebuah peristiwa munculnya api, terjadi sebuah peristiwa yang dinamakan pirolisis. Pirolisis adalah peristiwa terjadinya dekomposisi bahan kimia akibat adanya pemanasan lokal yang terjadi secara spontan pada suhu tinggi [10]. Pirolisis biasanya muncul pertama kali pada peristiwa pembakaran bahan bakar padat, seperti kayu, kain, kertas, dan juga beberapa jenis plastik. Pada peristiwa pirolisis terjadi penguapan volatile hidrokarbon yang pada awalnya terkandung di dalam zat padat tersebut [8].



Gambar 2.1 Asap muncul dari batang kayu.

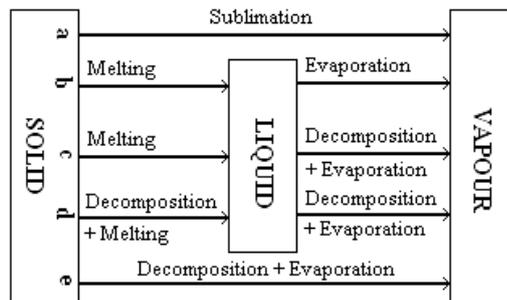
Asap yang tampak pada sebuah peristiwa terbakarnya kayu bakar merupakan produk pirolisis dan pembakaran volatile hidrokarbon yang sedang

menguap. Begitu pula pada sebuah peristiwa pemanasan berlebih pada sambungan kabel. Volatile hidrokarbon pada isolator kabel akan muncul pada temperatur sekitar 112 °C - 145 °C berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh [4]. Pirolisis terjadi pada permukaan bahan bakar sebagai hasil dari peristiwa kenaikan temperatur yang disebabkan oleh adanya radiasi fluks panas. Apabila pada sambungan kabel mencapai temperatur yang lebih tinggi lagi pada peristiwa tersebut maka volatile hidrokarbon tersebut akan terbakar dan berubah menjadi api. Sekali saja muncul api pada peristiwa tersebut maka kemunculan asap akan berhenti karena volatile hidrokarbon tersebut akan berubah menjadi karbondioksida dan air, yang keduanya tidak terlihat, ketika mereka terbakar api dan sisa-sisa zat yang tidak terbakar akan menjadi arang.



Gambar 2.2 Api yang menyala pada batang korek api menyisakan arang.

PVC (*Polyvinylchloride*) sebagai isolator pada kabel merupakan sebuah polimer dari senyawa-senyawa monomer. Pada temperatur yang cukup tinggi beberapa jenis bahan polimer, yang mana merupakan asal dari bahan isolator kabel baik isolator pada sambungan maupun isolator badan kabel, akan mengalami proses depolimerisasi atau proses penguraian polimer menjadi volatile-volatile hidrokarbon. Monomer-monomer itulah yang pada peristiwa ini disebut dengan produk-produk hasil pirolisis. Di bawah ini merupakan visualisasi model penguraian zat padat menjadi bahan bakar uap melalui beberapa proses. Proses tersebut biasa disebut dengan proses pemutusan rantai karbon untuk bisa menghasilkan monomer-monomer yang bernilai tinggi bagi proses pembakaran [17]. Keterangan untuk Gambar 2.2 dapat dilihat pada tabel berikut berikutnya.



Gambar 2.3 Proses yang menghasilkan bahan bakar uap dari zat padat [1].

Tabel 2.1 Proses pembentukan volatile dari zat padat [1].

Petunjuk	Peristiwa
a	Proses sublimasi
b	Pelumeran dan penguapan tanpa perubahan kimia
c	Pelumeran kemudian diikuti dengan dekomposisi oleh penguapan dari produk bermolekul rendah
d	Dekomposisi untuk menghasilkan produk leburan (a) yang mengurai zat-zat volatile hidrokarbon
e	Dekomposisi untuk menghasilkan zat-zat volatile.

(a) The initial decomposition may also produce species which can volatilize directly

Sebenarnya peristiwa pirolisis dalam terjadinya sebuah peristiwa kebakaran sangat penting dan menguntungkan bagi pihak yang ingin memadamkan api. Hal tersebut dikarenakan peristiwa pirolisis membutuhkan waktu yang cukup untuk bisa memunculkan api sehingga bisa memberikan waktu dalam melakukan pemadaman guna mencegah terjadi kemunculan api. Di samping itu, asap juga dapat menimbulkan bahaya, yaitu keracunan asap. Keracunan asap adalah salah satu penyebab utama kematian korban kebakaran di dalam ruangan. Asap dapat membunuh manusia dengan melakukan kerusakan pada kombinasi termal, keracunan, dan iritasi paru-paru yang disebabkan oleh reaksi karbon monoksida, hidrogen sianida, dan produk pembakaran lainnya [13].

Asap yang berasal dari api menggambarkan keseimbangan antara proses yang berkembang pada kondisi penuh bahan bakar (*fuel-rich portion*) dari api dan pembakaran dengan penggunaan oksigen. Sementara itu, dalam sebuah penelitian mengenai peristiwa pembakaran, sangat kecil kemungkinan untuk menggunakan korelasi waktu untuk bisa memprediksikan asap sebagai fungsi dari nilai kimia bahan bakar dengan proses pembakaran [10].

Tabel 2.2 Nilai produksi asap dan propertisnya dari kayu dan plastik [10].

Type	Smoke Conversion Factor, ϵ	Combustion Conditions	Fuel Area, m ²
Douglas fir	0.03–0.17	pyrolysis	0.005
Douglas fir	< 0.01–0.025	flaming	0.005
hardboard	0.0004–0.001	flaming*	0.0005
fiberboard	0.005–0.01	flaming*	0.0005
polyvinylchloride	0.03–0.12	pyrolysis	0.005
polyvinylchloride	0.12	flaming	0.005
polyurethane (flexible)	0.07–0.15	pyrolysis	0.005
polyurethane (flexible)	< 0.01–0.035	flaming	0.005
polyurethane (rigid)	0.06–0.19	pyrolysis	0.005
polyurethane (rigid)	0.09	flaming	0.005
polystyrene	0.17 ($m_{O_2} = 0.30$)**	flaming	0.0005
polystyrene	0.15 ($m_{O_2} = 0.23$)	flaming	0.07
polypropylene	0.12	pyrolysis	0.005
polypropylene	0.016	flaming	0.005
polypropylene	0.08 ($m_{O_2} = 0.23$)	flaming	0.007
polypropylene	0.10 ($m_{O_2} = 0.23$)	flaming	0.07
polymethylmethacrylate	0.02 ($m_{O_2} = 0.23$)	flaming	0.07
polyoxymethylene	~0	flaming	0.007
cellulosic insulation	0.01–0.12	smoldering	0.02

*Sample smoldered for a period of time after the pilot flame was extinguished.
 ** m_{O_2} refers to mol fraction of O_2 .

Pada tabel di bawah ini, terdapat nilai faktor konversi asap, ϵ , yang tergantung pada variasi umum material di dalam sebuah gedung. Nilai dari ϵ adalah definisi dari jumlah massa asap yang dihasilkan dibandingkan dengan jumlah bahan bakar yang terbakar. Faktor konversi asap menggambarkan sebuah hubungan yang erat dimana jumlah fisik asap sangat bergantung dari apa yang terbakar. Nilai ini didapatkan dari hasil penelitian yang dilakukan oleh [18]. Dalam aspek fisiknya, ternyata asap juga memiliki beberapa propertis seperti nilai kepadatan (*density*), kapasitas penyimpanan kalor (*heat capacity*), serta nilai konduktifitas termalnya (*thermal conductivity*). Berikut ini merupakan tabel propertis dari asap berdasarkan dari jenis-jenis bahan bakarnya.

Tabel 2.3 Propertis asap dari bahan bakar padat [10].

	Density (kg/m ³)	Heat capacity (kJ/kg.K)	Thermal conductivity (W/m.K)	Heat of combustion (kJ/g)	Melting point (°C)
Natural polymers					
Cellulose	V ^b	~1.3	V	16.1	chars
Thermoplastic polymers					
Polyethylene Low density	940	1.9	0.35		
High density	970	2.3	0.44	46.5	130–135
Polypropylene Isotactic	940	1.9	0.24	46.0	186
Syndiotactic					138
Polymethylmethacrylate	1190	1.42	0.19	26.2	~160
Polystyrene	1100	1.2	0.11	41.6	240
Polyoxymethylene	1430	1.4	0.29	15.5	181
Polyvinylchloride	1400	1.05	0.16	19.9	—
Polyacrylonitrile	1160–1180	—	—	—	317
Nylon 66	~1200	1.4	0.4	31.9	250–260
Thermosetting polymers					
Polyurethane foams	V	~1.4	V	24.4	—
Phenolic foams	V	—	V	17.9	chars
Polyisocyanurate foams	V	—	V	24.4	chars

^a From Brandrup and Immergut (1975); and Hall (1981). Heats of combustion refer to CO_2 and H_2O as products.
^b V = variable.

Oleh karena itu, guna mencegah bahaya-bahaya tersebut sangat penting dilakukan sebuah deteksi dini pada peristiwa awal inisiasi kebakaran seperti asap yang muncul pada sebuah konsleting listrik akibat adanya pemanasan lokal yang berlebih pada sambungan kabel di berbagai macam instalasi-instalasi baik instalasi skala kecil seperti di dalam rumah atau di dalam kantor sampai pada instalasi skala besar pada industri/pabrik.

2.2 Teori Dasar Kabel

Kabel adalah dua atau lebih kawat yang berdampingan dan terikat, baik dengan cara diputar atau dijalin bersama untuk membentuk suatu jalinan tunggal [14]. Dalam bidang mekanik, kabel biasa digunakan dan dikenal sebagai tali kawat, digunakan untuk melakukan pengangkatan, pengangkutan, dan sebagai penarik beban. Sedangkan dalam bidang teknik kelistrikan, kabel digunakan untuk membawa arus listrik.

Penghantar listrik dalam suatu bangunan/rumah memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Setiap kabel pada dasarnya memiliki kemampuan hantar arus yang berbeda-beda sesuai dengan bahan konduktornya. Secara umum kabel listrik memiliki dua jenis bahan penghantar, yaitu aluminium dan tembaga. Berikut ini merupakan penjelasan singkat mengenai kabel-kabel yang terdapat di pasaran [4].

1. Kabel jenis NYA

Kabel NYA adalah kabel tembaga berinti tunggal, berlapis bahan isolasi PVC. Kabel ini biasanya dipakai untuk instalasi luar yang memiliki kontak langsung dengan udara. Kode warna isolasi pada kabel jenis ini ada yang berwarna merah, kuning, biru dan hitam. Kabel tipe ini umum digunakan di instalasi-instalasi rumah karena harganya yang relatif murah. Lapisan isolatornya hanya satu lapis sehingga mudah cacat, tidak tahan air (karena NYA adalah tipe kabel udara) dan mudah digigit tikus.



Gambar 2.4 Kabel tembaga jenis NYA

2. Kabel jenis NYAF

Kabel tembaga jenis NYAF merupakan jenis kabel fleksibel dengan penghantar tembaga jenis serabut yang memiliki isolasi PVC. Kabel jenis ini lebih mahal harganya dibandingkan dengan jenis NYA. Kabel jenis ini biasa digunakan untuk instalasi panel-panel yang memerlukan fleksibilitas yang tinggi.



Gambar 2.5 Kabel tembaga jenis NYAF

3. Kabel jenis NYM

Kabel tembaga jenis NYM ini memiliki lapisan isolasi PVC dan biasanya berwarna putih atau abu-abu. Kabel jenis ini ada yang berinti 2, 3, atau 4. Kabel NYM memiliki lapisan isolasi dua lapis, sehingga tingkat keamanannya lebih baik dari kabel NYA dan juga harganya lebih mahal. Kabel ini dapat dipergunakan di lingkungan yang kering dan basah sekalipun, namun tidak boleh ditanam di dalam tanah.



Gambar 2.6 Kabel tembaga jenis NYM

4. Kabel jenis NYY

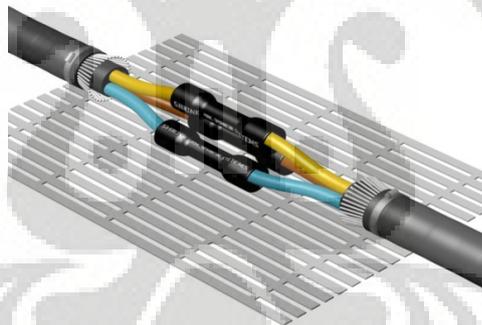
Kabel tembaga jenis NYY ini memiliki lapisan isolasi PVC (biasanya warna hitam). Kabel ini ada yang berinti 2, 3, atau 4. Kabel

NYN biasanya dipergunakan untuk instalasi bawah tanah dan memiliki lapisan isolasi yang lebih kuat dari kabel NYM. Kabel NYN memiliki isolasi yang terbuat dari bahan yang tidak disukai tikus.



Gambar 2.7 Kabel tembaga jenis NYN

Dalam melakukan penelitian ini, digunakan penghantar kabel jenis tembaga NYA dengan luas penampang 2.5 mm^2 . Dasar dari pemilihan jenis ini adalah kabel NYA 2.5 mm^2 rata-rata sering digunakan dalam instalasi-instalasi perumahan. Penggunaan kabel tembaga jenis NYM pun pada dasarnya sama dengan penggunaan jenis kabel tembaga NYA, yang membedakan adalah hanya masalah isolasi dan tambahan PVC. Pada teknik penyambungan pun yang menjadi dasar sambungan adalah tetap kabel NYA [4].



Gambar 2.8 Teknik penyambungan pada kabel berinti 3

2.2.1 Pemanasan Berlebih (*Overheating*) pada Kabel

Hubungan singkat (korselet) yang terjadi pada sebuah penghantar listrik yang berupa kabel bisa terjadi karena adanya kerusakan pada kabel. Bentuk-bentuk kerusakan tersebut bisa berupa isolator selimut kabel yang rusak akibat digigit hewan pengerat (tikus), isolator yang mudah rapuh akibat kualitas isolator PVC yang tidak terlalu bagus, atau bahkan karena teknik penyambungan yang salah atau asal-asalan. Secara umum, peristiwa overheating pada penghantar kabel antara lain disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut.

1. Overheating karena tahanan listrik pada penghantar kabel
2. Overheating karena *short circuit* (arus pendek)
3. Overheating karena sambungan listrik

Namun, dalam hal ini yang akan lebih banyak dibahas adalah mengenai peristiwa pemanasan berlebih akibat sambungan listrik (sesuai dengan rumusan umum masalah dan tujuan umum penelitian).

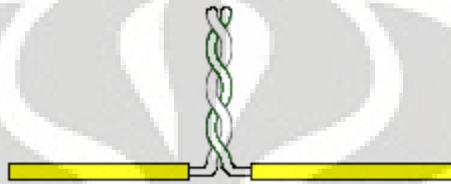


Gambar 2.9 Contoh kabel listrik yang digigit oleh binatang pengerat

Pada umumnya, pemakaian kabel listrik oleh masyarakat sering tidak tepat. Banyak kabel listrik berjenis inti tembaga yang dibebani arus listrik melebihi kapasitasnya. Entah karena terlalu banyak pemakaian alat-alat listrik dalam rumah tangga atau memang disengaja dan atau karena ketidakmampuan masyarakat untuk membeli produk kabel listrik yang telah memiliki standar SNI.

Kabel yang digunakan melebihi kapasitas kemampuan hantar arusnya akan lebih mudah untuk panas. Pada suatu sambungan kabel listrik berarus, panas yang terjadi akibat penghantaran beban berlebih tersebut akan lebih mudah terkonsentrasi. Tidak jarang terjadi kesalahan dalam teknik penyambungan kabel yang biasanya dilakukan oleh masyarakat ataupun pihak-pihak instalatir sebuah perusahaan. Pada tipe sambungan kabel jenis *Jointing 0.0*, sesuai dengan standar yang dikemukakan oleh [4] ada satu kesalahan umum yang sering dilakukan oleh pihak-pihak tersebut, yaitu masih terdapatnya celah udara (longgar) antara inti kabel yang saling dikaitkan atau dipilin (diputar). Hal tersebut juga menjadi salah satu penyebab pendukung munculnya percikan api pada sambungan kabel. Seperti yang kita ketahui, api akan muncul apabila terdapat tiga unsur, yaitu bahan yang

mudah terbakar (*fuel*), oksigen, dan percikan api (*heat*). Pada peristiwa ini, yang menjadi bahan yang mudah terbakar adalah bahan isolator tambahan penutup jalinan puntiran kabel (selotip). Pada titik sambungan kabel, panas yang muncul akibat adanya beban berlebih pada kabel akan terakumulasi dan bisa mencapai temperatur batas minimum terjadinya percikan api. Meskipun antara dua inti kabel yang terpuntir tidak memiliki celah udara, tetapi celah antara kabel dan isolator kabel (selotip) akan terdapat udara meskipun hanya sedikit.



Gambar 2.10 Jalinan yang kurang bagus/kuat menimbulkan celah udara.

Pada kondisi seperti ini, percikan api hanya akan muncul satu kali apabila sekering dapat bekerja optimal. Sekring listrik akan bekerja memutuskan arus apabila terjadi kelebihan beban pada rangkaian listrik. Namun keadaan akan bertambah lebih buruk apabila kerja sekering tidak maksimal/gagal. Meskipun hanya satu kali terjadi percikan api pada sambungan kabel, hal tersebut tidak menutup kemungkinan bahwa percikan api tidak mengenai bahan-bahan yang mudah terbakar.



Gambar 2.11 Sambungan kabel yang terdapat pada ruang lobi DTM UI.

Kebakaran yang diakibatkan oleh percikan api akan tetap berlangsung apabila isolasi (selotip) yang sudah mencapai temperatur bakar akan terbakar secara terus menerus. Untuk bahan isolasi PVC tertentu, lelehan kabel terbakar yang jatuh tidak akan segera padam, tetapi masih bisa menyala dengan waktu yang cukup untuk bisa membakar bahan-bahan mudah terbakar lain di sekitarnya. Inilah salah satu kemungkinan penyebab kebakaran. Jika pada saat itu percikan api mengenai salah satu bahan yang mudah terbakar, maka akan muncul api yang tidak bisa dikendalikan.

Hubungan singkat yang terjadi ternyata juga bisa menyebabkan listrik yang mengalir pada rangkaian semakin besar [2]. Oleh karena adanya sekering yang ditempatkan pada Papan Hubung Bagi (PHB), dimana sekering itu berfungsi sebagai pemutus/pembatas arus, maka kelebihan arus pada kabel listrik akan menyebabkan listrik padam sehingga keadaan menjadi aman. Namun jika sekering itu dirubah oleh pihak pemakai yang kurang bertanggung jawab dengan melilitkan sebuah kawat besi, yang bisa terbuat dari peniti atau jepitan rambut. Hal ini umum dilakukan oleh masyarakat untuk mencegah listrik dirumahnya agar tidak cepat putus/turun/mati. Hal itu berarti arus yang akan mengalir pada rangkaian tidak terkontrol besarnya. Sehingga dengan mudah dapat menyebabkan peristiwa kebakaran. Kondisi arus maksimum yang dialirkan pada penghantar kabel pun bisa menimbulkan pemanasan yang menyebabkan logam penghantar lunak dan getas.



Gambar 2.12 Kondisi sekering pada PHB yang kurang bagus.

Pada kabel yang jenis penghantarnya tidak bebas memuai jika suhunya naik akan timbul getaran/getaran pada saat terjadinya kenaikan temperatur

lingkungan. Gerakan itu merupakan efek pemuaian penghantar kabel yang bisa menyebabkan memburuknya kondisi sambungan.

Peristiwa *overheating* yang terjadi di dalam penghantar kabel dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini:

1. Tahanan/hambatan atau resistansi di dalam penghantar kabel sendiri, yaitu dengan adanya pengaruh dari:
 - Induktansi
 - Reaktansi
 - Tahanan isolasi
 - kapasitansi
2. Rugi-rugi dalam penghantar kabel, seperti:
 - Rugi pada penghantar kabel
 - Rugi dielektrik
 - Rugi eddy current
 - Rugi pada selubung penghantar kabel

Sementara itu penyebab utama lain kerusakan pada kabel adanya ketidakstabilan dielektris termal, ionisasi, dan kelelahan isolator. Di sisi lain rugi dielektris dalam kabel tergantung pada tegangan dan suhu kerja di mana pada tegangan tertentu rugi akan naik bersamaan dengan kenaikan suhu. Rugi dielektris adalah sebuah nilai yang menggambarkan jumlah energi yang hilang (dalam satuan Watt) dalam tiap meter dengan perbandingan dari tiap phasanya pada suatu penghantar kabel [4]. Pada kondisi yang kurang baik proses tersebut akan berlanjut dan bisa menyebabkan kerusakan.

2.2.2 Teori Dasar Konduksi Termal pada Kabel

Inti kabel yang berbentuk silinder akan mengkonduksikan energi panas secara radial ke permukaan isolator PVC. Dalam peristiwa transfer energi panas secara radial oleh inti kabel, pendekatan teori mengenai hal ini dapat dilakukan

melalui dasar teori perpindahan kalor secara *steady state* konduksi yang dilihat dari satu dimensi (*one dimensional steady state conduction*).

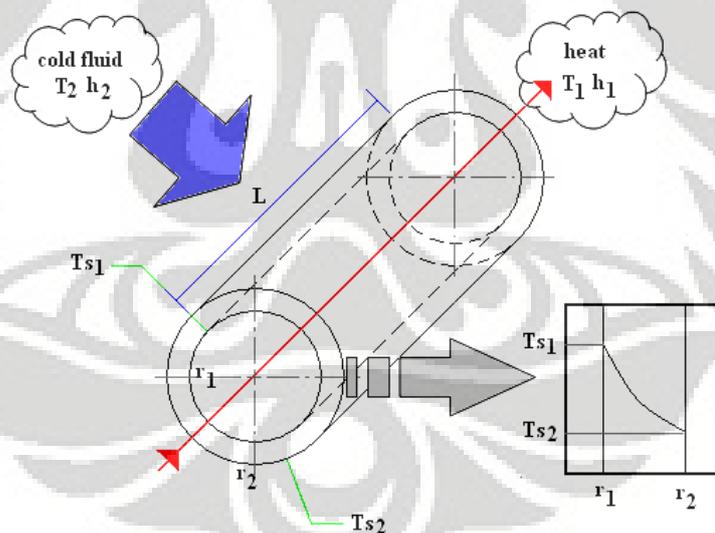
Untuk kondisi *steady state* tanpa adanya perubahan energi termal, bentuk rumus yang paling sesuai adalah

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk laju konduksi energi panas yang melalui permukaan silinder padat sesuai dengan Hukum Fourier dapat digambarkan dengan rumus berikut ini.

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rl) \frac{dT}{dr} \quad (2.2)$$

dimana nilai $A = 2\pi rl$ adalah luas area permukaan silinder. Semenjak persamaan (2.9) bergantung pada nilai r , maka nilai laju perpindahan kalor q_r adalah konstan pada arah radial.



Gambar 2.13 Visualisasi isometrik kabel pada peristiwa konduksi.

Pada persamaan (2.2), secara umum dapat diselesaikan dengan penyelesaian berikut ini.

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (2.3)$$

Untuk mencapai nilai integrasi yang konstan pada C_1 dan C_2 , maka berikut ini merupakan kondisi batasan yang bisa diberikan.

$$T(r_1) = T_{s,1} \text{ dan } T(r_2) = T_{s,2}$$

Maka persamaan yang bisa didapatkan jika nilai di atas diaplikasikan pada persamaan (2.10) adalah $T_{s,1} = C_1 \ln r_1 + C_2$ dan $T_{s,2} = C_1 \ln r_2 + C_2$

Masing-masing dari persamaan di atas disubstitusikan ke persamaan umumnya, maka didapatkan persamaan berikut.

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_2/r_1)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + T_{s,2} \quad (2.4)$$

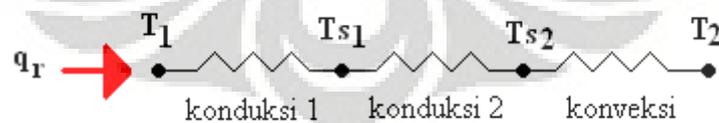
Jika distribusi temperatur, persamaan (2.4), digunakan sesuai dengan Hukum Fourier, persamaan (2.2), maka akan didapatkan persamaan untuk menjelaskan laju perpindahan kalor (*heat transfer rate*) sebagai berikut.

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2.5)$$

Berdasarkan hasil ini, jelas sekali bahwa untuk konduksi yang terjadi secara radial, maka resisten termalnya adalah sebagai berikut.

$$R_{\text{cond}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.6)$$

Berdasarkan Gambar 2.13, maka susunan tahanan termal yang bisa diperoleh adalah sesuai dengan visualisasi di bawah ini.



Gambar 2.14 Tahanan termal pada permukaan melintang kabel.

Maka nilai laju perpindahan kalor berdasarkan nilai tahanan termalnya adalah

$$q_r = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\frac{\ln r_1}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{2\pi r_2 h L}} \quad (2.7)$$

Hasil untuk perhitungan yang termasuk di dalamnya ada overall heat transfer koefisiennya adalah

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,2}) \quad (2.8)$$

Dimana $T_{\infty,1} - T_1$ dan $T_{\infty,2} - T_2$

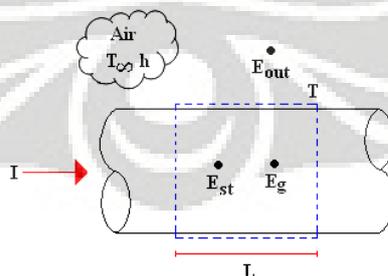
Jika U bisa didefinisikan pada kaitannya dengan luasan permukaan $A_1 = 2\pi rL$, maka persamaan (2.7) dan (2.8) dapat dihasilkan seperti berikut ini.

$$U_1 = \frac{1}{\frac{r_2}{k_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_2} + \frac{r_2}{r_2 h}} \quad (2.9)$$

Definisi yang diberikan pada rumus (2.9) dapat berubah-ubah, bergantung pada jumlah lapisan yang menyelimuti inti kabel. Maka, overall heat transfer koefisien dapat diekspresikan juga sebagai berikut.

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 = U_3 A_3 = (\sum R_i)^{-1} \quad (2.10)$$

Hukum pertama termodinamika sering digunakan dalam pengilustrasian konservasi energi. Pada saat sebuah batang konduktor memiliki kesetimbangan termal dan dialiri arus listrik, maka terdapat sebuah variasi nilai temperatur yang dihasilkan dimana dapat ditinjau dari perubahan waktu. Maka persamaan yang dapat dikembangkan sesuai dengan keadaan tersebut dapat dijelaskan melalui penjelasan di bawah ini.



Gambar 2.15 Visualisasi batang konduktor berpengantar arus I.

Pada volum kontrol terdapat kesetimbangan energi

$$E_{st} + E_g = E_{out} \quad \text{atau} \quad E_g - E_{out} = E_{st} \quad (2.11)$$

Dimana pembangkitan energi berdasarkan pemanasan akibat resistensi elektrik.

$$E_g = I^2 R_e' L \quad (2.12)$$

Pemanasan terjadi secara seragam di dalam kontrol volum dan bisa diekspresikan melalui laju pembangkitan energi panas volumetrik q (W/m^3). Laju pengembangan seluruh kontrol volum adalah kemudian $E_g = q V$, dimana $q = I^2 R_e' / (\pi D^2 / 4)$. Energi yang mengalir keluar disebabkan oleh konveksi dan jumlah radiasi dari permukaan.

$$E_{out} = h(\pi DL)(T - T_{sur}) + \epsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{surface}^4) \quad (2.13)$$

Dan jumlah perubahan energi simpanan E_{st} berdasarkan pada perubahan temperatur.

$$E_{st} = \frac{dU_t}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho V c T^4) \quad (2.14)$$

Energi simpanan E_{st} berhubungan dengan energi dalam dari batang silinder, dimana ρ dan c adalah mass density dan specific heat yang tergantung dari material silinder dan V adalah volume batang silinder, $V = (\pi D^2 / 4)L$. Persamaan (2.12) sampai (2.14) disubstitusikan ke persamaan (2.11), maka hasilnya adalah

$$I^2 R_e' L - h(\pi DL)(T - T_{sur}) - \epsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{surface}^4) = \rho c \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) L \frac{dT}{dt} \quad (2.15)$$

Maka hasil akhirnya adalah

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 R_e' - h(\pi D)(T - T_{sur}) - \epsilon\sigma(\pi D)(T^4 - T_{surface}^4)}{\rho c \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (2.16)$$

2.2.3 Temperatur pada Sambungan Kabel

Percikan api yang terjadi karena kesalahan isolasi ini sangat minimal dan gejala tersebut dapat berjalan sangat lama, berbulan-bulan kadang-kadang bertahun-tahun. Jadi tiap-tiap waktu arus mengalir di atas permukaan bahan isolasi, bila sifatnya organik, akan terjadi karbonasi, tetapi sangat sedikit. Hal

yang lebih memungkinkan adalah terjadinya pengasapan/percikan api pada isolator pada sambungan kabel (selotip).

Pada penjelasan sebelumnya, bahwa terdapat celah udara dalam sebuah sambungan kabel akan memudahkan terjadi peristiwa hubungan singkat bisa dijelaskan dengan penjelasan berikut ini.

Pada saat dua buah inti kabel disatukan berarti terdapat sebuah pengurangan luasan bidang sentuh antar muka pada inti kabel, atau dengan kata lain luas penampang kabel akan menjadi lebih kecil.

Persamaan tahanan listrik berdasarkan luas penampang adalah:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\gamma A} \quad (2.17)$$

Dimana:

- R : Tahanan listrik (Ohm)
- ρ : Tahan jenis penghantar ($\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
- l : Panjang penghantar (m)
- A : Luas penampang penghantar (mm^2)
- γ : Konduktivitas penghantar ($\text{m}/\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2$)

Persamaan tahanan listrik pada nilai temperatur tertentu.

$$R_t = R_o (1 + \alpha(T_t - T_o)) \quad (2.18)$$

Dimana:

- R_t : Nilai tahanan pada temperatur kondisi t (Ohm)
- R_o : Nilai tahanan awal pada temperatur kondisi o (Ohm)
- α : Koefisien tahanan temperatur ($1/\text{K}$ atau $1/^\circ\text{C}$)
- T_t : Temperatur akhir ($^\circ\text{C}$)
- T_o : Temperatur awal ($^\circ\text{C}$)

Persamaan nilai kapasitansi sebuah penghantar listrik. Sebuah penghantar kabel memiliki muatan, q (coulomb/m), dan nilai radiasi flux dari secara radial

memiliki radiasi fluks, maka nilai density flux D (coulomb/m²) pada jarak x (m) dari inti penghantar adalah

$$D = \frac{q}{2\pi x} \quad (2.19)$$

Jika diketahui nilai intensitas medan listrik pada nilai x tersebut adalah

$$E_x = \frac{D_x}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.20)$$

$$E_x = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r x} \quad (2.21)$$

Dengan demikian, energi medan listrik sepanjang penghantar dx adalah

$$dW = -E dx \quad (2.22)$$

dan beda potensial yang timbul sepanjang penghantar dx adalah

$$dV = -E dx \quad (2.23)$$

Berdasarkan persamaan-persamaan di atas, maka nilai beda potensial yang timbul antara permukaan inti kabel dengan permukaan isolatornya adalah

$$V = \int_R^r E dx = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \int_R^r \frac{dx}{x} = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \log_e(R/r) \quad (2.24)$$

Sehingga dapat dihitung nilai kapasitansi penghantar kabel dalam tiap meter, yaitu:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\log_e(R/r)} = \frac{2\pi \epsilon_0 \cdot 10^{-9}}{2.3 \log_{10}(R/r)} \text{ (Farad/meter)} \quad (2.25)$$

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\epsilon_r}{18 \log_{10}(D/d)} \text{ (microFarad/meter)} \quad (2.26)$$

Dimana:

- C : Kapasitansi penghantar listrik (microfarad/meter)
- q : Nilai kalor radiasi dari inti kabel secara radial (Coloumb)
- V : Beda potensial penghantar kabel listrik (Volt)
- ϵ_0 : Permittivitas di udara

- ϵ_r : Permittivitas di relative dari isolator penghantar kabel
- D : Diameter total penghantar kabel (m)
- d : Diameter penghantar kabel (m)

Berdasarkan rumus (2.17), seiring dengan bertambahnya luas penampang maka nilai tahanan kabel akan turun dan apabila nilai tahanan kabel turun, maka kemampuan hantar arus kabel akan semakin baik.

Namun berdasarkan rumus (2.18), seiring dengan adanya peningkatan nilai temperatur maka nilai tahanan kabel akan bertambah besar.

Pada dasarnya, nilai kenaikan temperatur akibat adanya energi panas yang berlebihan dipengaruhi oleh nilai kapasitansinya. Rumus (2.26) menunjukkan bahwa apabila terdapat ruang udara pada sebuah jalinan sambungan listrik, maka akan timbul sebuah beda potensial yang juga dipengaruhi oleh nilai permittivitas udara pada faktor nilai radius penghantar kabel.



Gambar 2.16 Celah udara pada sambungan kabel Jointing 0.0.

Dalam sebuah jalinan inti kabel pada Gambar 2.17, terlihat bahwa kedua inti kabel akan bertemu dan merapat. Walaupun secara kasat mata inti kabel tersebut terlihat bisa sangat rapat, namun secara mikroskopis masih terdapat celah-celah udara di antara jalinan kabel tersebut. Hal tersebut menimbulkan adanya nilai kapasitansi, dimana sebuah inti kabel menghantarkan arus listrik dengan memiliki perbedaan nilai potensial dan muatan melalui sebuah sambungan.

Nilai kapasitansi yang muncul pada sambungan kabel adalah

$$C = \frac{\epsilon_r d}{\sum \left(\frac{d_1 - d_2}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2 - d_3}{\epsilon_{r2}} \right)} \text{ (Farad)} \quad (2.27)$$

Berdasarkan rumus (2.26) dan (2.27) dengan nilai $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ Farad/meter dan nilai $\epsilon_r = 1$ Farad/meter, maka nilai energi yang timbul pada sambungan kabel ini dengan pengaruh kapasitansinya adalah

$$dW = v dq \tag{2.28}$$

Diketahui bahwa $q = C v$ atau $dq = C dv$ (2.29)

Maka persamaan (2.28) menjadi $dW = C v dv$ (2.30)

$$W = \int_0^v C v dv = C \left[\frac{v^2}{2} \right] \tag{2.31}$$

$$W = \frac{1}{2} C v^2 \text{ (Joules)} \tag{2.32}$$

2.2.4 Formulasi Matematika untuk Peristiwa Pirolisis pada Kabel

Seperti yang dibahas pada paragraf sebelumnya, bahwa asap yang muncul merupakan hasil dari peristiwa pirolisis dapat terjadi akibat adanya radiasi fluks panas pada permukaan isolator kabel. Berikut ini akan dijelaskan formulasi matematika yang telah berhasil dikembangkan oleh [9]. Kabel listrik dimodelkan seperti tampak pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.17 Visualisasi kabel yang sedang mengalami pirolisis.

Panjang dari kabel dinotasikan dengan l_p , inti dari kabel listrik adalah tembaga dengan radius R_0 . Bahan isolator kabel terbuat dari polimer seperti *Polyethylene* PE. Total radius kabel dinotasikan dengan R_1 . Temperatur dari pengukuran kabel dikembangkan secara konduksi panas 2 dimensi pada koordinat berbentuk silinder.

$$\rho(r)c(r) \frac{dT}{dt} = k(r) \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk(r) \frac{dT}{dr} \right) \quad (2.33)$$

$$\text{Dimana } k(r) = \begin{cases} k_{cc} & 0 \leq r \leq R_0 \\ k_p & R_0 \leq r \leq R_1 \end{cases} \quad (2.34)$$

Lambang cc untuk simbolisasi inti kabel (*central core*) dan i adalah simbolisasi untuk permukaan insulator. Kondisi batas bawah dari kabel sesuai dengan gambar skema adalah

$$-k(r) \frac{dT}{dx} = \varepsilon_r q^n - h(T - T_a) - \varepsilon_r \sigma (T^4 - T_a^4) \text{ pada } x = 0, 0 \leq r \leq R_1 \quad (2.35)$$

Dimana ε_r adalah emissivity. Ujung bagian atas kabel diasumsikan terisolasi secara sempurna, maka

$$\frac{dT}{dx} = 0 \text{ pada } x = l_p, 0 \leq r \leq R_1 \quad (2.36)$$

Kondisi simetris diaplikasikan pada inti kabel,

$$\frac{dT}{dr} = 0 \text{ pada } r = 0, 0 \leq x \leq l_p \quad (2.37)$$

Pada permukaan terluar, panas hilang melalui peristiwa konveksi dan radiasi,

$$-k(r) \frac{dT}{dx} = h(T - T_a) + \varepsilon_r \sigma (T^4 - T_a^4) \text{ pada } r = R_0 \text{ atau } R_1, 0 \leq x \leq l_p \quad (2.38)$$

Selama peristiwa pirolisis terjadi, pergerakan proses permukaan depannya dideskripsikan oleh arahan kondisi Stefan

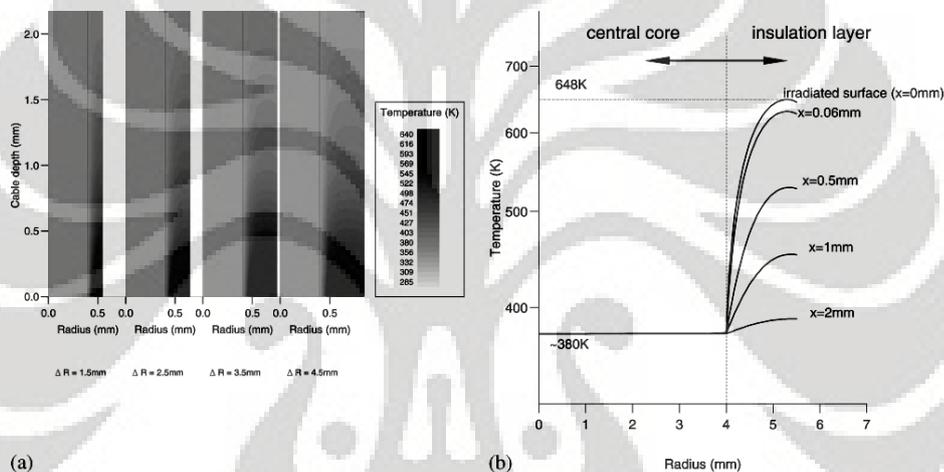
$$q_n + k_t \frac{dT}{dx} = \rho_t L_p v_n \quad (2.39)$$

Dimana lambang n dan turunan terhadap n merupakan komponen pada arah normal di permukaan yang terjadi pirolisis.

Di bawah ini merupakan propertis termal bahan-bahan yang biasa dijadikan inti kabel. Nilai termal emissivity ϵ_r dari tembaga adalah 0.8.

Tabel 2.4 Termal propertis dari material logam penghantar listrik [25].

	Thermal conductivity k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Specific heat capacity c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Density ρ (kg m^{-3})	Volumetric heat capacity ρc ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	Melting temperature (K)
Aluminium (pure)	237	903	2702	2.44×10^6	933
Copper (pure)	401	385	8933	3.44×10^6	1358
Lead	35.3	129	11340	1.46×10^6	601
Nickel (pure)	90.7	444	8900	3.95×10^6	1728
Platinum (pure)	71.6	133	21450	2.85×10^6	2045
Silicon	148	712	2330	1.66×10^6	1685
Silver	429	235	10500	2.47×10^6	1235



Gambar 2.18 (a) Visualisasi evolusi waktu dan (b) grafik terhadap efek pirolisis pada permukaan isolator kabel PE pada tahap *preheating* hasil percobaan Leung *et al* (1998).

Berdasarkan percobaan [9] salah satu kesimpulan yang dapat menunjang teori dalam penelitian ini adalah bahwa keberadaan sifat konduktif pada bahan inti kabel, tembaga, membuat waktu *preheating* terhadap proses pirolisis menjadi lebih lama karena adanya sifat isolator pada bahan PE.

2.2.4 Energi dalam Penghantar Listrik

Pada saat penghantar kabel belum diberikan arus listrik, maka energi konstan yang timbul dapat diberikan oleh persamaan berikut ini.

$$g = \frac{I^2 R}{\sigma} \quad (2.40)$$

Dengan

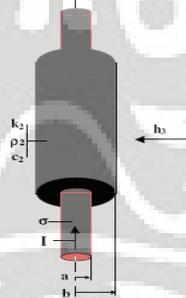
- g = Energi yang timbul dalam penghantar kabel
- I'' = arus listrik pada saat sebelum diberi arus listrik (t=0)
- σ = resistivitas konduktor kabel

Diasumsikan bahwa penghantar dan isolasi berhubungan secara sempurna satu sama lain atau dengan kata lain tidak ada celah udara yang terdapat pada permukaan dalam kabel. Saat kabel mengalami pendinginan akibat adanya konveksi natural maupun radiasi, maka persamaannya dapat dilihat seperti di bawah ini.

$$-k_2 \frac{dT_2(b,t)}{dr} = h_3 T_2(b,t); t > 0 \quad (2.42)$$

Dengan

- T_2 = temperatur pendinginan pada luar penghantar kabel
- h_3 = koefisien linier heat transfer baik konveksi maupun radiasi
- r = permukaan kabel (b)



Gambar 2.19 Isometri penampang kabel

Panas yang timbul dihantarkan secara konduksi ke seluruh permukaan kabel. Dengan asumsi bahwa logam penghantar adalah logam dengan termal konduktor yang lebih baik jika dibandingkan dengan isolatornya, maka temperatur pada seluruh permukaan penghantar adalah konstan.

Secara umum, perpindahan panas secara konduksi dapat diberikan sebagai berikut. Persamaan-persamaan di bawah ini merujuk kepada Gambar 2.6.

$$\alpha_1 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_1}{dr} \right) + \frac{\alpha_1}{k_1} g_1 = \frac{dT_1}{dt} ; 0 < r < a, t > 0 \quad (2.42)$$

$$\alpha_2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_2}{dr} \right) + \frac{\alpha_2}{k_2} g_2 = \frac{dT_2}{dt} ; 0 < r < a, t > 0 \quad (2.43)$$

Dengan kondisi inisial $T_1(r, 0) = T_2(r, 0) = 0$

dan dengan kondisi sekeliling $T_1(a, t) = T_2(a, t) ; t > 0$

Dengan mensubstitusi nilai volum penghantar kabel $dV = \pi a^2 dz$ ke dalam persamaan (2.21), maka persamaannya menjadi

$$\int k_1 \frac{d^2 T_1}{dr^2} dV + \int \frac{k_2}{r} \frac{dT_2}{dr} dV + \int g_1 dV = \int c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} dV \quad (2.44)$$

Dimana thermal diffusivity (temperatur keseluruhan) $a_1 = k_1 / c_1 \rho_1$ untuk memperlihatkan hubungan perbedaan proses energi yang berbeda, seperti yang diberikan pada persamaan (2.41). Karena tidak ada perbedaan temperatur sepanjang penghantar kabel, sehingga jika panjang penghantar dz dan luas penampang dimasukkan ke persamaan (2.41) maka akan didapatkan:

$$z_0^a \frac{dT_1}{dr^2} 2\pi k_1 r dr dz + z_0^a \frac{k_2}{r} \frac{dT_2}{dr} 2\pi r dr dz + z_0^a g_1 2\pi r dr dz = z_0^a c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} 2\pi r dr dz \quad (2.45)$$

$$2\pi k_1 dz \left[L_0^a \frac{dT_1}{dr} r - z_0^a \frac{dT_1}{dr} r \right] + 2\pi k_2 dz [T_1(a, t) - T_1(0, t)] + \pi a^2 g_1 dz = \pi a^2 c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} dz \quad (2.46)$$

Sehingga setelah substitusi dilakukan, maka persamaannya akan menjadi

$$2\pi k_1 dz a \frac{dT_1}{dr} L_{r=a} + \pi a^2 g_1 dz = \pi a^2 c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} dz \quad (2.47)$$

Jika persamaan ini dibagi dengan persamaan (2.21) maka hasilnya akan menjadi

$$\frac{2}{a} k_2 \frac{dT_2}{dr} L_{r=a} + g_1 = c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} L_{r=a} \quad (2.48)$$

Dengan demikian didapatkan persamaan pada kondisi-kondisi khusus:

$$\alpha_2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_2}{dr} \right) = \frac{dT_2}{dr} ; a < r < b, t > 0 \quad (2.49)$$

$$\frac{2}{\alpha} k_2 \frac{dT_2}{dr} + g_1 - c_1 \rho_1 \frac{dT_2}{dr} ; r = a, t > 0 \quad (2.50)$$

$$-k_2 \frac{dT_2}{dr} + h_3 T_2 = 0 ; r = b, t > 0 \quad (2.51)$$

$$T_2 = 0 ; a \leq r \leq b, t = 0 \quad (2.52)$$

Pada kondisi steady state temperatur T_2^{∞} persamaan (2.22) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_2^{\infty}}{dr} \right) = 0 \quad (2.53)$$

Persamaan di atas kemudian diintegrasikan menjadi

$$T_2^{\infty} = c_1 \ln r + c_2 \quad (2.54)$$

Dimana nilai konstanta c_1 dan c_2 didapatkan dari persamaan (2.31) dan (2.32)

$$c_1 = \frac{\alpha^2 g_1}{2k_2} \quad (2.55)$$

$$c_2 = \frac{\alpha^2 g_1}{2bh_3} \left[1 + \frac{bh_3}{k_2} \ln b \right] \quad (2.56)$$

Jika disubstitusikan ke persamaan (2.51), maka didapatkan

$$T_2^{\infty} = \frac{\alpha^2 g_1}{2k_2} \left[\ln \frac{b}{r} + \frac{k_2}{2bh_3} \right] \quad (2.57)$$

Dengan catatan bahwa $T_0 = \frac{-\alpha^2 g_1}{2k_2}$ dan bilangan Biot Bi adalah $Bi = \frac{bh_3}{k_2}$

Maka dengan demikian nilai T_2^{∞} adalah

$$T_2^{\infty} = T_0 \left[\frac{1}{Bi} + \ln \left(\frac{b}{r} \right) \right] \quad (2.58)$$

Kondisi sekitar penghantar kabel seperti pada persamaan (2.30) adalah pada kondisi tidak homogen karena pengaruh dari g_1 dan dapat dihomogenkan dengan memberikan variabel temperatur yang baru $\vartheta(r,t)$ dimana

$$\vartheta(r,t) = T_2(r,t) - T_2^\infty \quad (2.59)$$

Sehingga jika disubstitusikan ke persamaan (2.46) sampai dengan (2.49) maka

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\vartheta}{dr} \right) = \frac{1}{\alpha_2} \frac{d\vartheta}{dt} ; a < r < b, t > 0 \quad (2.60)$$

$$-\frac{d\vartheta}{dr} - \frac{\alpha_2 \rho_2}{2k_2} \frac{d\vartheta}{dt} = 0 ; r = a, t > 0 \quad (2.61)$$

$$\frac{d\vartheta}{dr} + \frac{h_2}{k_2} \vartheta = 0 ; r = b, t = 0 \quad (2.62)$$

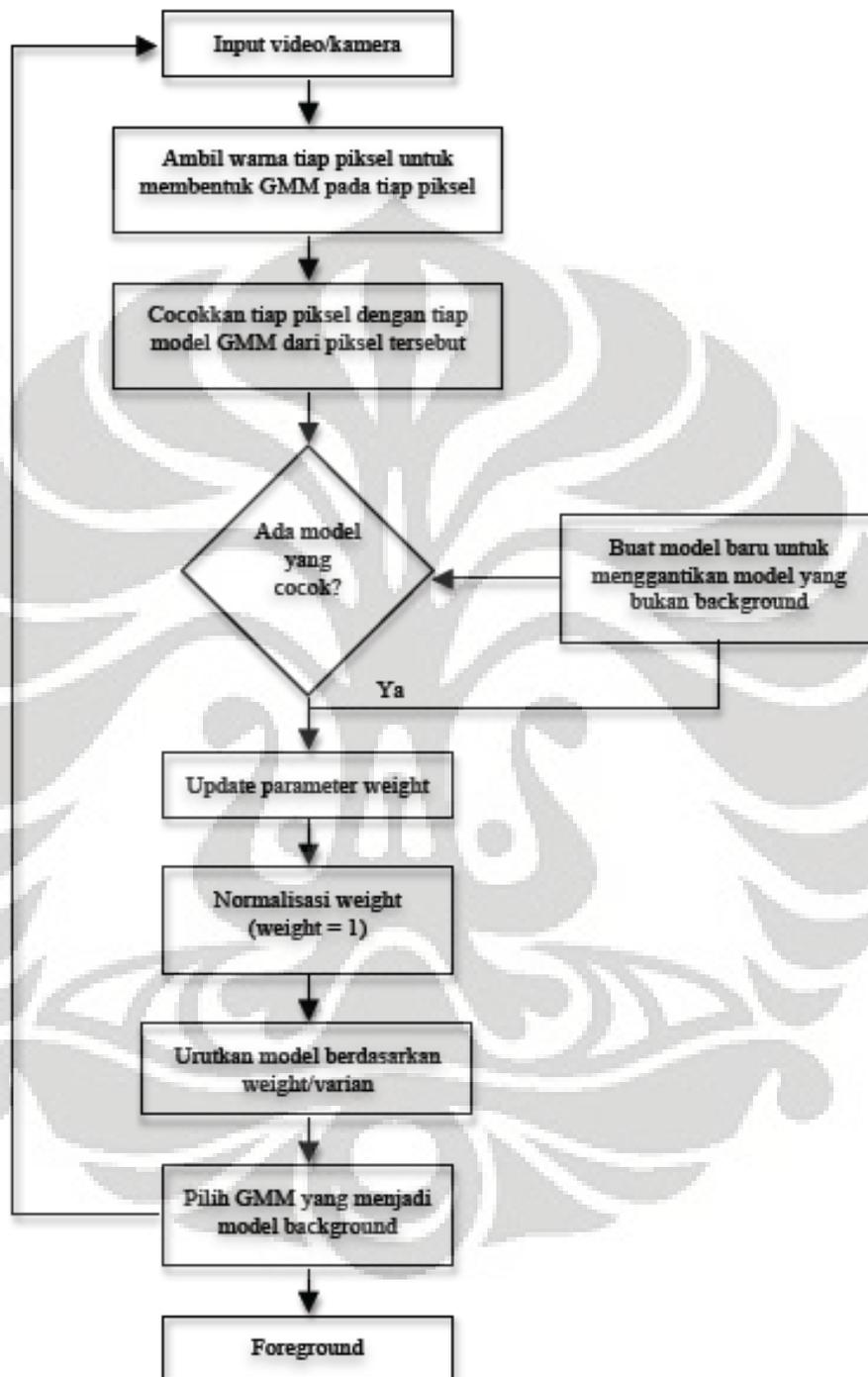
$$\vartheta = -T_0 \left[\frac{1}{Et} + \ln \left(\frac{b}{r} \right) \right] ; a < r < b, t = 0 \quad (2.63)$$

2.3 Teori Dasar Pemrograman

Dalam ilmu proses pencitraan (*image processing*), terdapat banyak cara untuk melakukan pendeteksian gerak dan objek. Salah satu bagian yang paling penting dari sistem pendeteksian adalah segmentasi pada objek yang bergerak dari latar belakangnya. Adaptive Gaussian Mixture Model adalah salah satu metode dalam melakukan segmentasi pada objek yang bergerak. Pada penelitian tentang Pendeteksian Kebakaran dengan dasar pencitraan gambar, digunakan sistem yang telah dikembangkan oleh [6].

GMM ini digunakan karena cocok untuk masalah asap karena sering dijumpai keadaan dimana terjadi perubahan pencahayaan, pergerakan asap yang terjadi secara berulang-ulang, sering kali muncul dan hilang dari layar, dan terutama karena asap merupakan objek yang rumit. Penelitian dalam ilmu pemrograman yang menggunakan dasar teorema GMM tidak hanya kali ini saja, sudah terdapat penelitian dari Weiser D Brupbacher T. yang mendeteksi

kebakaran secara otomatis pada terowongan dengan gambar video [30]. Berikut ini merupakan diagram alir proses yang dilakukan oleh [6].



Gambar 2.20 Diagram alir proses pengolahan citra & pemrograman sistem deteksi asap [10]

Pada *library* OpenCV yang sering digunakan untuk pengolahan video, sudah disediakan kode program yang mengimplementasikan GMM ini

berdasarkan algoritma oleh P. KaewTraKulPong dan R. Bowden [19]. Sistem yang dikembangkan oleh mereka adalah sistem pendeteksian bayangan, yang mana mempunyai karakteristik visual yang mirip dengan objek asap. Pada penelitian tersebut, yang dipakai adalah memodelkan setiap proses *pixel* sebagai sebuah GMM dengan komponen K Gaussian, dimana K adalah sebuah konstanta antara 3 dan 5 yang pernah dikembangkan oleh C. Stauffer *et al* [12].

Pada penelitian tentang sistem deteksi asap berbasis pencitraan gambar, digunakan sistem yang telah dikembangkan oleh Suwarno [6]. Pada sistem ini, sebuah program dengan dasar bahasa C++ dilengkapi dengan tambahan Open CV library dikembangkan dengan metode logika fuzzy untuk menjelaskan karakteristik gerak dari asap.

2.3.1 Permodelan pixel

Komponen Gaussian baru akan dibuat pada setiap piksel dengan tingkat keabuan sebagai nilai rata-rata, variansi awal, serta bobotnya. Hal ini akan dilakukan begitu *frame* pertama dari video masuk. Dengan model seperti ini, maka setiap *pixel* mempunyai sebuah jangkauan baru yang akan digunakan untuk melakukan pembaharuan model jika sebuah kecocokan ditemukan. Kecocokan tersebut ditentukan sebagai sebuah nilai *pixel* pada standar variansi 2,5 dari sebuah komponen Gaussian. Sebaliknya apabila tidak ada yang cocok, maka sebuah komponen Gaussian baru akan dibuat dan komponen yang lama tetap disimpan. Probabilitas *pixel* yang mempunyai nilai x_N pada waktu N dapat dituliskan sebagai berikut:

$$p(x_N) = \sum_{j=1}^K w_j \eta(x_N; \theta_j) \quad (2.64)$$

dengan w_k adalah parameter bobot ke k^{th} dari komponen Gaussian dan $\eta(x; \theta_k)$ adalah distribusi normal dari komponen ke k^{th} .

Maka untuk distribusi normal $\eta(x; \theta_k)$ dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta(x; \theta_k) = \eta(x; \mu_k; \Sigma_k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu_k)^T \Sigma_k^{-1}(x-\mu_k)} \quad (2.65)$$

2.3.2 Estimasi latar

Pada GMM, pengurutan berdasarkan ω/σ digunakan sebagai acuan untuk dijadikan sebagai komponen background seperti yang dilakukan oleh C. Stauffer et al [13,14]. Dimana mereka memilih komponen B yang pertama dari semua komponen yang telah diurutkan dengan ω/σ sebagai latar, dimana:

$$B = \underset{k}{\operatorname{argmin}} (\sum_{j=1}^k w_j > T) \quad (2.66)$$

Dengan *threshold* T adalah pecahan minimum dari model latar. Kemudian seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, komponen Gaussian yang paling pertama cocok dengan *test value* akan diperbaharui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\hat{w}_k^{N+1} = (1 - \alpha)\hat{w}_k^N + \alpha\delta(\omega_k|x_{N+1}) \quad (2.67)$$

$$\hat{\mu}_k^{N+1} = (1 - \alpha)\hat{\mu}_k^N + \beta x_{N+1} \quad (2.68)$$

$$\hat{\Sigma}_k^{N+1} = (1 - \alpha)\hat{\Sigma}_k^N + \rho(x_{N+1} - \hat{\mu}_k^{N+1})(x_{N+1} - \hat{\mu}_k^{N+1})^T \quad (2.69)$$

$$\rho = \alpha\eta(x_{N+1}; \hat{\mu}_k^N, \hat{\Sigma}_k^N) \quad (2.70)$$

$$\delta(\omega_k|x_{N+1}) = \begin{cases} 1; & \text{jika } \omega_k \text{ adalah komponen Gaussian yang cocok pertama kali} \\ 0; & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.71)$$

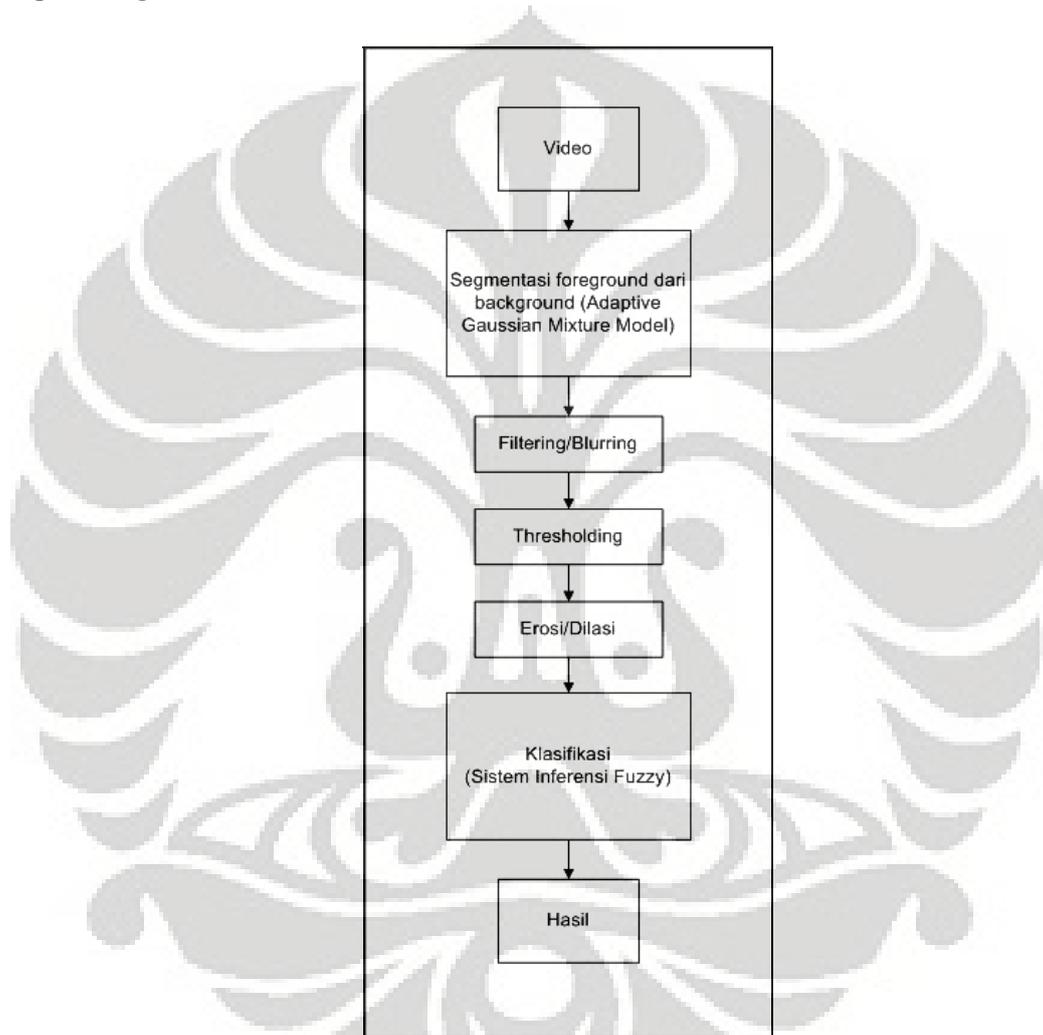
Apabila ternyata tidak terdapat distribusi K yang cocok dengan nilai *pixel*, maka komponen yang memiliki kemungkinan sebagai latar akan diganti dengan distribusi yang baru.

2.3.3 Pendeteksian Asap dengan Adaptive Gaussian Mixture Model

Pada penelitian tentang Pendeteksian Kebakaran dengan dasar pencitraan gambar, sistem yang digunakan adalah sistem yang telah dikembangkan oleh [6]. Pada sistem ini, sebuah program dengan bahasa C++ dengan tambahan Open CV library dikembangkan dengan metode logika fuzzy untuk menjelaskan karakteristik gerak dari asap. Logika *fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A Zadeh dengan teori himpunan *fuzzy* [31]. Logika ini merupakan pengembangan

dari logika klasik dimana hanya ada dua nilai kebenaran yakni salah (0) atau benar (1).

Logika ini kemudian diintegrasikan menjadi sebuah sistem logika yang disebut sistem *fuzzy*. Sistem *fuzzy* terdiri dari 3 tahapan yang utama yakni fuzzifikasi, inferensi *fuzzy*, dan defuzzifikasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagan berikut:



Gambar 2.21 Flow diagram untuk proses pencitraan gambar dari sistem *video smoke detector* [6].

- Fuzzifikasi

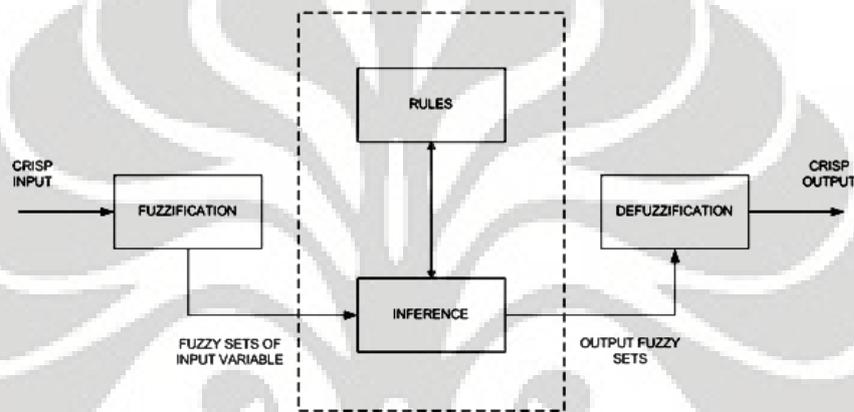
Tahapan dimana terjadi transformasi masukan yang bernilai *crisp* menjadi sebuah nilai *fuzzy* dimana akan ditentukan pula derajat keanggotaannya.

- Inferensi Fuzzy

Pada tahapan ini, akan dilakukan evaluasi masukan yang telah melalui proses fuzzifikasi sebelumnya terhadap aturan-aturan yang telah didefinisikan dari basis pengetahuan yang dimiliki.

- Defuzzifikasi

Tahapan terakhir dimana masukan untuk proses defuzzifikasi adalah agregasi dari luaran himpunan *fuzzy* dan luarannya dapat berupa sebuah nilai tunggal (*crisp*).



Gambar 2.22 Sistem Fuzzy oleh Kwang (2005).

Pada sistem pendeteksian yang dikembangkan ini, terdapat tiga sistem *fuzzy* yang dipakai untuk melakukan klasifikasi asap [6]. Ketiga desain sistem tersebut antara lain:

1. Desain sistem fuzzy untuk ukuran blob
2. Desain sistem fuzzy untuk arah blob
3. Desain sistem fuzzy untuk kecepatan blob

Ketiga sistem ini dipilih setelah melakukan banyak diskusi tentang bagaimana asap tersebut dapat terdeteksi secara visual. Ukuran, arah, dan juga kecepatan dapat memberikan gambaran asap yang muncul pada video merupakan asap yang berbahaya atau tidak. Setiap desain sistem fuzzy memiliki aturan-aturan yang telah dijabarkan oleh Suwarno *et al* (2010) [6]. Kemudian aturan-aturan ini akan menentukan blob tersebut merupakan asap yang berbahaya ataupun tidak.

2.4 Teori Dasar Mikroskop Pemindai Elektron (SEM)

Dalam melakukan penelitian ini, ada satu langkah percobaan terakhir dengan menggunakan mikroskop pemindai electron atau yang biasa disebut dengan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Pengujian dilakukan di Laboratorium CMPFA (*Centre for Materials Processing and Failure Analysis*) di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Pemindaian dilakukan terhadap isolator PVC hasil percobaan yang nantinya akan dibahas pada Bab 4 mengenai hasil percobaan dan analisisnya. Tujuan digunakannya mikroskop pemindai elektron ini untuk bisa melihat dari sisi mikroskopis isolator PVC hasil pemanasan berlebih yang nantinya akan dibandingkan dengan isolator PVC kabel hasil pemanasan/pembakaran luar. Dasar dari hal tersebut semua adalah untuk menjawab salah satu tujuan penelitian ini apakah dalam setiap kebakaran listrik kabel menjadi penyebab utama atau hanya menjadi korban kebakaran api. Berikut ini adalah teori singkat mengenai mikroskop pemindai elektron ini beserta beberapa aplikasinya di bidang keteknikan dan lainnya.

Mikroskop elektron adalah sebuah mikroskop yang mampu untuk melakukan pembesaran objek sampai 2 juta kali, yang menggunakan elektro statik dan elektro magnetik untuk mengontrol pencahayaan dan tampilan gambar serta memiliki kemampuan pembesaran objek serta resolusi yang jauh lebih bagus daripada mikroskop cahaya. Mikroskop elektron ini menggunakan jauh lebih banyak energi dan radiasi elektromagnetik yang lebih pendek dibandingkan mikroskop cahaya. Salah satu jenis mikroskop elektron adalah mikroskop pemindai electron (SEM).



Gambar 2.23 Scanning Electron Microscope (SEM) [27].

Mikroskop pemindai elektron (SEM) biasa digunakan untuk studi detail arsitektur permukaan sel (atau struktur jasad renik lainnya), dan obyek diamati secara tiga dimensi. Cara terbentuknya gambar pada SEM berdasarkan deteksi elektron baru (elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel ketika permukaan sampel tersebut dipindai dengan sinar elektron. Elektron sekunder atau elektron pantul yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya, kemudian besar amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*cathode ray tube*). Di layar CRT inilah gambar struktur obyek yang sudah diperbesar bisa dilihat. Pada proses operasinya, SEM tidak memerlukan sampel yang ditipiskan, sehingga bisa digunakan untuk melihat obyek dari sudut pandang 3 dimensi.

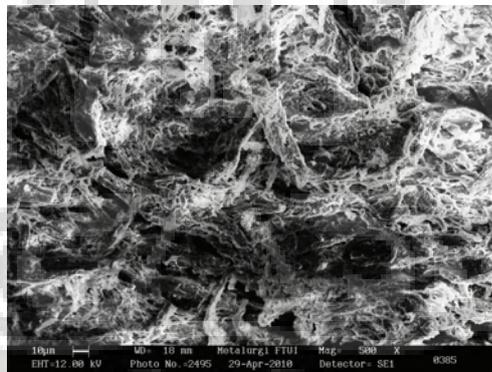
Agar pengamat dapat mengamati preparat dengan baik, diperlukan persiapan sampel pengujian dengan tahap-tahap sebagai berikut (Hofner, 2007):

1. Melakukan fiksasi, yang bertujuan untuk mematkan sel tanpa mengubah struktur sel yang akan diamati. fiksasi dapat dilakukan dengan menggunakan senyawa glutaraldehida atau osmium tetroksida.
2. Melakukan dehidrasi, yang bertujuan untuk memperendah kadar air dalam sayatan sehingga tidak mengganggu proses pengamatan.
3. Melakukan pelapisan. Pelapisan konduktif (*Conductive Coating*) yaitu suatu metode mempersiapkan lapisan ultra tipis dari suatu material *electrically-conducting*. Ini dilakukan untuk mencegah terjadinya akumulasi dari medan elektrik statis pada spesimen sehubungan dengan elektron irradiasi sewaktu proses penggambaran sampel. Beberapa bahan

pelapis termasuk emas, palladium (emas putih), platinum, tungsten, graphite dan lain-lain, secara khusus sangatlah penting bagi penelitian spesimen dengan SEM.

Oleh karena sampel kabel listrik yang diuji adalah terbuat dari bahan polimer (PVC), maka pada tahap ketiga tersebut sangat penting untuk dilakukan. Jika tidak, maka elektron-elektron yang ditembakkan saat melakukan pemindaian tidak akan mampu dipantulkan balik oleh material PVC kabel.

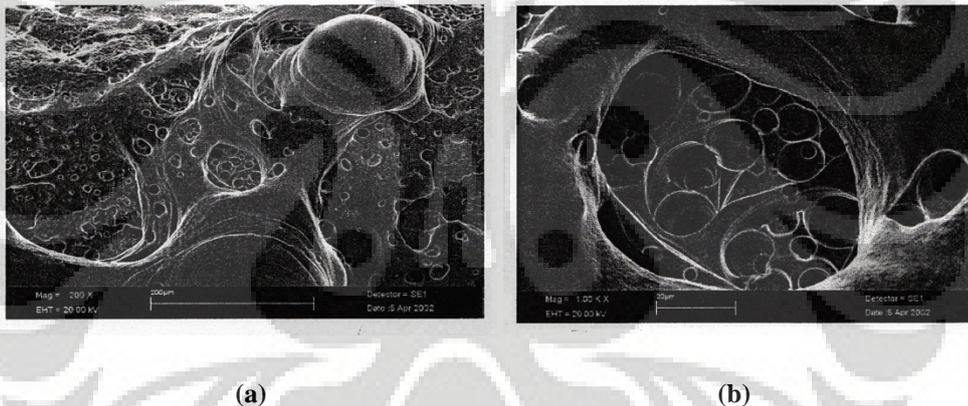
Dalam sebuah peristiwa pemanasan berlebih pada penghantar kabel, inti kabel yang terbuat dari tembaga yang menyimpan panas akan menyalurkan bentuk panas melalui peristiwa konduksi melalui kontak langsung pada permukaan dalam isolator. Seperti dalam penjelasan subbab sebelumnya, peristiwa pirolisis pada PVC kabel terjadi pada temperatur 112 °C – 145 °C [4]. Hal itu berarti permukaan PVC tidak akan bertahan pada temperatur tersebut untuk menyebabkan terjadinya proses pemutusan rantai monomer yang diikuti oleh peristiwa karbonisasi.



Gambar 2.24 Salah satu citra hasil pemindaian dengan perbesaran 500 kali menggunakan SEM pada bahan material PVC di stop kontak listrik yang terbakar.

Pada saat terjadinya hubungan singkat atau beban lebih yang melewati batas tahanan temperatur isolasi PVC maka secara perlahan-lahan akan terbentuk arang (karbonisasi) pada permukaan dalam isolator PVC. Karbonisasi pada peristiwa pembebanan berlebih ini akan terbentuk pada bagian isolator yang paling tipis dan atau pada titik kabel yang paling lembab.

Arang hasil karbonisasi PVC ini akan terbentuk dan bersifat semi konduktor dimana pada besaran arus tertentu akan dapat menghantarkan listrik. Pada saat tertentu, arus listrik yang mengalir melalui arang tersebut akan lebih mudah menyala karena sudah tersedianya media bahan bakar (arang). Ketika terdapat suatu kondisi dimana sebuah peristiwa pembakaran kaya akan bahan bakar (*fuel-rich portion*) namun tidak tersedianya oksigen yang cukup, maka secara natural proses tersebut akan ‘mencari’ keberadaan oksigen. Atau dengan kata lain, monomer-monomer pecahan polimer vnylchlorida akan berusaha mengikat oksigen. Tidak hanya material PVC yang berperilaku demikian, namun begitu pula material logam inti kabel dapat menunjukkan hasil yang sama. Oleh karena itu, pada beberapa peristiwa pemanasan berlebih atau hubungan singkat terdapat beberapa bukti hasil jejak pencarian oksigen. Penelitian ini pernah dilakukan sebelumnya oleh [4].



Gambar 2.25 Butiran hasil lelehan inti kabel setelah terjadinya bunga api pada pembesaran (a) 200 kali dan (b) 1000 kali.

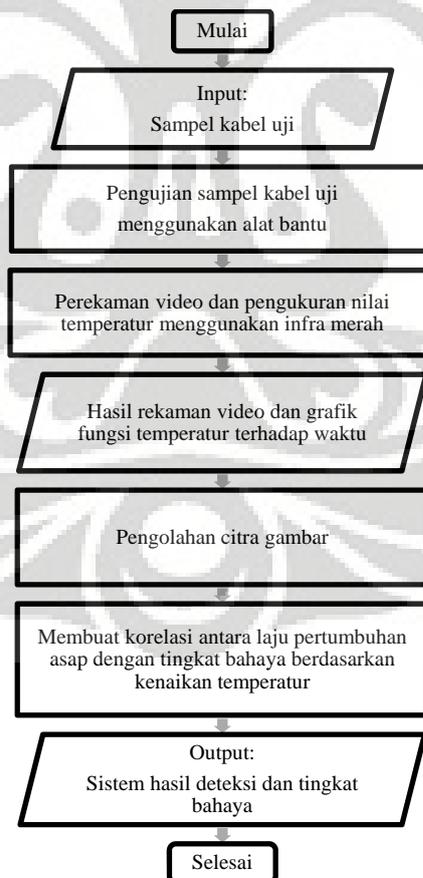
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ketiga ini berisi mengenai metodologi penelitian yang dimana terdapat di dalamnya penjelasan mengenai sistematika penelitian, skema pengujian, dan prosedur penelitian serta mengenai penjelasan beberapa alat yang digunakan dalam menjalani kegiatan penelitian ini.

3.1 Sistematika Penelitian

Berikut ini merupakan diagram alir penelitian yang telah dilakukan secara umum.

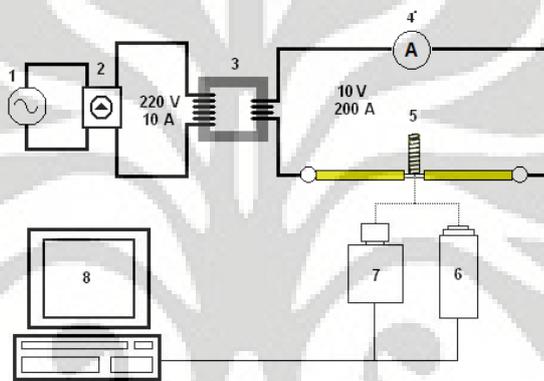


Gambar 3.1 Diagram alir proses penelitian.

3.2 Alat Uji Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, ada beberapa alat yang digunakan untuk membantu melakukan pengambilan data, ada yang digunakan secara langsung dan ada yang hasilnya perlu diolah terlebih dahulu. Berikut ini adalah penjelasan-penjelasan singkat mengenai alat uji yang digunakan.

Berikut ini adalah skema pengujian skala laboratorium yang dilakukan di dalam Laboratorium Termodinamika Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.



Gambar 3.2 Skematik diagram penelitian

Keterangan untuk skema gambar di atas adalah:

1. Sumber tenaga listrik
2. Regulator arus listrik
3. Trafo step-down 220 V/10 A – 10 Volt/400 A
4. Amperemeter
5. Sampel kabel uji
6. Termometer sinar infra merah
7. Kamera perekam
8. Komputer

Untuk memberikan pembebanan arus yang dilakukan adalah dengan menggunakan alat yang terdiri dari rangkaian alat nomor 1 sampai 5 pada skema

pengujian tersebut adalah alat yang telah dikembangkan oleh Adrianus (2010) pada penelitian sebelumnya.



Gambar 3.3 Alat penelitian yang berfungsi mengatur beban arus listrik.

Alat pengukur temperatur infra merah menggunakan produk dari FLUKE® *Infrared Thermometers* tipe 568 dengan spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3.4 Fluke ® 568 Infrared thermometer

Tabel 3.1 Spesifikasi alat Fluke Infrared thermometer tipe 568

Feature	Type 568
IR Temperature Range	(-40 °C to 800 °C)
Accuracy above 0 °C (32 °F)	> 0 °C: ± 1 % or ± 1.0 °C
Communication	USB 2.0
Operating altitude	3000 meters above mean sea level
Operating temperature	0 °C to 50 °C

Kamera perekam menggunakan jenis kamera pengawas produk dari Vivotek®, yaitu IP Camera Vivotek IP7132 dengan resolusi 640x480 piksel

dengan *frame rate* 15 fps. Berikut ini adalah gambar dan spesifikasi kamera yang disajikan dalam tabel.



Gambar 3.5 Vivotek Camera IP7132

Tabel 3.2 Spesifikasi Vivotek Camera IP7132

System	CPU: VVTK-1000 SoC Flash: 4MB RAM: 32MBMB Embedded OS: Linux 2.4
Lens	f = 4.0 mm F 1.6 CS-mount Fixed
Image settings	Adjustable image size, quality, and bit rate Time stamp and text caption overlay Flip & mirror Configurable brightness, contrast, saturation, sharpness, white balance and exposure AWB AES Supports privacy masks
Video	Compression: MPEG-4 Streaming: MPEG-4 streaming over UDP, TCP, HTTP or HTTPS MPEG-4 multicast streaming Supports 3GPP mobile surveillance Frame rates: MPEG-4: Up to 30/25 fps at 640x480
Power	12V DC Power consumption: Max. 4.9 W
Viewing System Requirement	OS: Microsoft Windows 2000/XP/Vista/7 Browser: Mozilla Firefox, Internet Explorer 6.x or above Cell phone: 3GPP player Real Player: 10.5 or above Quick Time: 6.5 or above

3.3 Prosedur Penelitian

Sebelumnya, perlu diketahui bahwa dalam melakukan penelitian mengenai kebakaran listrik ini, yang diuji adalah kabel listrik dalam pengaruh pembebanan arus yang melebihi batas. Kemudahan dalam melakukan pengontrolan variabel yang masuk dan output yang dihasilkan dalam eksperimen skala laboratorium, membuat penelitian ini cenderung lebih mudah dilakukan jika dibandingkan

dengan penelitian dan pengontrolan variabel untuk jenis kebakaran listrik yang bersifat terbuka (*open fire*).

Dalam melakukan penelitian ini, dilakukan beberapa langkah yang dibagi menjadi tiga tahapan. Tahapan-tahapan tersebut adalah:

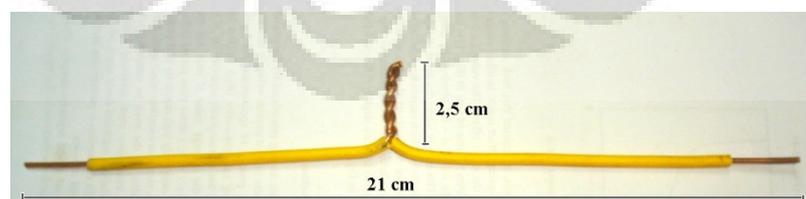
3.3.1 Tahapan persiapan dan material uji penelitian

Dalam tahapan ini, dilakukan persiapan sampel uji kabel, persiapan kelengkapan alat-alat uji termasuk alat bantu yang dibuat oleh pak adrianus dan alat pengukur temperatur serta kamera perekam. Sampel kabel uji yang digunakan adalah produk dari PT. Kabelindo Murni Tbk., dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.3 Spesifikasi kabel sampel uji penelitian dari PT. Kabelindo Murni Tbk.

Conductor nominal cross-section area	Nominal thickness insulation	Overall diameter (approx)	Weight of cable (approx)	Minimum bending radius	Current carrying capacity at 30 °C		Short circuit current capacity at			Standard delivery length
					in pipe	in air	0.1 second	0.5 second	1.0 second	
sq.mm	mm	mm	kg/mm	mm	A	A	kA	kA	kA	m
2,5 re	0,8	3,9	31	70	19	32	0,91	0,41	0,29	100/Coil

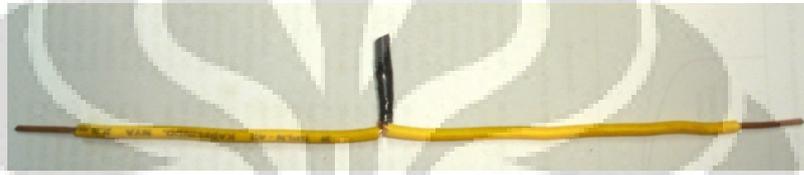
Kabel yang digunakan adalah jenis kabel NYA 2.5 mm² re (*round solid conductor*) dengan jenis konduktor adalah *annealed plain copper round solid* menurut/sesuai dengan SPLN 41-1 IEC 60228 dan jenis insulasi *extruded layer of Polyvinyl Chloride (PVC)* sesuai dengan SPLN 41-2 berwarna kuning. Kabel tersebut dipotong dan dibentuk dengan ukuran seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.6 Bentuk geometri sampel kabel uji dengan Jointing 0.0.

Pada bagian tengah sampel uji tersebut, dibuat sambungan dengan jenis Jointing 0.0 dengan jumlah lilitan sebanyak enam buah dan tinggi sekitar 2,5 cm.

Kemudian, pada bagian sambungan tersebut dililitkan karet isolator berwarna hitam yang terbuat dari bahan PVC sebanyak 3 lilitan. Tujuan dari pemasangan karet isolator ini adalah sebagai salah satu pelengkap pengujian data yang bertujuan justru untuk mencari nilai asap, pada arus dan temperatur berapa dia muncul. Isolator diberikan sebagai pelengkap dari tiga unsur utama untuk menimbulkan asap dan api pada peristiwa pembakaran. Sifat umum material uji telah dijelaskan pada bab sebelumnya.



Gambar 3.7 Kabel sampel uji yang sudah diberikan karet isolator tambahan.

3.3.2 Tahap pengambilan data

Pada saat melakukan pengambilan data, alat-alat tersebut diintegrasikan satu sama lain ke komputer pengolah. Data masukan berupa rekaman video dan nilai temperatur disimpan kedalam komputer. Arus listrik diatur besarnya melalui sebuah regulator yang terdapat pada alat bantu. Melalui tampilan yang diberikan pada amperemeter, bisa dilihat nilai besar arus listrik yang telah diatur.



(a)

(b)

Gambar 3.8 (a) Integrasi alat-alat dalam melakukan penelitian dan pengambilan data dan (b) alat pengatur arus listrik (*electric current regulator*)

Pusat konsentrasi pengambilan nilai temperatur difokuskan pada titik tengah penyambungan kabel karena memang di titik itulah pada awalnya akan diharapkan terjadi peristiwa munculnya asap. Kondisi sampel kabel uji dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki hambatan yang besar pada titik penyambungan. Sebuah peristiwa pemanasan berlebih akibat adanya aliran arus yang besar (berlebihan) akan lebih mudah muncul pada suatu titik yang memiliki beda potensial, dalam hal ini antara dua kabel yang disambung, sehingga penelitian ini lebih mudah dilakukan karena kontrol volum yang dimiliki tidak terlalu besar.



Gambar 3.9 Titik konsentrasi pengambilan nilai temperatur menggunakan sinar infra merah.

Nilai temperatur yang direkam menggunakan *infrared thermometer* dihubungkan dengan nilai waktu pembebanan arus. Sedangkan kamera perekam melakukan perekaman dari mulai proses awal pembebanan arus hingga selesai. Dari perangkat lunak bawaannya, *infrared thermometer* tersebut sudah mampu mengeluarkan data berupa grafik hubungan antara temperatur dengan waktu. Hal yang perlu dilakukan dalam pengamatan adalah inisiasi nilai temperatur dan waktu dimana muncul atau terjadinya asap pertama kali pada titik penyambungan. Proses inisiasi tersebut dilakukan dengan melakukan pencatatan pada buku.

3.3.3 Tahap pengolahan data

Dalam melakukan pengolahan data, terlebih dahulu data video rekaman diubah (*transducer*) ke dalam format yang bisa mendukung proses pengolahan citra dengan bahasa pemrograman. Untuk data nilai temperatur terhadap waktu bisa langsung diolah dan dirubah menjadi grafik. Pada saat tahap inilah akan dilakukan analisa guna mencari korelasi yang jelas antara kenaikan temperatur yang dipengaruhi oleh kenaikan arus listrik dengan nilai/jumlah asap yang

dihasilkan guna mendapatkan parameter-parameter, bisa berupa angka atau grafik, yang bisa dijadikan metode masukan pada bahasa pemrograman. Nilai-nilai yang didapatkan bukanlah merupakan nilai dengan faktor mutlak benar, namun bersifat subjektif dari pihak pengamat pada saat melakukan penelitian.

Data kenaikan temperatur hasil dari pembebanan arus dibedakan berdasarkan variasi pembebanan yang diberikan. Berikut ini adalah grafik hasil percobaan dengan menggunakan kabel NYA 2.5 mm² yang dialiri arus sebesar 25 A, 32 A, 35 A, 42 A, 47 A, dan 64 A. Seperti informasi yang terdapat pada tabel 3.1, kabel jenis NYA 2.5 mm² memiliki batas nilai arus maksimal pada lingkungan terbuka dengan kisaran temperatur 30 °C adalah 32 A.

Pemilihan kisaran variasi pembebanan arus ini dilakukan untuk mendapatkan representasi kenaikan temperatur maksimal pada arus yang lebih tinggi maupun lebih rendah lagi. Data temperatur yang didapat diolah menggunakan Microsoft Excel 2007 untuk mendapatkan grafik temperatur ini dan memudahkan untuk pengolahan data selanjutnya yang menyertakan temperatur.

Untuk data hasil rekaman video, dilakukan beberapa tahapan penting untuk mendapatkan hasil yang bisa dilakukan sebagai bagian dari penganalisaan. Tahapan tersebut dijelaskan pada uraian di bawah ini:

Pemecahan video

Video yang didapatkan dari percobaan akan dipecah menjadi frame-frame yang merepresentasikan visualisasi dari setiap detik dari percobaan yang dilakukan. Pemecahan video ini ditujukan untuk mendapatkan visualisasi dari kejadian penelitian pada setiap detiknya. Hal ini sangat penting karena pada bagian analisa, akan dibutuhkan waktu awal munculnya asap secara visual dari gerakan asap untuk setiap detiknya pada setiap frame.

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



Gambar 3.10 Tampilan Software Club Video Decompiler®

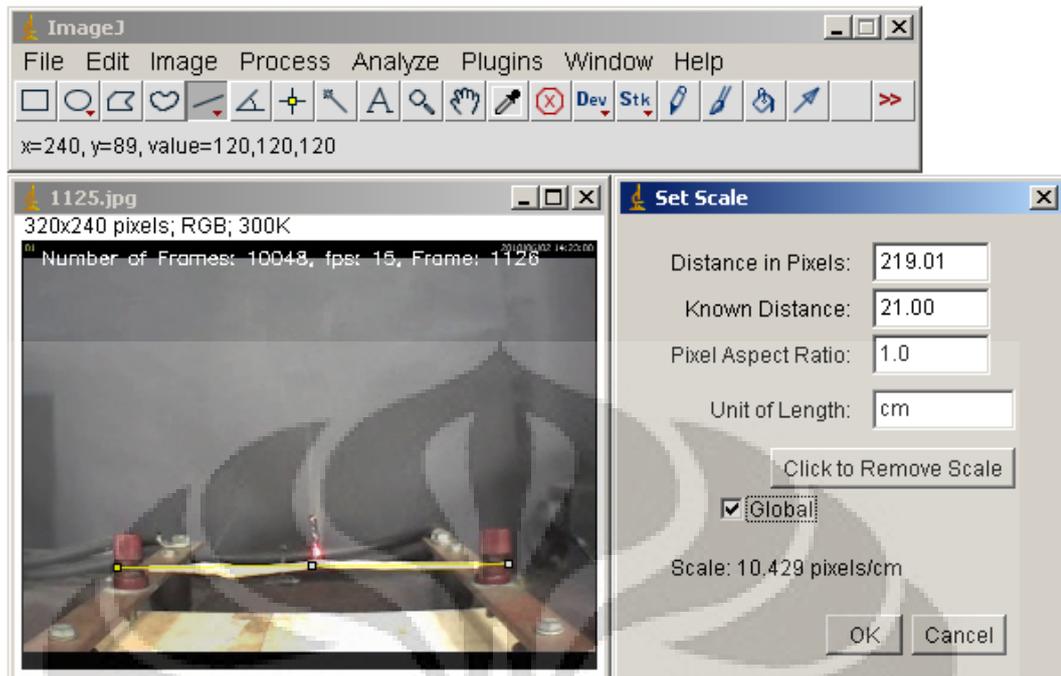
Penghitungan luas asap dengan ImageJ

Pada pengembangannya, sistem pendeteksian dari *video smoke detector* adalah berbasis pada region atau objek yang bergerak. Objek yang dimaksudkan disini adalah luas asap. Pada bab sebelumnya telah dimengerti bahwa klasifikasi asap yang disebut berbahaya masih berdasarkan tiga hal, yaitu besarnya luasan asap, arah asap dan kecepatannya.

Berdasarkan dari penjelasan tersebut, sangat penting untuk menghitung nilai luas dari asap dan kemudian mencari korelasi antara luasan asap dengan fenomena dari pirolisis yang terjadi pada kabel.

Untuk menghitung luas dari blob maupun dari frame video yang sudah dipecah, digunakan perangkat lunak ImageJ®. Perangkat lunak ini dipilih karena merupakan perangkat gratis dan juga mudah digunakan.

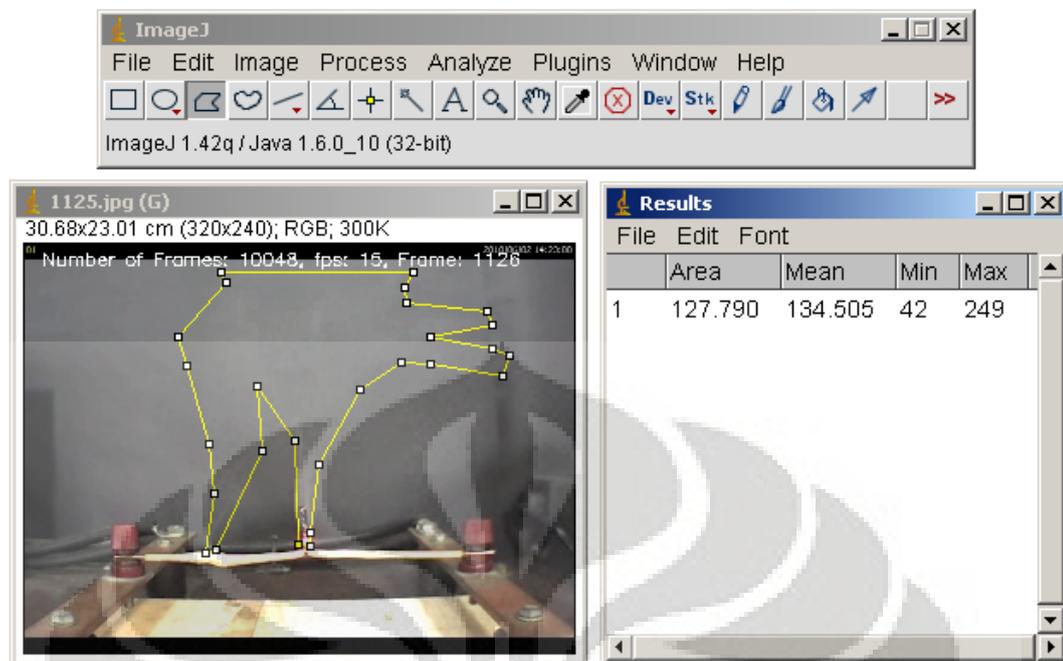
Proses perhitungannya dimulai dari mencari perbandingan dari pixel dengan jarak asli. Fitur dari perangkat lunak ini memungkinkan kita melakukan kalibrasi terhadap jarak asli.



Gambar 3.11 Penentuan skala pada perangkat lunak ImageJ®.

Pada hasil pengkalibrasian, didapatkan skala pixel per cm. Ketika jarak yang diketahui dalam satuan pixel di citra gambar terukur, maka jarak asli dapat di input ke dalam perhitungan. Hasil perhitungan dilakukan dengan cara perbandingan antara jarak pixel dengan jarak asli. Pada gambar di atas diketahui bahwa skalanya adalah 10,429 pixels/cm.

Setelah ukuran yang telah dikalibrasi didapat, perhitungan luasan dari asap dimulai. Proses penghitungan ini kemudian diulang terus menerus untuk frame dari waktu yang berbeda sehingga didapatkan gambaran dari luasnya asap pada waktu percobaan.



Gambar 3.12 Perhitungan luas asap pada perangkat lunak ImageJ®.

Hasil dari penghitungan keseluruhan dari satu video percobaan kemudian dibuat grafik dan dianalisis baik luas maupun kejadian yang mempengaruhi luasnya asap tersebut. Seperti yang telah dijelaskan pada pengantar subbab ini, nilai-nilai yang didapatkan bukanlah merupakan nilai dengan faktor mutlak benar, namun bersifat benar secara subjektif dari pihak pengamat pada saat melakukan penelitian.

Pendeteksian video dengan video smoke detector

Masih dengan video yang sama, dilakukan proses pencitraan gambar pada tiap video yang diambil pada saat percobaan. Ini adalah bagian yang paling penting karena pada proses inilah kemampuan program bahasa pemrograman yang dikembangkan ini diuji. Bagian paling awal dari tahap ini adalah mengatur beberapa nilai *threshold* dari pendeteksian. Hal ini penting karena *threshold* yang tinggi dapat menyebabkan luas asap yang terlihat secara visual tidak dapat dideteksi. *Threshold* yang terlalu rendah juga dapat menyebabkan kesalahan pendeteksian.

Dalam hal ini, pengaturan disesuaikan dengan apa yang telah dikerjakan oleh Suwarno (2010) [6]. Pada sistem yang dikembangkan ini, digunakan Microsoft Visual Studio 2005 untuk melakukan pemrograman dan juga melakukan proses eksekusi (*debugging*) pada program. Setelah dieksekusi, dilakukan pengestraksian gambar tiap frame pada setiap detiknya dan juga luas bolb hasil deteksi dalam satuan piksel. Hal ini ditujukan agar hasil luasan yang merupakan output dari pendeteksian dapat diukur.



Gambar 3.13 (a) Frame dan (b) blob hasil pengolahan dengan *video smoke detector* (Suwarno, 2010).

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

Bab ini berisi data-data hasil penelitian, perhitungan data-data, grafik, serta analisis mengenai hasil yang diperoleh. Bagian ini juga membahas data-data yang terkumpul dari kegiatan eksperimen. Dari data yang diperoleh tersebut kemudian dianalisa untuk mendapat sebuah kesimpulan sesuai dengan tujuan yang telah dicantumkan.

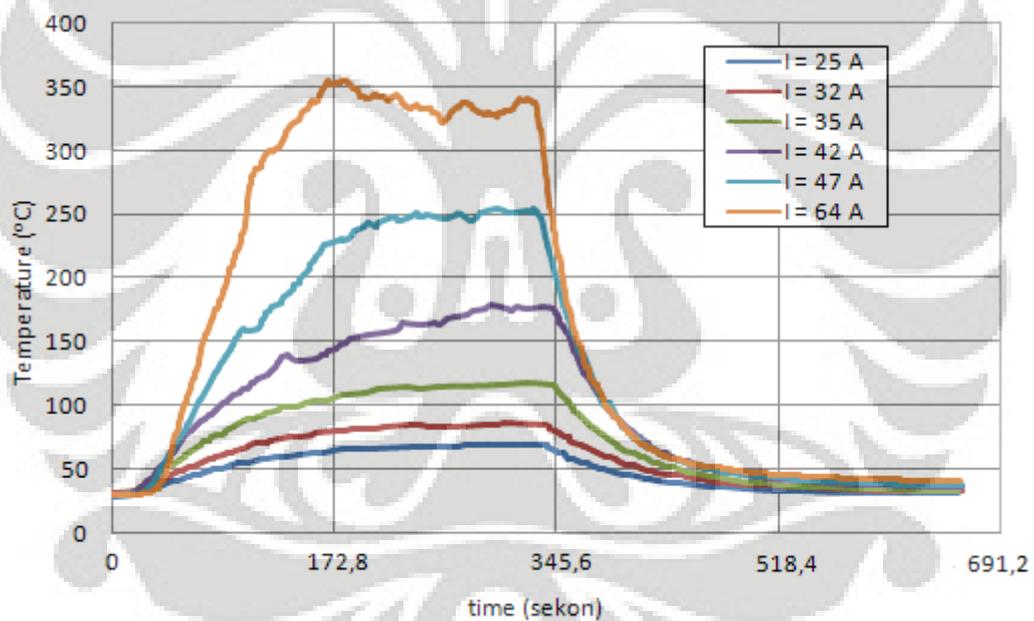
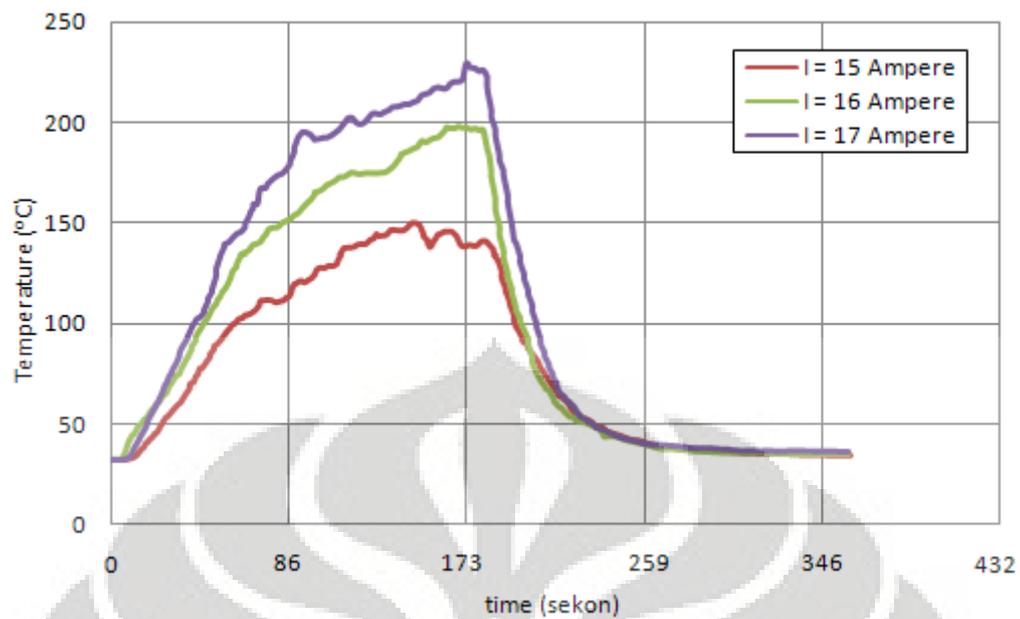
Dalam melakukan percobaan, dilakukan beberapa variasi pembebanan arus untuk kabel NYA 2,5 mm². Pada dasarnya, percobaan ini ditujukan untuk mendapatkan fenomena kemunculan asap dalam rangka menghasilkan sumber kebakaran akibat pembebanan arus tadi. Beberapa hal yang telah dilakukan dalam penelitian ini antara lain:

1. Melakukan variasi jenis kabel (diameter) pada pembebanan arus listrik.
2. Melakukan variasi pembebanan arus pada kabel penghantar.
3. Melakukan pengukuran temperatur pada sambungan ketika dilakukan pembebanan arus.
4. Melakukan inisiasi terhadap waktu dan temperatur saat terjadinya kemunculan asap dan pada arus berapa asap akan muncul paling banyak.
5. Melakukan pengujian SEM terhadap isolator badan kabel hasil uji yang dialiri arus berlebih dan membandingkannya dengan kabel yang dibakar dari luar kemudian memahami fenomenanya.

Pada saat melakukan variasi penggunaan isolator dalam penelitian ini, hanya dilakukan dua hal yakni, dengan atau tanpa isolator penutup sambungan.

4.1 Grafik Temperatur dengan Waktu

Berikut ini adalah grafik hasil percobaan. Kabel jenis NYA 1.5 mm² dan 2.5 mm² memiliki batas nilai arus maksimal pada lingkungan terbuka dengan kisaran temperatur 30 °C adalah 12 A dan 32 A.

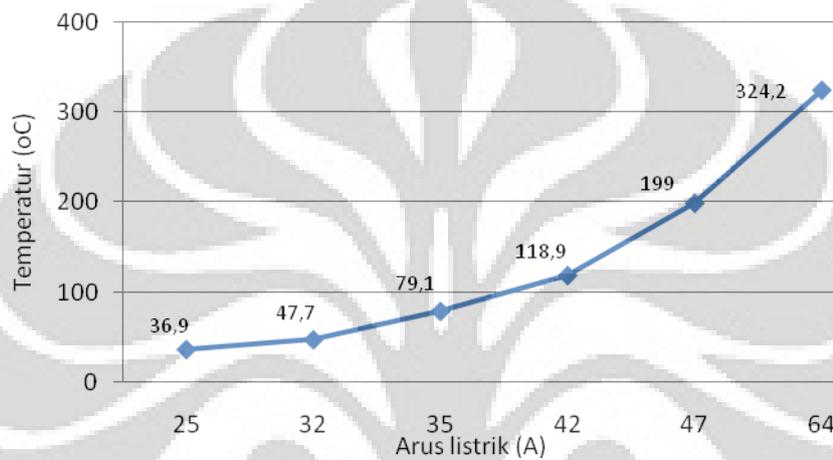


Gambar 4.1 Grafik hasil percobaan pembebanan arus untuk kabel NYA 1.5 mm²(atas) dan 2.5 mm² (bawah).

Waktu yang diberikan untuk melakukan percobaan pada kabel adalah selama 6 menit untuk kabel NYA 1.5 mm² dan 11 menit untuk NYA 2.5 mm², dimana untuk paruh menit pertama dilakukan pembebanan arus listrik dan kemudian di sisa menit berikutnya pembebanan arus dihentikan. Aturan ini berlaku untuk pada setiap jenis skenario percobaan (pada variasi pembebanan arus). Penentuan tetapan batasan waktu ini dilakukan dengan menggunakan

metode *trial and error*. Waktu tersebut menjadi waktu ideal untuk melakukan percobaan pembebanan arus berlebih pada kabel karena pada paruh menit pertama waktu pembebanan arus cukup menggambarkan terjadinya peristiwa termal dan kestabilan temperatur apabila telah terjadi peristiwa munculnya asap akibat pyrolisis.

Ternyata berdasarkan data tersebut, terdapat hubungan yang searah terhadap kenaikan temperatur (ΔT) berdasarkan pembebanan arus listrik.



Gambar 4.2. Grafik kenaikan temperatur berdasarkan kenaikan arus untuk kabel pada $t=180$ sekon untuk NYA 2.5 mm^2 .

Asap muncul pada percobaan dimulai ketika temperatur mencapai titik dimana pirolisis terjadi. Walaupun pada bahan PVC sambungan kabel (selotip) tidak setebal PVC badan penghantar kabel, namun untuk memudahkan analisis, lilitan sebanyak 3 kali material PVC (selotip) dianggap sama. Ketebalan PVC pada badan penghantar kabel adalah $0,8 \text{ mm}$ (lihat Tabel 3.1).

Pada saat melakukan penelitian, ketika pada suatu tingkat telah terjadi suatu kestabilan temperatur, arus listrik sengaja dihentikan dengan batasan waktu yang telah dijelaskan sebelumnya. Sebenarnya, pada saat terjadi kestabilan temperatur pun, nilai arus yang melewati kabel tersebut justru mengalami ketidakstabilan. Hal tersebut diketahui oleh peneliti pada saat sedang melakukan pengambilan data. Peristiwa tersebut dapat dilihat pada Grafik 4.1 pada kestabilan temperatur di arus 64 A , yang mana terlihat mengalami ketidakstabilan nilai dan cenderung untuk turun.

Perhatikan persamaan di bawah ini.

$$R_t = R_o(1 + \alpha(T_t - T_o))$$

Berdasarkan pada persamaan di atas, nilai tahanan listrik dipengaruhi oleh kenaikan temperatur yang menjadi penyebab utama menurunnya kemampuan hantar arus (KHA) sebuah konduktor penghantar listrik. Sebagaimana diketahui, kemampuan arus untuk bisa dihantarkan berbanding terbalik dengan hambatannya. Semakin besar hambatan yang dimiliki oleh sebuah penghantar maka semakin kecil arus yang bisa dilewatinya.

Pemanasan yang diakibatkan adanya arus listrik dalam penghantar kabel akan menimbulkan perubahan pada penghantar kabel itu sendiri. Perubahan tersebut terjadi karena adanya kenaikan temperatur yang secara ekstrim pada suatu bahan maka akan menyebabkan perubahan susunan atom yang bisa mengakibatkan pencairan material penghantar panas dan untuk melakukan pengaturan kembali susunan atom-atom yang diakibatkan oleh perubahan temperatur akan menyebabkan daya hantar panas terganggu.

Tabel 4.2 Nilai-nilai yang terdapat pada sebuah penghantar kabel.

Variable	Value copper	insulator	Dimension
Heat conductivity	379	0.16	W/Km
Density	1180	1400	kg/m ³
Specific heat capacity	1800	1500	J/kgK
Thermal diffusivity	103	0.076	mm ² /s
K	1.6		
h	20		W/Km ²
Resistivity	18.3	NA ¹⁾	nΩm
Biot number Bi	0.14		

¹⁾ NA=not applicable

Pengukuran temperatur dilakukan dengan IR Thermometer pada permukaan terluar isolator. Pada bagian inilah terjadi peristiwa konveksi pelepasan kalor hasil konduksi inti kabel ke bagian isolator. Temperatur yang terukur dan terekam dalam grafik bukanlah temperatur inti permukaan kabel, melainkan temperatur hasil konveksi energi panas ke udara sekitar.

Jika dilihat kabel penghantar sebuah sebuah kontrol volum dan di dalamnya terdapat sebuah kesetimbangan termal, maka energi panas yang keluar berdasarkan persamaan yang dimuat dalam [25] dan penjelasan pada rumus (2.11) mengenai kesetimbangan energi, energi yang mengalir keluar E_{out} akan semakin besar dan nilai temperatur yang terukur akan semakin tinggi. Berdasarkan persamaan (2.12) dimana terjadi pembangkitan energi berdasarkan pemanasan akibat adanya resistensi elektrik. Resistensi elektrik bergantung pada material penghantar kabel.

$$E_g = I^2 R_e^l L$$

Semakin besar nilai arus yang diberikan, maka semakin besar pula energi yang dihasilkan. Semakin besar energi yang dihasilkan maka akan semakin besar pula gradient temperaturnya.

Nilai tahanan sebuah sambungan kabel akan semakin besar apabila luasan kontakannya juga semakin besar. Hal tersebut dikarenakan bentuk jalinan/puntiran kabel. Biasanya kabel penghantar tanpa dipuntir menyentuh permukaan dalam isolator seluas A, maka puntiran kabel yang diselubungi isolator akan memiliki luasan penampang $2A$. Berikut ini persamaan tahanan listrik berdasarkan luas penampang adalah pada persamaan 2.34 sebelumnya:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

Hubungan yang terjadi secara keseluruhan pada pemanasan berlebih pada kabel digambarkan melalui sebuah fenomena perpindahan kalor.

$$E_{in} = E_{out}$$

$$I^2 R_e^l L = h(\pi DL)(T_{oc1} - T_{oc2}) + \frac{2\pi k k (T_{s1} - T_{s2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

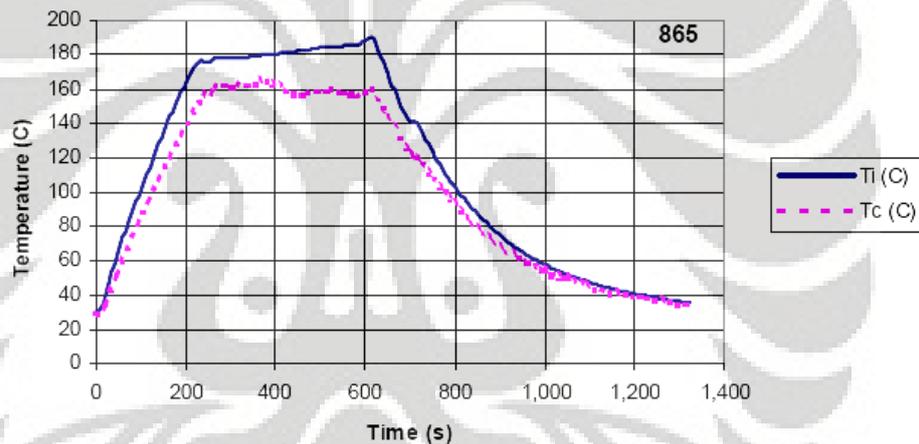
$$I^2 R_e^l = h(\pi D)(T_{oc1} - T_{oc2}) + \frac{2\pi k (T_{s1} - T_{s2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

Berdasarkan persamaan di atas, ternyata nilai kalor dan kenaikan temperatur sangat dipengaruhi oleh nilai arus yang diberikan pada penghantar kabel.

Dan untuk terjadinya sebuah peristiwa pirolisis, berdasarkan sifat material penghantar kabel, terdapat nilai termal inersia yang juga mempengaruhi laju pirolisis.

$$\sigma = k \rho c$$

Ternyata grafik hasil penelitian ini sesuai dengan grafik hasil percobaan yang dilakukan oleh Rahkonen *et al* (1999), dimana dilakukan juga proses pemanasan berlebih pada sebuah penghantar kabel.



Gambar 4.3 Grafik hasil percobaan pemanasan kabel oleh Rahkonen *et al* (1999).

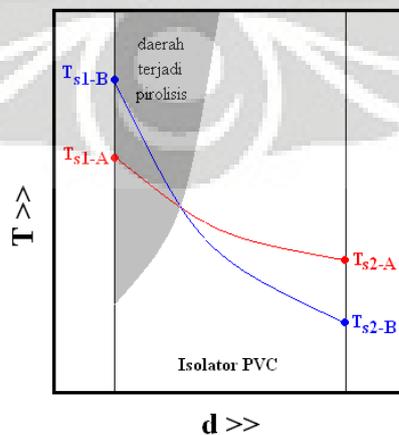
4.2 Peristiwa Kemunculan Asap

Pada setiap pembebanan arus listrik, kecuali untuk arus 25 A dan 32 A dimana tidak terjadi kemunculan asap, asap muncul pada kisaran temperatur yang hampir sama, bahkan cenderung menurun untuk level arus yang lebih besar. Berikut ini merupakan tabel hasil pengamatan dalam melakukan inisiasi kemunculan asap pada kabel yang dilihat dari hasil video percobaan.

Tabel 4.3 Detail peristiwa kemunculan asap

Jenis Kabel	Arus (A)	Tawal (°C)	Kemunculan Asap	
			t (s)	T (°C)
NYA 1.5 mm ²	15	32,6	45,4	81,2
	16	32,8	35,0	79,6
	17	32,6	29,7	78,1
NYA 2.5 mm ²	35	29,8	120,0	94,0
	42	30,2	61,0	80,7
	47	30,4	56,0	80,3
	64	30,0	39,0	41,2

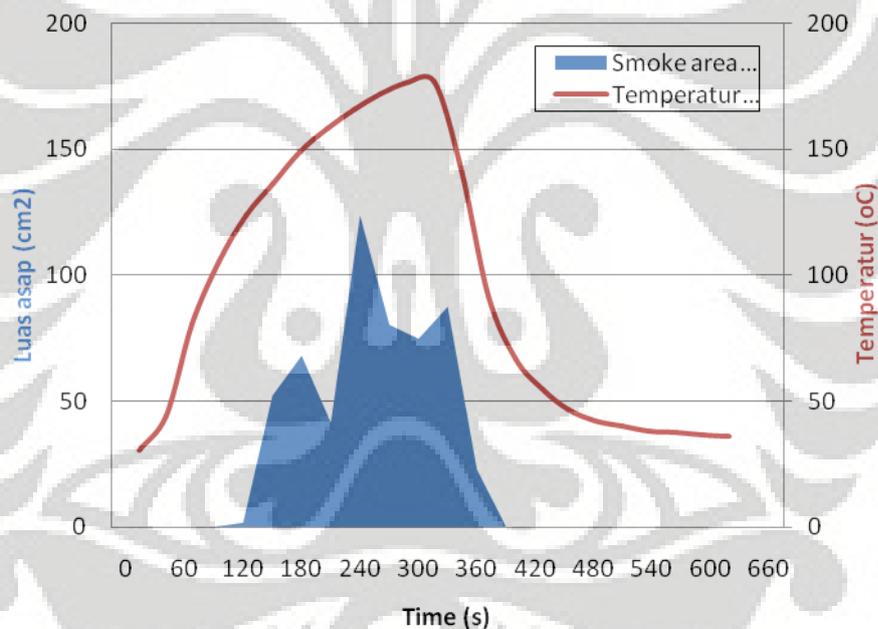
Ada beberapa alasan mengapa hal yang demikian bisa terjadi. Alasan yang paling bisa mewakili adalah adanya sifat isolator yang diperankan oleh PVC. Sebelumnya, nilai energi panas yang bisa dihasilkan melalui adanya pemberian arus listrik bisa diekspresikan dengan persamaan (2.12). Secara logika, apabila terdapat energi yang besar maka terdapat pula temperatur yang tinggi terhadap material uji yang sama. Pada saat munculnya panas akibat adanya arus listrik yang mengalir, kondisi dalam penghantar kabel yang menyentuh permukaan dalam isolator PVC mendekati kondisi adiabatik, dimana tidak ada pengaruh energi luar yang memasuki sistem. Pada kondisi ini, sesuai dengan hukum konservasi energi, kalor tersebut terkonduksi melalui material PVC yang bersifat tahan panas (isolator). Bisa dikatakan dalam kondisi ini terjadi *delay* karena adanya kemampuan isolator tersebut. Untuk lebih lebih jelasnya dapat melihat ilustrasi di bawah ini ($I_A < I_B$).



Gambar 4.4 Visualisasi terjadinya pirolisis pada isolator PVC kabel

Pada saat energi yang lebih besar akibat arus yang lebih besar pula dikonduksikan, temperatur permukaan sentuh (T_{s1}) sebenarnya sudah mencapai temperatur pirolisis (T_{pr}). Namun, karena kemampuan isolator PVC menahan kalor, maka temperatur permukaan bagian luar (T_{s2}) tidak setinggi di permukaan dalam permukaan sentuh isolator dengan inti kabel. Itulah yang menyebabkan data-data pada Tabel 4.3 bisa terjadi.

Berikut ini adalah tampilan grafik hubungan antara kenaikan arus dan jumlah luasan asap yang muncul terhadap perubahan waktu dan variasi beban arus listrik. Untuk penyederhanaan pembahasan, maka data-data yang ditampilkan disini adalah data hasil percobaan pada pembebaana arus sebesar 42 A untuk kabel NYA 2.5 mm².



Gambar 4.4 Grafik antara temperatur, waktu, dan jumlah asap pada arus 42 A.

Jumlah hasil luasan asap ini didapatkan berdasarkan perhitungan dengan bantuan perangkat lunak ImageJ. Memang patut disadari bahwa nilai yang disajikan adalah berdasarkan penilaian subyektif, namun hal ini dilakukan oleh peneliti dengan ketelitian tingkat tinggi terhadap persepsi yang disamakan oleh rekan kerja peneliti mengenai bahaya asap yang muncul jika dikaitkan dengan luasan asap itu sendiri.

Asap yang muncul pada peristiwa dalam penelitian ini diakibatkan adanya peristiwa pyrolisis. Berdasarkan Walton dan Thomas (1995) [22], laju atau tingkat pirolisis dan tingkat pelepasan energi (*energy release rate*) dihasilkan karena hanya oleh hasil pembakaran bahan bakar itu sendiri dan bukan karena adanya faktor batasan pada ruangan tempat terjadinya peristiwa pyrolisis.

Pada peristiwa munculnya asap untuk penelitian kebakaran kabel ini, disebabkan hanya oleh faktor energi termal yang terkandung oleh bahan penghantar akibat adanya kelebihan beban yang mengakibatkan kenaikan temperatur sampai dimana tercapainya temperatur untuk isolator mengalami pyrolisis. Jadi, memang dibuat secara sengaja oleh peneliti, dalam hal ini untuk memunculkan asap pada sambungan kabel yang dilapisi oleh isolator karet berbahan PVC.



Gambar 4.5 Asap muncul pada sambungan kabel NYA 2.5 mm² yang dialiri arus 42 A pada frame 2101.

Asap yang muncul pada sambungan kabel memang disengaja untuk dibuat. Asap bisa muncul pada sambungan ini karena kenaikan temperatur pada titik ini lebih cepat mengalami peningkatan dibanding pada badan penghantar kabel lainnya. Sesuai dengan pembahasan pada landasan teori sebelumnya, diketahui bahwa yang mempengaruhi hal tersebut adalah kapasitansi dari kabel. Berdasarkan persamaan (2.34), ada penambahan luas penampang kabel karena adanya penyambungan kabel melalui jalinan puntiran sambungan. Ketika secara penampang luasannya bertambah, maka nilai tahanan listriknnya juga bertambah. Pada saat tahanan bertambah, karena tahanan berbanding lurus dengan energi yang dihasilkan, maka temperatur yang dihasilkan pun akan lebih tinggi. Temperatur yang lebih tinggi tersebut menghasilkan fenomena pirolisis terlebih dahulu pada sambungan kabel.

Selain dari sisi luasan penampang yang bertambah, terdapat celah udara pada sambungan inti kabel yang secara mikroskopis dapat terlihat. Celah udara ini berubah sifat menjadi dielektrik atau dapat menghantarkan listrik. Walaupun terdapat faktor kapasitansi yang membuat celah udara berubah sifat, yang mempengaruhi timbulnya asap pada sambungan kabel adalah adanya *heat loss* yang mengalir ke PVC akibat adanya kapasitansi [4].

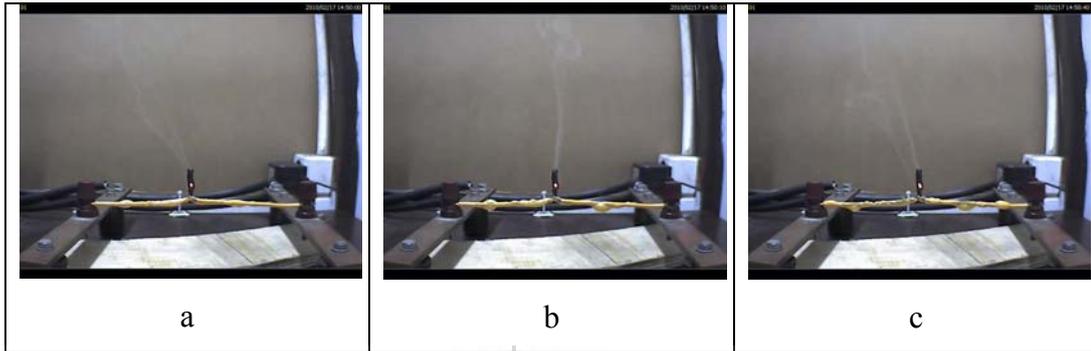


Gambar 4.6 Citra termal dari sambungan kabel NYA 1.5 mm² yang dialiri arus 90 A [4].

Bentuk grafik luas asap terhadap waktu memiliki nilai yang tidak homogen. Hal tersebut mendeskripsikan adanya faktor kenaikan temperatur membutuhkan waktu dan sangat mempengaruhi untuk jumlah produksi asap. Seperti pada penjelasan munculnya asap pada sambungan kabel, isolator pada badan penghantar kabel juga memiliki sifat yang sama. Terdapat celah udara pada isolator penghantar kabel. Ketika terjadi sebuah peristiwa pemanasan lokal pada permukaan inti kabel yang bersinggungan dengan permukaan dalam isolator kabel, energi panas tersebut membuat volatile-volatile hidrokarbon menguap habis. Hal tersebut dapat terlihat pada badan-badan isolator kabel yang menjadi menggelembung seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.7 Gelembung udara pada pemanasan lokal permukaan dalam isolator kabel.

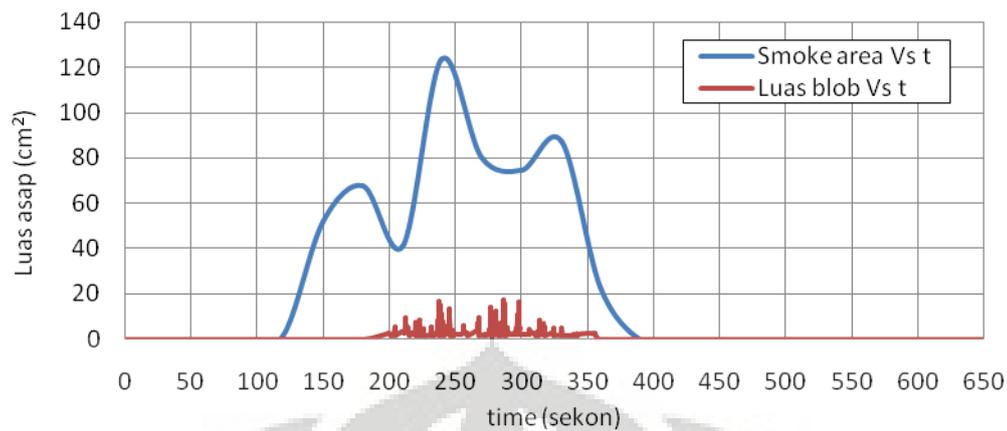


Gambar 4.8 Rangkaian frame pada penambahan jumlah asap dari gelembung isolator.

Rangkaian frame di atas terjadi pada frame 2251 (a), 2401 (b), dan 2851 (c). Terlihat pada frame a, gelembung isolator mulai terjadi pada sepanjang badan kabel dan terlihat ukurannya menjadi maksimum pada frame b. Kemudian pada frame c, gelembung isolator mulai menghasilkan asap. Asap tersebut keluar dari lubang yang dihasilkan pada kebocoran gelembung isolator. Secara umum pertambahan nilai asap terhadap kenaikan temperatur berlangsung secara linier. Semakin nilai temperatur bertambah maka akan bertambah pula luas asap yang dihasilkan. Pada kondisi ini, satu dari tiga komponen keperluan terjadinya proses pembakaran tidak terpenuhi, maka dari itu sistem tersebut secara alami karena adanya energi panas yang dihasilkan kemudian melakukan *thermal cracking* untuk bisa mengikat oksigen yang ada di lingkungan. Secara makroskopis, efek dari *thermal cracking* dalam percobaan ini adalah timbulnya asap dan penggelembungan akibat adanya pemutusan rantai-rantai polimer PVC.

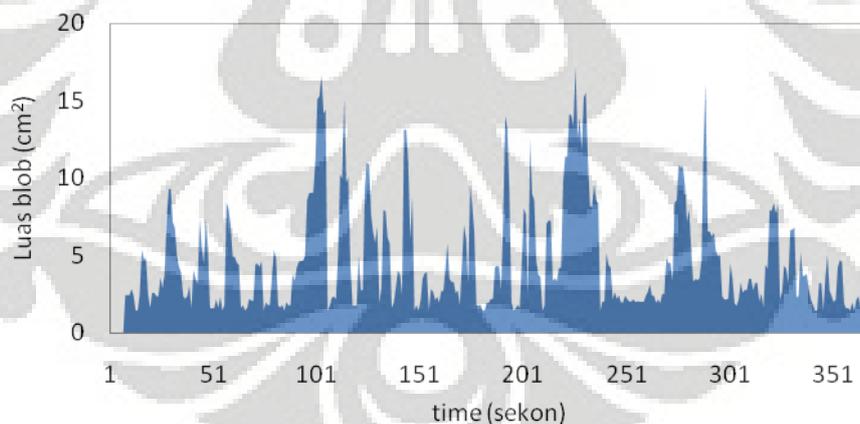
4.3 Hubungan Luas Asap terhadap *Image Processing*

Berikut ini merupakan grafik data hubungan nilai luas asap yang dihitung dengan perangkat lunak dari sudut pandang peneliti dibandingkan dengan luas blob hasil pengolahan image processing berdasarkan pertambahan waktu. Terlihat bahwa nilai luas asap yang terdeteksi sebagai blob dalam kategori asap yang terdeteksi (*smoke detected*) jauh lebih kecil nilainya jika dibandingkan dengan luas asap sebenarnya yang terukur secara manual.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan luas asap dengan luas asap yang terdeteksi sebagai blob.

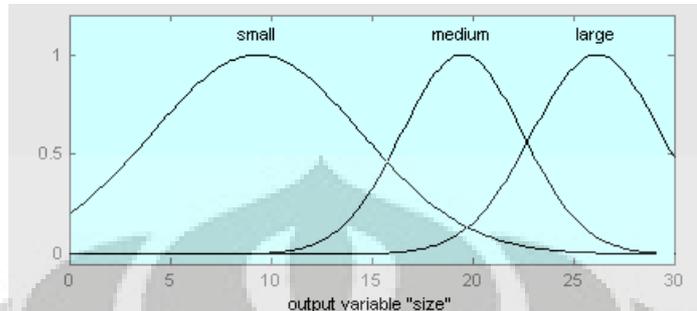
Nilai asap yang disajikan dalam tabel tersebut merupakan hasil asap dari percobaan kabel NYA 2.5 mm² dengan beban arus 42 A. Berbagai faktor menyebabkan asap yang terdeteksi sebagai asap blob menjadi tidak sebesar asap yang dihasilkan. Parameter-parameter yang digunakan dalam logika Adaptive Gaussian Mixture Model untuk mencegah adanya *false alarm*. Dalam pemrograman ini, yang menjadi dasar parameter deteksi saat ini adalah nilai luasan asap berdasarkan dalam satuan pixel.



Gambar 4.10 Grafik perbandingan luas asap dengan luas asap yang terdeteksi sebagai blob.

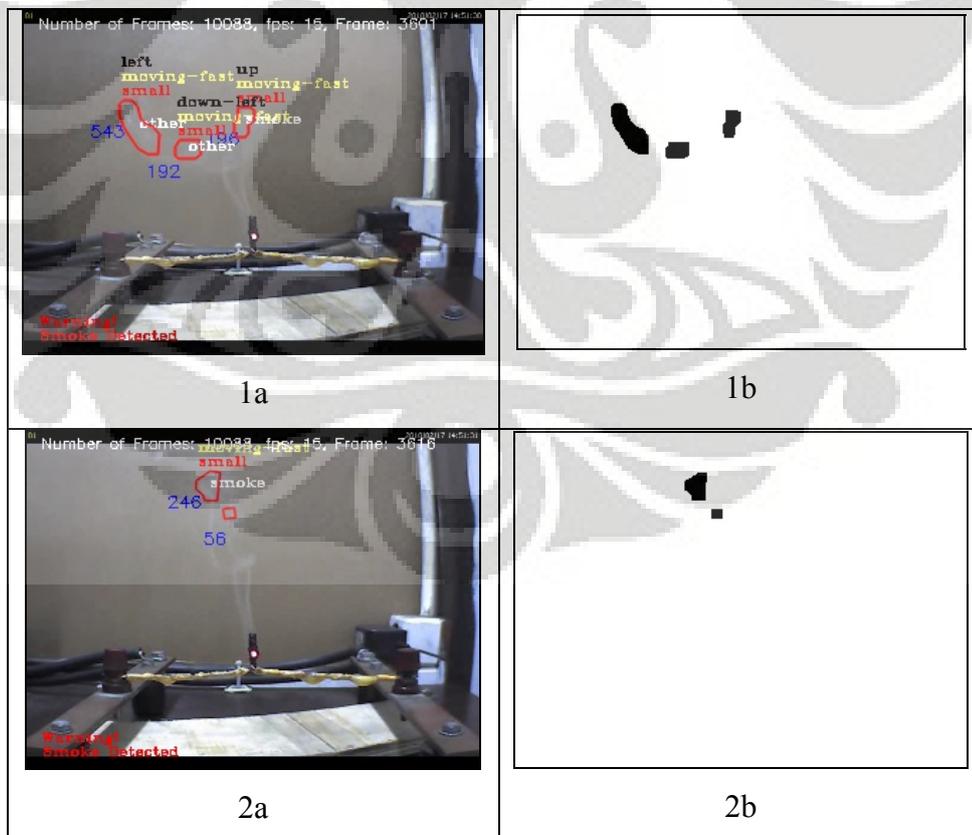
Sebagai parameter umum pendeteksian, digunakan faktor luas sebagai batasan suatu jumlah threshold objek asap yang sedang bergerak. Dalam sistem fuzzy yang dikembangkan oleh Suwarno (2010) terdapat tiga kriteria yang menentukan tingkat bahaya asap, yakni luas (asap), arah, dan kecepatan. Dalam logika fuzzy mengenai luas, dibagi pula menjadi beberapa kriteria luasan yang

bisa dilihat pada gambar di bawah ini. Sebelum mendapat output seperti ini masih terdapat tiga variabel yang telah dikembangkan oleh Suwarno (2010), seperti area, rasio dan jarak.



Gambar 4.11 Logika fuzzy untuk variabel *size*

Beberapa hasil pengolahan citra menunjukkan bahwa ada asap yang tidak terdeteksi sebagai asap, hal itu sangat wajar karena aturan fuzzy tidak membuat semua yang bergerak pada background menjadi asap (blob). Perhatikan rangkaian gambar di bawah ini.



Gambar 4.12 Rangkaian gambar hasil deteksi

Rangkaian gambar antara frame 1a dengan 2a terjadi kurang dari satu milisekon. Frame tersebut diekstrak dari video pembebanan kabel NYA 2.5 mm² dengan 42 Ampere. Sangat berbeda hasil dari deteksi blob yang dilakukan. Jika diperhatikan, luas asap pada frame 1a cukup luas jika dibandingkan dengan pada frame 2b. Hal ini menunjukkan bahwa program yang dijalankan cukup *reliable*.

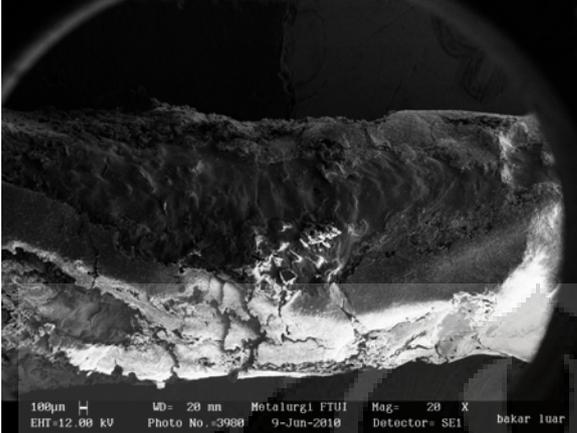
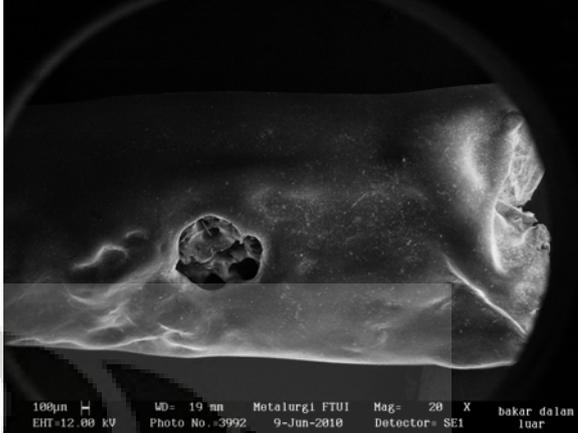
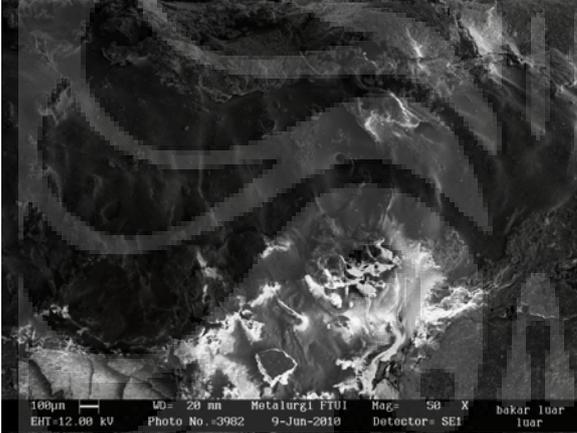
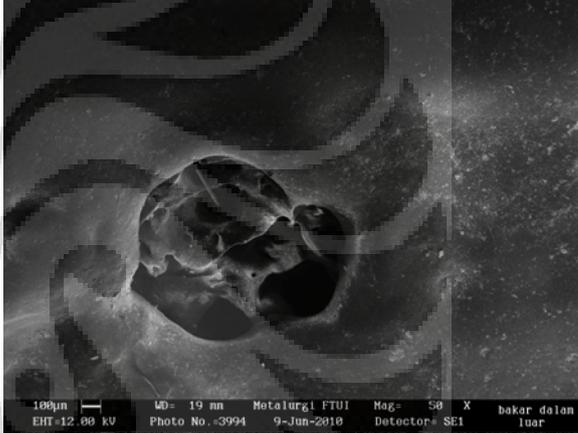
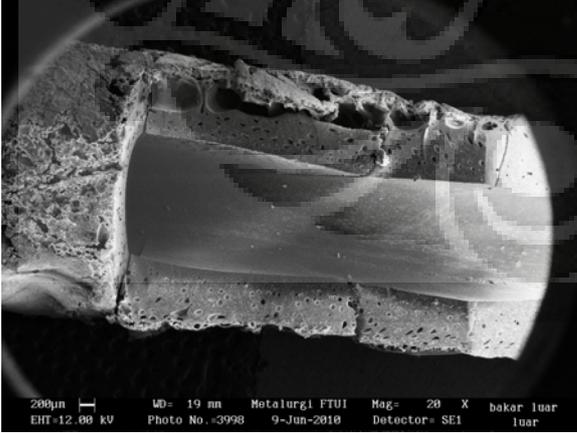
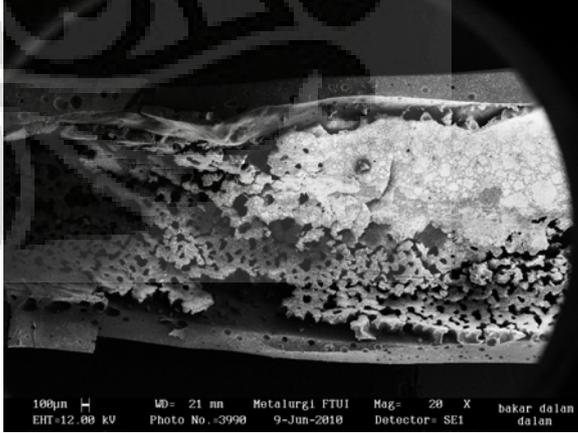
4.4 Hasil Uji SEM pada Isolator Penghantar Kabel

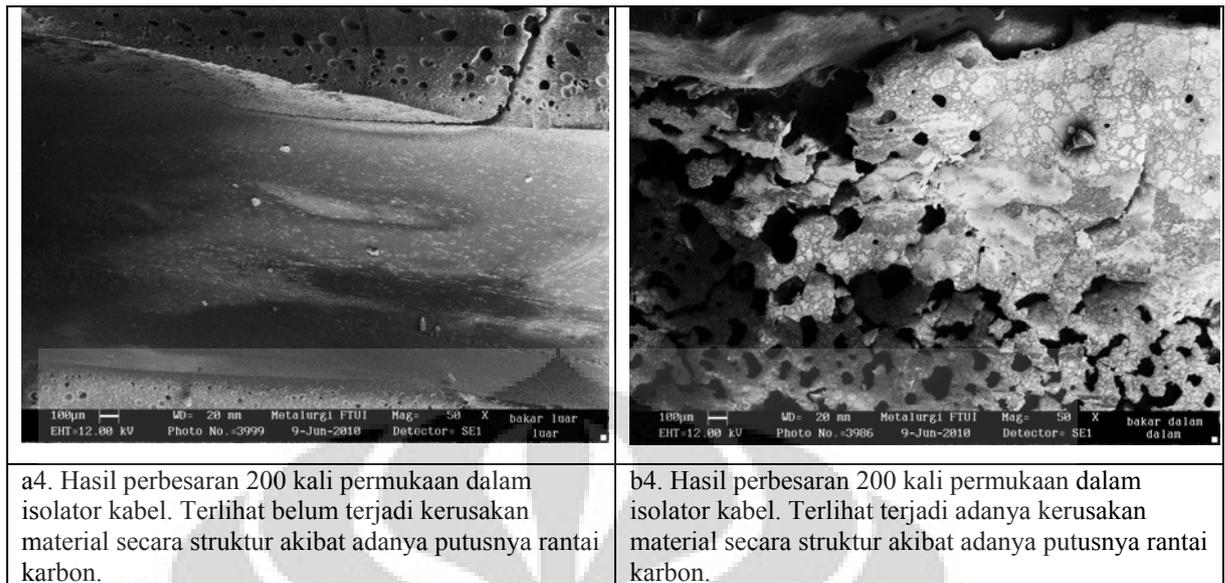
Beberapa isolator sampel kabel uji penelitian ini diuji kembali dengan secara mikroskopis melalui pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada Laboratorium CMPFA (*Centre for Materials Processing and Failure Analysis*) di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia yang dilakukan pada 9 Juni 2010.

Ada dua skenario yang diujikan dalam pengujian SEM ini, yaitu isolator kabel hasil percobaan yang disebut dengan hasil pemanasan dalam (*internal heating*) dan isolator kabel yang sengaja dibakar dari luar atau disini disebut dengan pemanasan luar (*external heating*). Tujuan dari perbandingan pengujian hasil SEM ini adalah ingin menjawab salah satu tujuan penelitian mengenai apakah kabel listrik menjadi korban atau menjadi penyebab dalam sebuah peristiwa kebakaran yang diakibatkan oleh listrik.

Sebagai pengantar, setiap material yang mengalami dan melepaskan energi pada tahap reaksi pembakaran maupun pemanasan akan mengalami sebuah kerusakan struktur yang secara makroskopis dan mikroskopis dapat terlihat. Oleh karena itu, dilakukan pemanfaatan dalam hal tersebut untuk bisa memberikan gambaran mengenai perbedaan hasil antara sebuah metode pembakaran/pemanasan.

Berikut ini adalah rangkaian hasil foto SEM untuk isolator badan kabel yang mengalami dua jenis teknik pembakaran.

External heating	Internal heating
	
<p>a1. Hasil perbesaran 20 kali pada permukaan luar isolator kabel yang mengalami kontak langsung dengan api.</p>	<p>b1. Hasil perbesaran 20 kali pada permukaan luar isolator kabel yang tidak mengalami kontak langsung dengan api.</p>
	
<p>a2. Hasil perbesaran 50 kali pada permukaan isolator kabel. Terlihat perbedaan struktur yang sangat hancur,</p>	<p>b2. Hasil perbesaran 50 kali pada permukaan isolator kabel. Terlihat permukaan masih sedikit halus namun ada beberapa lubang udara.</p>
	
<p>a3. Hasil perbesaran 20 kali permukaan dalam isolator kabel. Terlihat struktur yang sama sekali belum hancur. Berbeda dengan permukaan luarnya pada gambar a1</p>	<p>b4. Hasil perbesaran 20 kali permukaan dalam isolator kabel. Terlihat beberapa struktur dari PVC yang telah rusak karena terlepasnya ikatan-ikatan karbon. Sangat berbeda dengan gambar a3.</p>



Gambar 4.13 Rangkaian foto SEM pada isolator PVC badan kabel listrik.

Seperti yang telah disajikan pada gambar di atas, terlihat beberapa perbedaan yang sangat jelas. Pada isolator kabel hasil pemanasan luar, bahan PVC akan mengalami peluruhan dan terjadi kerusakan struktur. Sedangkan pada isolator hasil pemanasan dalam, yang justru mengalami kerusakan struktur adalah permukaan bagian dalam permukaan isolator PVC kabel. Namun masih tetap berbeda dengan hasil kerusakan struktur hasil pemanasan luar. Hal yang membedakan adalah pada kerusakan struktur hasil pemanasan dalam, terdapat munculnya lubang-lubang yang terjadi akibat pecahnya ikatan struktur karbon PVC yang berubah bentuk menjadi volatile hidrokarbon. Pada sebuah peristiwa pemanasan berlebih di sebuah penghantar kabel, isolator kabel akan menjadi bahan bakar secara terus menerus sampai semua kandungan volatile dalam PVC habis dan yang tersisa adalah sisa-sisa karbon (arang).

Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Adrianus (2007) yang menyampaikan hasil dari suatu penelitian dimana dengan menggunakan kabel PVC dan dialiri oleh arus listrik sampai kabel terbakar (sebagai penyebab), dan menggunakan kabel dan dialiri arus yang normal sesuai dan kemudian dibakar. Kemudian hasil potongan hasil percobaan ini dilihat di bawah SEM dan dapat dilihat bahwa kabel yang merupakan penyebab memiliki banyak butiran kotak-kotak (lubang) tak beraturan sedangkan pada kabel yang menjadi korban mempunyai sedikit sekali butiran atau hampir tidak ada sama sekali.

BAB V

PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan berdasarkan tujuan penelitian dan hasil yang didapat serta saran-saran untuk kemajuan penelitian berikutnya.

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil data penelitian dan juga hasil analisa pada bab sebelumnya terdapat beberapa kesimpulan yang bisa didapatkan. Sebagai jawaban dari tujuan penelitian ini, maka kesimpulan-kesimpulan tersebut antara lain adalah:

1. Hubungan antara nilai arus dan temperatur serta tahanan listrik menunjukkan hubungan yang searah.
2. Kemunculan asap terjadi pada temperatur yang tidak terlalu tinggi jika diukur dari permukaan isolator kabel.
3. Ternyata penggunaan logaritma *Adaptive Gaussian Mixture Model* sudah tepat dan reliable untuk bisa mendeteksi asap yang muncul.
4. Terdapat perbedaan struktur material yang sangat jelas terhadap dua jenis isolator yang mengalami dua jenis teknik pemanasan. Di satu sisi, hal tersebut dapat dijadikan suatu parameter untuk dapat menentukan dalam sebuah peristiwa kebakaran mengenai posisi kabel listrik sebagai korban ataupun sebagai penyebab.

5.2 SARAN

Ada beberapa hal ingin disampaikan sebagai saran dalam rangka kemajuan dan peningkatan kualitas untuk penelitian dalam bidang ini di masa yang akan

datang. Saran-saran yang diberikan sesuai dengan pengalaman dan pola pikir peneliti setelah melaksanakan percobaan dari awal sampai pada kesimpulan penelitian. Saran-saran yang disampaikan adalah:

1. Ada baiknya jika digunakan pula alat untuk mengukur opasitas dari asap pada penelitian ini.
2. Perlu adanya pematangan teori mengenai sifat dan dinamika asap, seperti opasitas asap, yang sangat mempengaruhi faktor deteksi sebagai acuan dan tingkat bahaya. Asap sebagai partikel dapat bergerak cepat tergantung dari kondisi ambient dan sifat material bahan bakarnya. Hal ini bertujuan untuk lebih mereduksi parameter-parameter masukan dalam bahasa pemrograman untuk bisa 'menangkap' asap sebagai pertanda awal terjadinya sebuah peristiwa kebakaran.
3. Perlu adanya penelitian tambahan atau pengembangan mengenai sistem output sistem deteksi asap ini sebagai fungsi hasil dari pencegahan bahaya kebakaran, seperti alarm, *water mist* atau bahkan *electric fan* untuk ventilasi pada kejadian tipe kebakaran dalam ruangan.

DAFTAR REFERENSI

- [1]. Drysdale, D., (2003) An Introduction to Fire Dynamics: Second Edition. John Wiley and Sons, New York.
- [2]. Almanda, Deni. Penyebab Kebakaran Karena Listrik: Edisi ke Lima Belas, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, Nopember 1998, website: <http://elektroindonesia.com/elektro/ener26.html>, diperoleh Mei 2010.
- [3]. Jakarta Fire Statistics 2000-2009, Jakarta Fire Department, 2009, website: <http://kebakaran.jakarta.go.id/>
- [4]. Adrianus, (2007). Effect of Jointing Types on Cable Fires Potential, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering University of Indonesia, Jakarta.
- [5]. Suwarno, Widyanto, M.R., Nugroho, Y.S., (2009). Video Based Smoke Detection: An Approach to Motion Segmentation Using Adaptive Gaussian Mixture Model, Proceedings of The 2nd International Conference on IT Application and Management: Managing Global Uncertainties, University of Indonesia, Depok, Indonesia, June 25th.
- [6]. Nugroho, Y.S., Suwarno, Widyanto, M.R., Yanuar, Jakti, Edwin, W., Alif, Gunawan, M., (2010). Early Detection of Cables Fires Using Image Processing: Proceedings of The 12th International Conference on Fire Science and Engineering Interflam 2010 University of Nottingham, UK, University of Indonesia, Depok, Indonesia.
- [7]. Keski-Rahkonen, O., Mangs, Johan, Turtola, Anti, (1999). Ignition of and fire spread on cables and electronic components, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) Publications 387, Technical Research of Finland, ESPOO.
- [8]. Andersson, P., Rosell, L., Simonson, M., and Emanuelsson, V., (2004). Small and Large Scale Fire Experiments with Electric Cables under Well-Ventilated and Vitiated Conditions, SP Swedish National Testing and Research Institute, University College of Bor°as, SE-501 90 Bor°as,

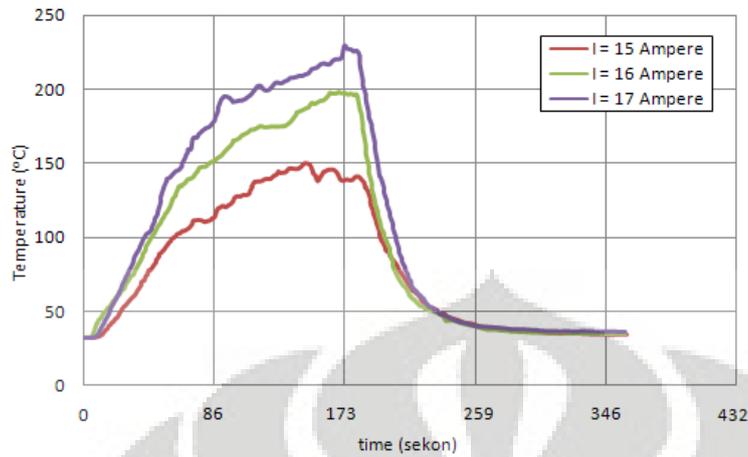
- Sweden, *Journal of Fire Technology*, 40, 247–262, 2004 Kluwer Academic Publishers.
- [9]. C.H. Leung, J.E.J. Staggs, J. Brindley, A.C. McIntosh, R.H. Whiteley, (2000). The Effects of an Inert Central Core on the Thermal Pyrolysis of an Electrical Cable, *Fire Safety Journal* 34 143-168.
- [10]. Mulholland, George W., Smoke Production and Properties, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 15, Section 2, 2/217-2/227 pp.
- [11]. Babrauskas, V., (2008). Research on Electrical Fires: The State of the Art, Proceeding of the 9th International Symposium on Fire Safety Science, University of Karlsruhe, Germany.
- [12]. Stauffer, C., dan Grimson, W.E.L., (1999). Adaptive Background Mixture Models for Real-Time Tracking. Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition.
- [13]. Mohagheghzadeh, A., Faridi, P., Shams ardakani, A., Ghasemi, Y. (2006). Medicinal smokes. *Journal of Ethnopharmacology* 108 161–184.
- [14]. BICC Cables Ltd, Electric Cables Handbook, WileyBlackwell; London 3rd Edition, 1997.
- [15]. Underwriters Laboratories 217. Single and Multiple Station Smoke Alarms, UL 1971: Signaling Devices for the Hearing Impaired, UL 268: Smoke Detectors for Fire Alarm Signaling Systems.
- [16]. New York City Fire Department. Carbon monoxide poisoning, website: http://www.nyc.gov/html/fdny/html/safety/firesafety_carbon_monoxide.shtml. Diperoleh Mei 2010.
- [17]. Madorsky, S. L. (1964). Thermal Degradation of Organic Polymers. Interscience, John Wiley, New York.
- [18]. C. P. Bankston, B. T. Zinn, R. F. Browner, and E. A. Powell., (1981). Combustion and Flame, 41, 273.
- [19]. Kaewtrakulpong, P. & Bowden, R. (2001). An improved adaptive background mixture model for realtime tracking with shadow detection.

- [20]. Stauffer, C. and Grimson, E. (2000). Learning patterns of activity using realtime tracking. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-22(8):747-757.
- [21]. Petterson, O., Magnuson, S.E., and Thor, J. (1976). Fire Engineering Design of Structures. Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50.
- [22]. Walton, W. D., and Thomas, P. H., (1995). Estimating temperature in compartment fire. in SFPE Handbook of fire protection engineering, 2nd Edition (eds P. J. Di Nenno et al.) pp. 3.134 – 3.147 Society of Fire Protection Engineers, Boston.
- [23]. Marbach, G., Loepfe, M., Brupbacher, T., (2006). An image processing technique for fire detection in video images. Fire Safety Journal 41 (2006) 285–289.
- [24]. Schultze, T., Kempka, T., Willms, I., (2006). Audio–video fire-detection of open fires. Fire Safety Journal 41 (2006) 311–314.
- [25]. Incropera F. P., DeWitt D. P., (1981). Fundamentals of Heat Transfer, 1st ed. New York: Wiley.
- [26]. Morton, B.R., Taylor, G., dan Turner, J.S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proceedings of the Royal Society (London). A234, 1-23
- [27]. Heskestad, G. (1972). Similarity relations for the initial convective flow generated by fire. American Society of Mechanical Engineers, Winter annual Meeting, New York, November 26-30.
- [28]. Hafner, Bob. (2007). Scanning Electron Microscopy Primer. Characterization Facility, University of Minnesota.
- [29]. Bálint, Zs., Vértésy, Z., Kertész, K. dan Biró, L.P., (2004). Scanning Electron Microscopic Investigations in Butterfly Wings: Detecting Scale Micro- and Nanomorphology and Understanding their Functions. FORMATEX.
- [30]. Wieser D, Brupbacher T. (2001) Smoke detection in tunnels using video images. 12th international conference on automatic fire detection, Gaithersburg, USA; March.
- [31]. Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. Information and Control, 338-353.

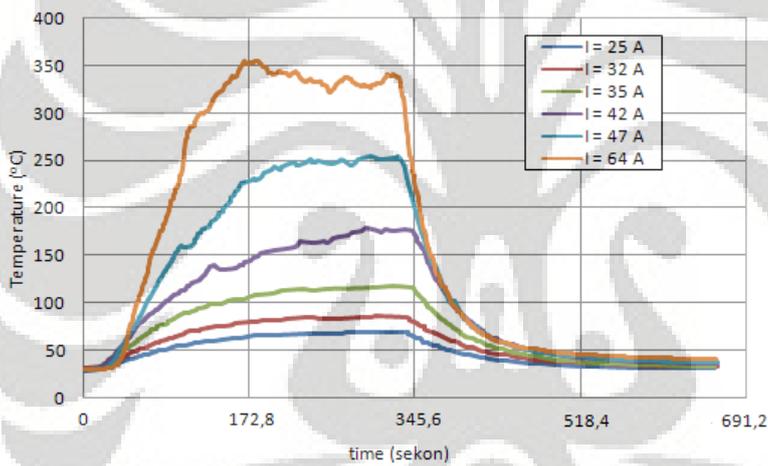


LAMPIRAN

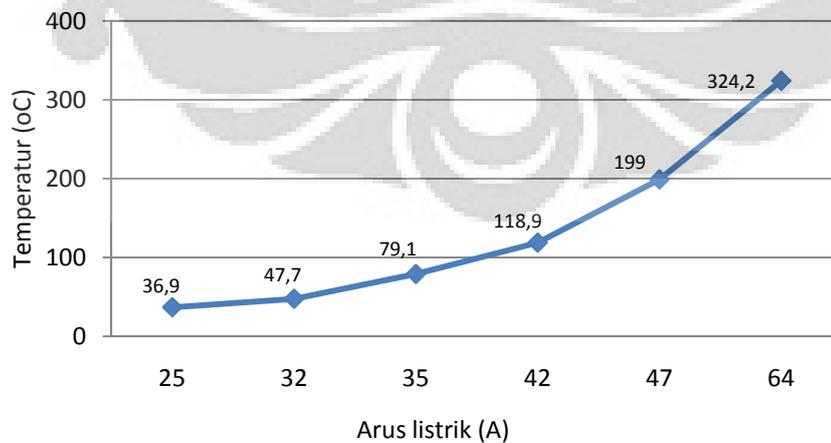
A.1 Grafik hasil pengukuran temperatur tiap arus untuk kabel NYA 1,5 mm²



A.1 Grafik hasil pengukuran temperatur tiap arus untuk kabel NYA 2,5 mm²



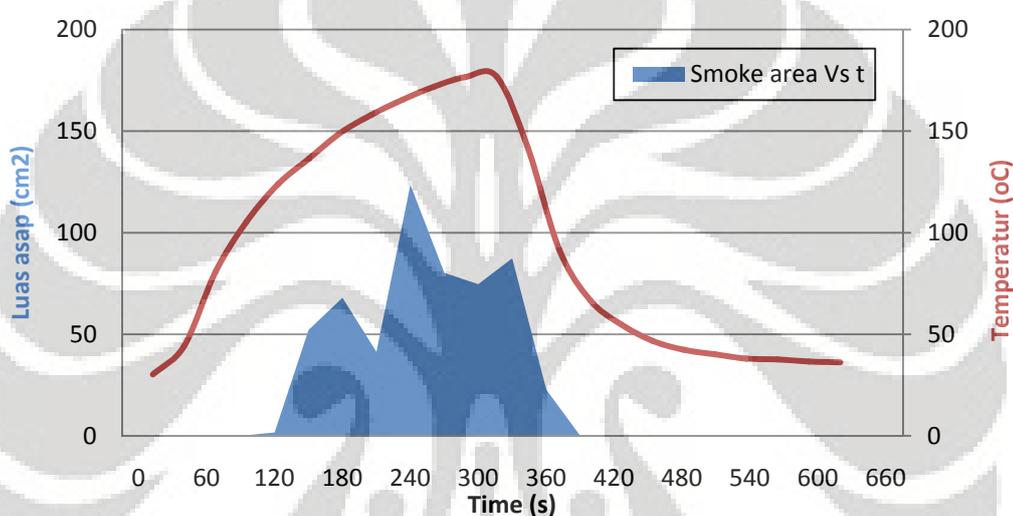
A3. Grafik kenaikan temperatur pada t=180 sekon untuk NYA 2.5 mm².



A.4 Detail peristiwa munculnya asap

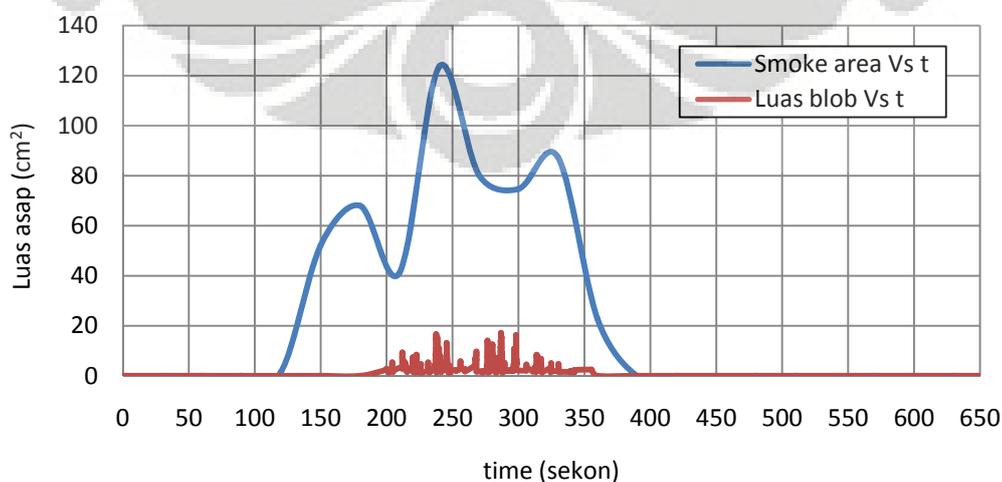
Jenis Kabel	Arus (A)	Tawal (°C)	Kemunculan Asap	
			t (s)	T (°C)
NYA 1,5 mm ²	15	32,6	45,4	81,2
	16	32,8	35,0	79,6
	17	32,6	29,7	78,1
NYA 2,5 mm ²	35	29,8	120,0	94,0
	42	30,2	61,0	80,7
	47	30,4	56,0	80,3
	64	30,0	39,0	41,2

A.5 Data luas asap terhadap kenaikan temperatur



A.6 Grafik perbandingan luas asap dengan luas asap yang terdeteksi sebagai blob.

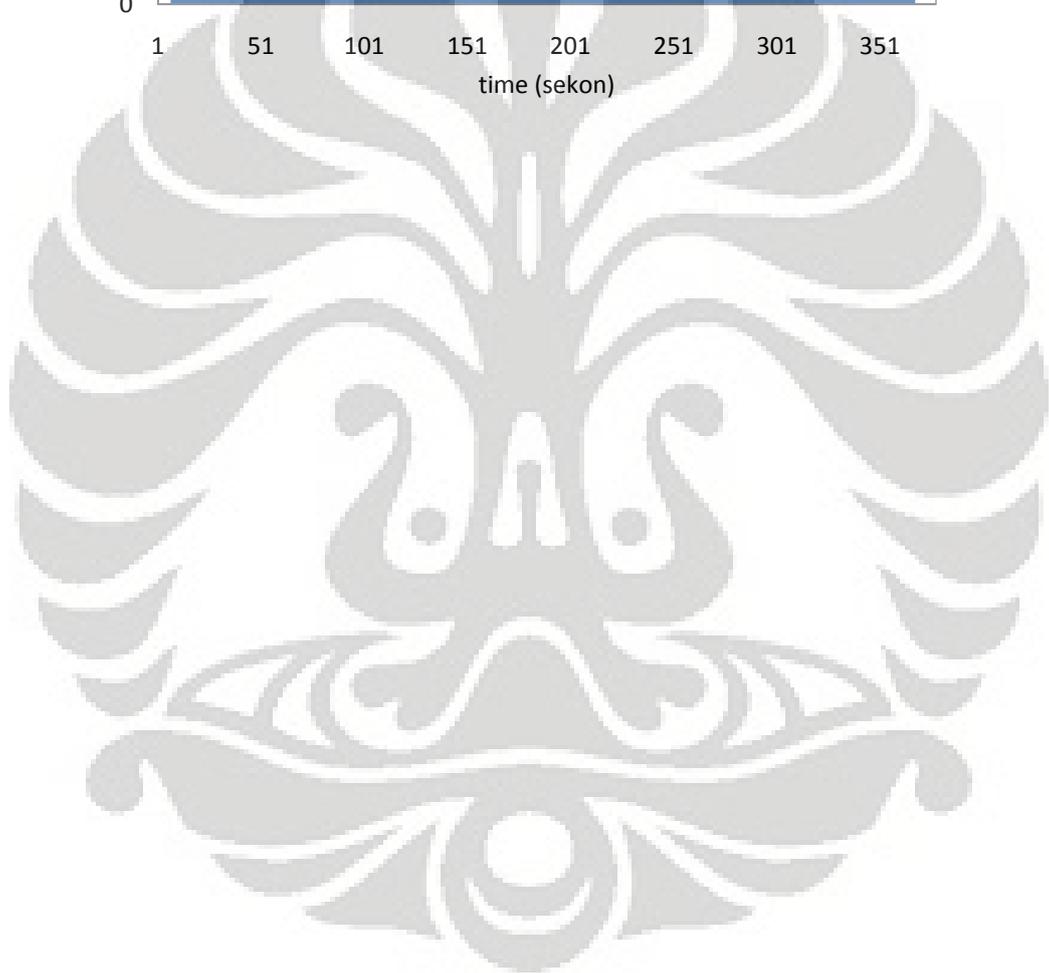
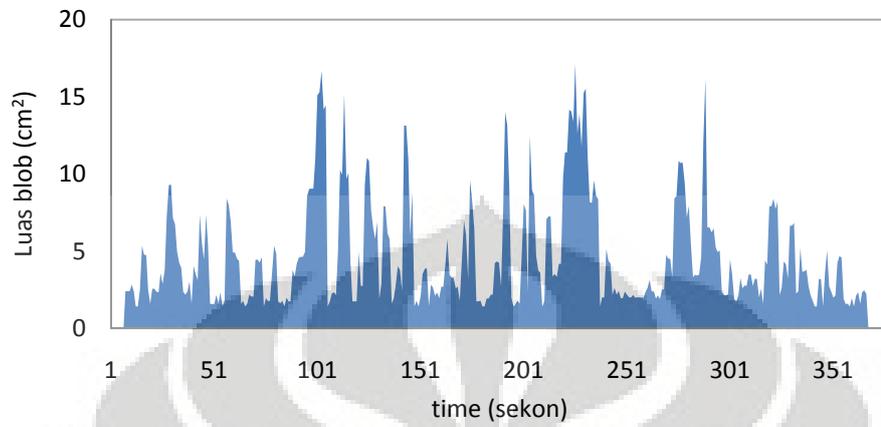
Kabel NYA 2,5 mm² - Arus 42 A



LAMPIRAN A

A.7 Grafik perbandingan luas asap dengan luas asap yang terdeteksi sebagai blob.

Kabel NYA 2,5 mm² - Arus 42 A



EARLY DETECTION OF CABLE FIRES USING IMAGE PROCESSING

Yulianto S. Nugroho^{a*}, Suwarno^b, Muhammad R. Widyanto^b, Yanuar^a,
Edwin W Jakti^a and Gunawan M Alif^a

^aDepartment of Mechanical Engineering University of Indonesia

^bFaculty of Computer Science University of Indonesia

Tel. +62 21 7270032, Fax. +62 21 7270033, email. yulianto.nugroho@ui.ac.id

ABSTRACT

Electrical fires remain one of the important sources of initial heating in domestic and industrial fires. This paper presents the experimental work on cable fires due to poor connection and overload. An experimental set-up was developed to study the early stages of self-heating and smoke release in jointing of 1.5mm² NYA – PVC insulated cables. The surface temperature and smoke release are closely monitored using image processing technique. In this paper a video based smoke detection using the adaptive Gaussian Mixture Model was also applied. The prediction of the model is in good agreement with the observer's interpretation of smoke area for the early stages of cable fire. The results also reveal a correlation between the surface temperature of the jointing and smoke area developed. In addition, it was found that the maximum values of the blobs areas of smoke for 15A to 17A occurred at similar surface temperatures of the jointing. Verification of outcomes from video smoke detection technique with the physical process of smoke and fire development is a great challenge in defining the level of fire risk.

Keywords:

Cable fire, early detection, image processing, adaptive Gaussian Mixture model.

INTRODUCTION

Fire in buildings and industrial facilities cause human suffering and materials losses. Regular broadcasting of news and indepth publications of fire accidents improve general public awareness of the risks. There is now an obvious need to deal with fire safety in a more organized fashion in which engineering solutions are introduced at an early stage. Regarding the type of fires, the US fire statistics implies that 16% of the structure fires are electrical fires¹. Worldwide, the situation is not better since less stringent standards are still in place. In Jakarta, for example, almost half of fires occur in domestic premises. The main causes of fires are the misuse of home appliances, such as cooking stoves, and poor wiring systems and installations. Electrical and cooking appliances account for more than half of the total fires in Jakarta².

In wider scale, electrical fires—fires directly caused by the flow of electric current or by static electricity—are one of the important types of structure fires¹. Electricity creates heat as it moves through conductive materials. The heat created in any electric circuit is supposed to be dissipated properly so that the device does not degrade. There are conditions where the heat built up due to overload cannot be safely dissipated. In other case, the current can flow through poor connections with high resistance, causing severe localized heating and ignition of the insulated materials³.

Babrauskas, V.¹ ranked the physical mechanism causing electrical fires according to their importance as follows (i) poor connection, (ii) arcing across a carbonized path, (iii) arcing in air, (iv) excessive thermal insulation, (v) overload, (vi) ejection of hot particles, (vii) dielectric breakdown in solid or liquid insulators, and (viii) miscellaneous phenomena. In a typical fire accident causes by failure or ignition of the electric device, the user may not aware of the heat built up, since the connections and wiring installations are placed behind the electric appliances or inside the wall.

For domestic premises with low voltage applications of 100-240 VAC circuits, the NYA (PVC Insulated) cable is widely used. A poor or loose connection combined with overload could lead to internal heating of the cable interior followed by pyrolysis and charring of insulation materials. The pyrolysis process of the PVC insulation could produce smoke of about 0.03 to 0.12 the mass of smoke per mass of fuel burned⁴. To avoid fire disasters, many early fire detection techniques have been explored and most of them are based on temperature, and rate of temperature rise samplings, smoke opacity sampling, etc. Most of the traditional approaches are considered as point detectors. In a case of fire, it may take a long time for the room temperature to rise to the detector setting point or for the smoke to reach the detector. As most of the household objects will generate smoke before they catch fire, thus it is still reasonable to employ smoke detection as early alarm of fire accident. The progress on video surveillance and monitoring equipment technology in the last decade has increased the presence of Closed Circuit Television (CCTV) cameras in many public and private areas. Their presence has opened the CCTV market to the opportunity to perform real time video fire detection. The strength of using ordinary video is the ability to serve large spaces⁵⁻⁷.

Image processing algorithms for automatic video fire or smoke detection have been developed in the past for many applications⁵⁻⁹. Nevertheless, most of the results reported focused only on the flame region and or smoke region extraction techniques. It becomes general knowledge that experimental verification of a smoke and fire detection system is very difficult task due to lack of standard data sets and evaluation criteria¹⁰. This paper is intended to explore the physical event takes place during the early stages of self-heating leading to cable fires. It is then interesting to correlate the heating process of cable insulator with smoke development using a video image processing technique. Cable fire topic was selected due to lack of literature on the subject and also because of relatively simple experimental set-up.

CABLE FIRE

In any typical electrical circuit, there will be numerous connections among cables and end-use device, and within the device itself. In many cases, poor connections that leads to overheating and glowing connection, is consider to be the most important mechanism for electrical fires¹. Among many types of cable jointing, the twist-jointing covered with plastic tape is very popular. But it can fail due to poor connection, overloaded and excessive thermal insulation.

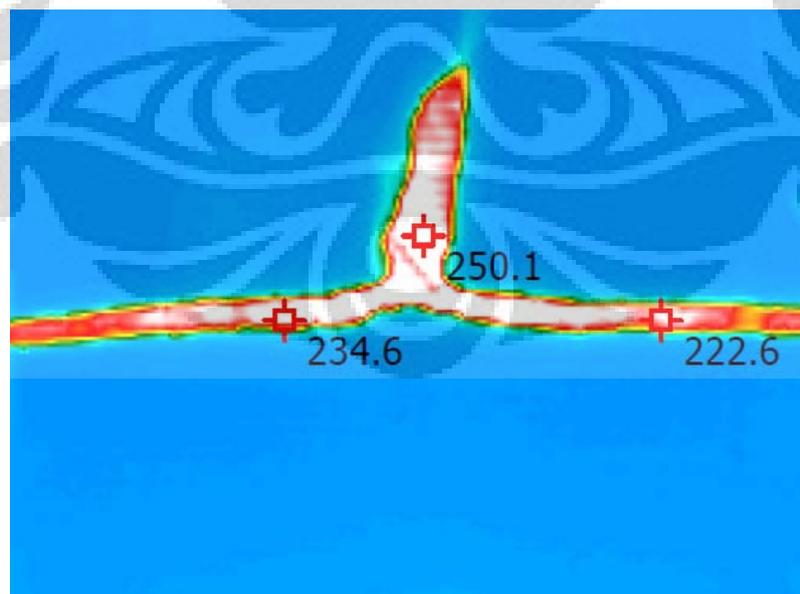


Fig. 1 Thermal Image of a twist-jointing of an NYA 1.5 mm² cable overloaded by a 90A electrical current¹².

Although cable insulation material is not a typical self-ignition material, under a certain condition when a cable system carries a current and at the same time it is thermally insulated, self ignition is possible. Self ignition of a cable results when the rate of heat generation within the cable interior is greater than the rate at which heat can be transported to and dissipated in the external environment¹¹. Fig. 1 shows thermal images of a twist-jointing of an NYA 1.5 mm² cable overloaded by a 90A electrical current¹². It suggests that the surface temperature of insulation in the jointing areas could reach above the temperatures of the other part of cables.

VIDEO IMAGE PROCESSING

The application of image processing algorithms for automatic video fire or smoke detection gained a momentum in recent years due to some reasons such as the capability to overcome the major drawbacks of traditional smoke and fire detection methods, to provide more information about fire, such as location, size, growth rate, and to be applied in large room with complex geometry⁶⁻¹⁰. Among the algorithms presented in the literature, the adaptive Gaussian Mixture Model proposed by Stauffer, C.⁵ is adopted by many researchers^{6,13,14}. One of the most important parts of the action recognition systems is the segmentation of moving foreground objects from the stationary background. Generally, the illumination could be change due to change of lighting conditions gradually or suddenly. Considering the case that the most of the visual surveillance systems include monitoring of outside environments, thus, the Adaptive Gaussian Mixture Model would be an ideal fit to be used for object segmentation^{5,6,13,14}.

In this work the development of smoke is correlated with the heating stages of the objects. Therefore, in general the outline of the work is given in Fig.2.

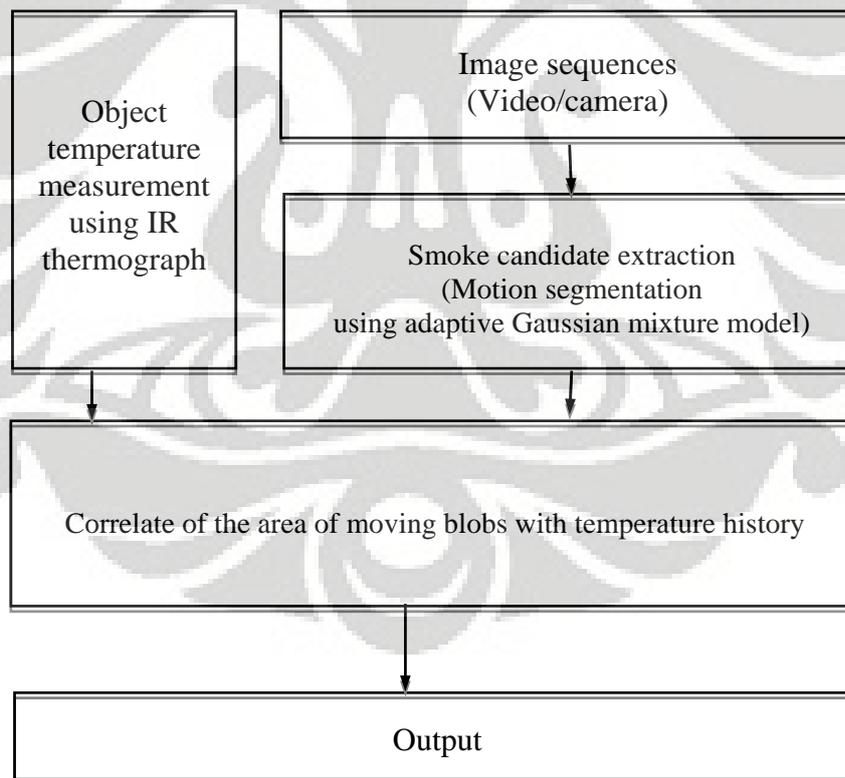


Fig. 2 The outline of the work

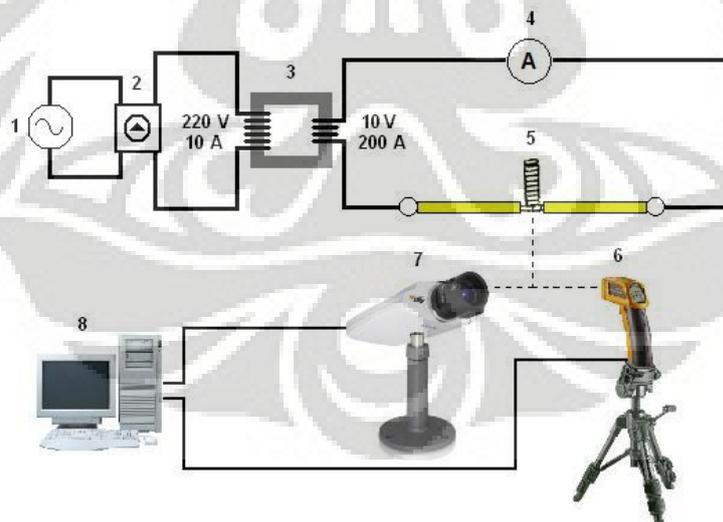
Motion segmentation is analyzed using Adaptive Gaussian Mixture Model. Detail explanation of the model is available elsewhere^{5,6,13,14}. Using this model, the pixel values that do not match one of the pixel's Gaussian are grouped using connected component analysis as moving blobs. Then, the areas of moving blobs can be calculated and extracted for further analysis.

EXPERIMENTAL

In these experiments, a single conductor cable of type NYA were heated with electrical current, shown in Fig. 3. The cross section of copper conductor in the experiments was 1.5mm^2 . The experimental set-up equipped with a step down transformer of 220V to 10V with adjustable current up to 400A (Fig. 4). In a typical run, the cable was heated with a constant current, i.e. 15A, 16A and 17A, until the temperature rise ceased or the insulation was destroyed. The surface temperature histories of the cable jointing were measured using an IR Thermometer of Fluke 568 series with temperature range of -40°C to 800°C . The temperature data was stored in a personal computer for further analysis. Meanwhile, the smoke development was recorded using a Vivotek IP Camera IP 7132 series. Besides using the motion segmentation based on the adaptive Gaussian mixture model, smoke area measurement was also performed manually using an open source image processing software of Image J (<http://www.rsb.info.nih.gov/ij>).



Fig. 3 Initial condition of the cable jointing and after being tested with 15A to 17A.



1. Power supply
2. Electric current regulator
3. Step-down Transformer
4. Amperemeter
5. Cable Sample with Jointing 0.0
6. Infrared Thermometer
7. Suveillance camera
8. Computer

Fig. 4 Experimental Set-up

RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 5 shows a plot of surface temperature of the cable jointing against time for various electrical current applied. The jointing temperature rises as the current is applied. For a certain period of time, from room temperature to about 100°C, a nearly exponential trend of temperature rise was identified. The rate of temperature rise decreases until reaching an extreme point dependent upon the current applied. Similar plots for temperatures of cable insulation and copper wire of the cable were reported by Rahkonen, et al.¹¹. It should be noted that the first images of smoke release was first identified by the observers when the surface temperature of the jointing reached 75°C to 85°C. The IP camera started to catch the early smoke images when the jointing temperature was about 109°C to 120°C. This is most probably due to the effect of interior lighting and contrast of smoke image with the physical background of the current experimental set-up. Fig 3. shows the degradation level of the cables with the values of electrical current applied. Although the ampacity, i.e. the safe carrying capacity¹ of a typical NYA 1.5mm² cable in air atmosphere at 30°C is about 24A, a simple jointing of cable could lower the actual ampacity. In other words, jointing as an example of poor connection could cause degradation of the cable insulation due to overheating.

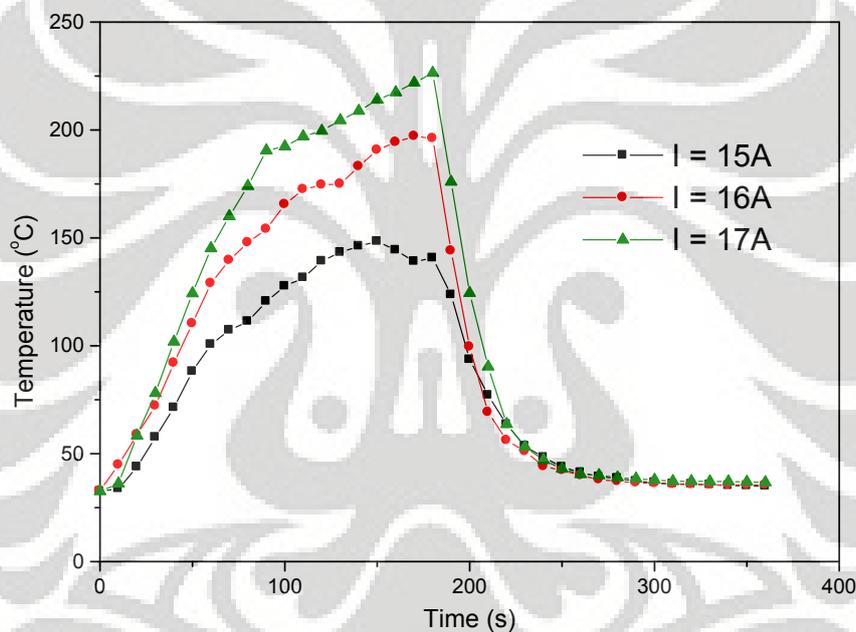


Fig. 5 Effect of electrical current on surface temperature history of the jointing.

The segmentation of moving foreground objects from the stationary background is a crucial part of video image processing using an adaptive Gaussian Mixture model. The model works by identifying whether the pixel type is match to the one of the background reference or not. If it does, then the pixel is a background. If it does not match with any reference background, then the pixel is a foreground (moving object)¹³. Thus, the process is affected by the values of weight parameter, background reference, and standard threshold. Depending upon the light conditions during the experimental work, it is necessary to adjust the parameters.

Table 1 shows the results of segmentation and extraction from video sequence in which smoke is releasing from the overloaded jointing. Three sets of values for the GMM parameters are applied. It is clear that the setting #1 (the fifth column of the table) is closer to the smoke image interpreted by the observers. The time and the corresponding temperature and Blob frames are provided in the same Table.

Table 1 Effect of GMM setting parameters on the blob frame captured for a typical test at 15A.

time	T (oC)	GMM default setting: Background threshold: 0.5 Standard threshold: 6 Weight initial: 0.05		GMM modified setting#1: Background threshold: 0.1 Standard threshold: 4 Weight initial: 0.01		GMM modified setting#2: Background threshold: 0.1 Standard threshold: 3 Weight initial: 0.005	
		video frame	Blob	video frame	blob frame	video frame	blob frame
90	122						
120	139.3						
150	144						

Figs. 6-8 plots temperature and Blob (smoke) areas measured using the model. Peaks of the smoke area indicate sudden release of smoke from the jointing. The plot shows that the current greatly affects the dynamic of smoke release due to pyrolysis of the insulation. It is interesting to note that the maximum peaks occur at a temperature range of about 145°C.

As mentioned earlier, the model works by identifying whether the pixel type is match to the one of the background reference or not. Then, it could be possible for the model to interpret the earlier smoke image as background. In order to compare the results, smoke area measurement was also performed manually and plotted in the figure shown as Fig. 9. It is quite obvious that the model can predict the initial condition in good agreement with manual interpretation. Nevertheless, once the smoke fills the area above the sample tested, the model might consider the smoke as a new background. As a result, the model provides smaller value of smoke area than the observers.

It is interesting to study whether there is a correlation between the surface temperature records with the smoke area developed. In order to find such correlation, a plot of temperature against smoke area measured from video image processing is provided as Fig. 10. Although many more data should be provided a strong correlation is revealed at least during the early stage of smoke development in cable fires.

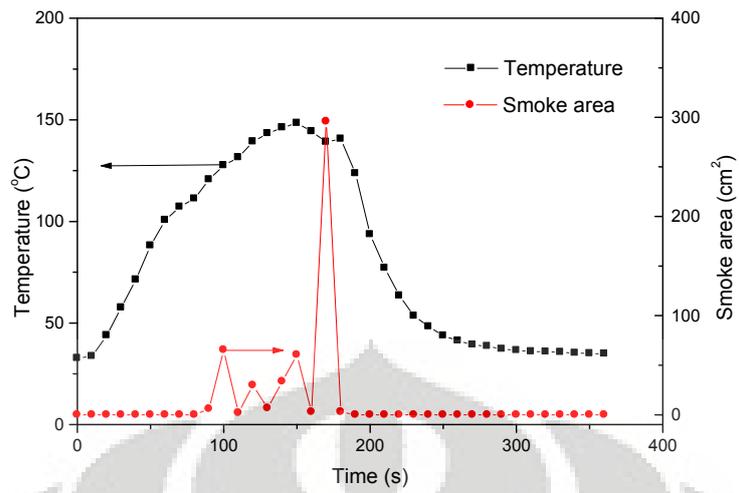


Fig. 6 Surface temperature and smoke area development at 15A.

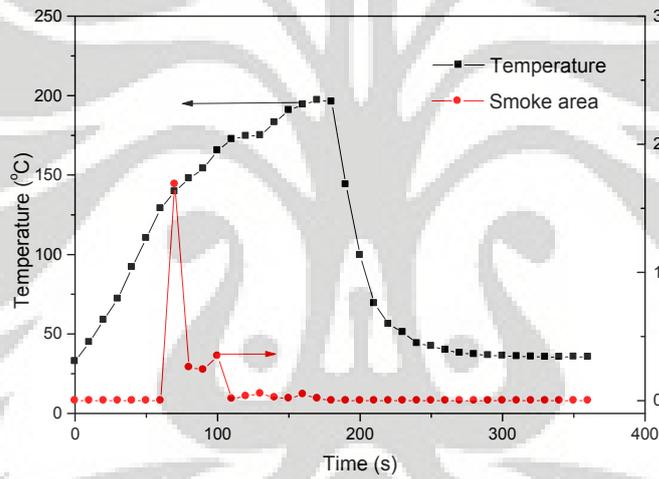


Fig. 7 Surface temperature and smoke area development at 16A.

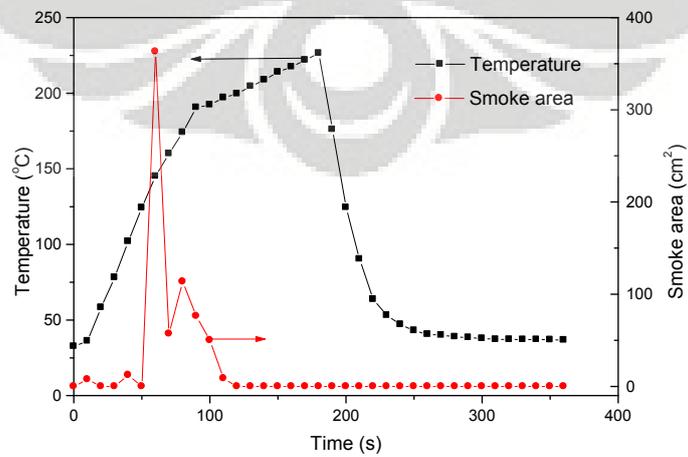


Fig. 8 Surface temperature and smoke area development at 17A.

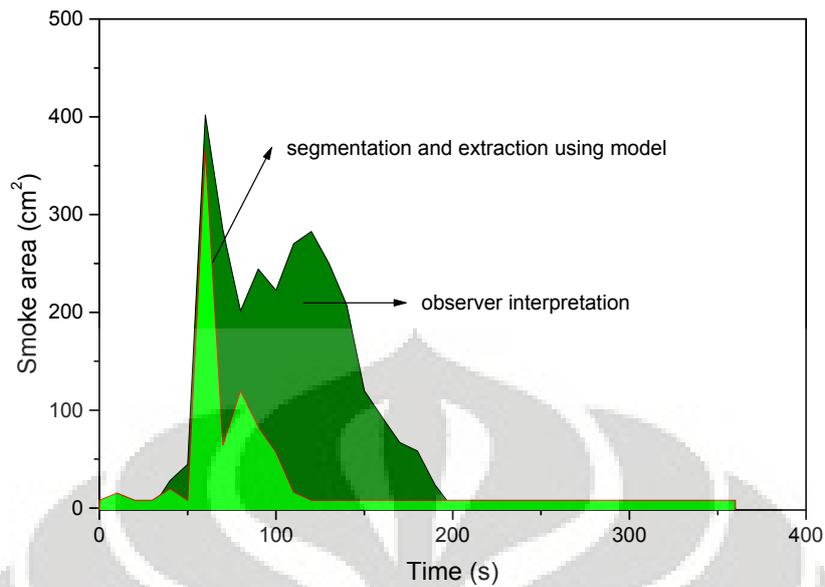


Fig. 9 Comparison of smoke areas measurement at 17A.

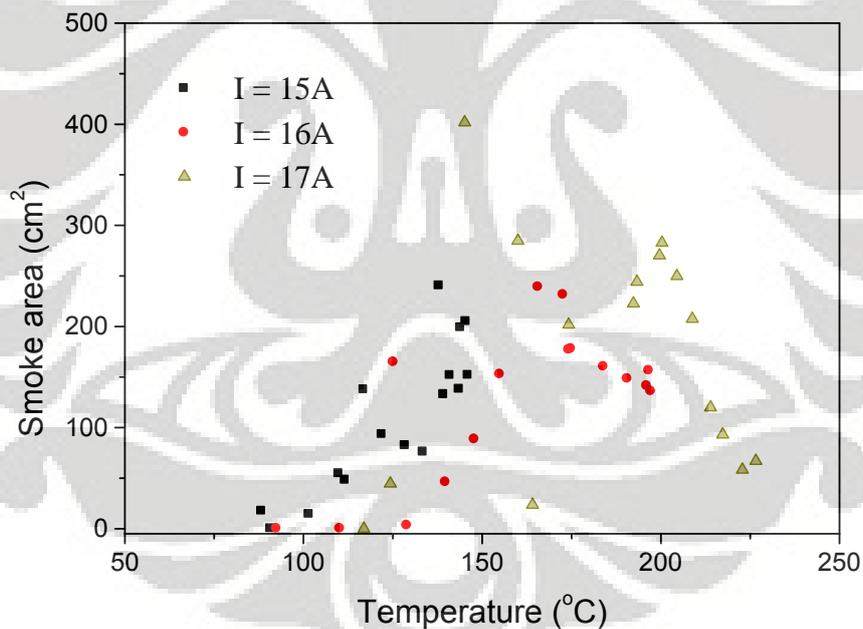


Fig. 10 Correlation of surface temperature with smoke area

CONCLUSIONS

A simple experimental set-up presented in this paper is able to provide important data for understanding the physics of cable fire and the corresponding smoke development. Early development of smoke in a typical cable fire are affected by self-heating stages and pyrolysis processes of the insulation material. A strong correlation between surface temperature and the area of smoke released is suggested. For early detection of smoke development, the prediction of the model is in good agreement with the observer's interpretation of smoke area.

LAMPIRAN B

ACKNOWLEDMENT

Dr. YS Nugroho and the co-workers would like to thank the Directorate of Research and Public Services of the University of Indonesia (DRPM UI) for providing financial support through RUUI Unggulan 2009 research grant.

REFERENCES

1. Babrauskas, V., Research on Electrical Fires: The State of the Art, Human Behaviour in Fires, Fire Safety Science-Proceedings of the Ninth International Symposium, 2008, pp. 3-18
2. Jakarta Fire Statistics 2000-2009, Jakarta Fire Department, 2009, website: www.jakartafire.com.
3. DeHaan, J.D., Kirk's Fire Investigation – 5th ed., Prentice Hall, 2002, p. 305.
4. Mulholland, GW, (2002), Smoke Production and Properties, Chapter 13, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, pp. 2-258 – 2-268.
5. Stauffer, C., and Grimson, W.E.L., Adaptive background mixture models for real-time tracking, Proceeding of IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1999.
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. Marbach, G., Loepfe, M., and Brupbacher, T., An image processing technique for fire detection in video images, Fire Safety Journal 41 (2006) 285–289.
8. Celik, T., and Demirel, H., Fire Detection in Video Sequences using a Generic Color Model, Fire Safety Journal 44 (2009) 147-158.
9. Gubbi, J., Marusic, S., Palaniswami, M., Smoke Detection in Video using Wavelet and Support Vector Machines, Fire Safety Journal 44 (2009) 1110-1115.
10. 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.
11. Rahkonen, O.K., Mags, J., and Turtola, A., Ignition of and Fire Spread on Cables and Electronic Components, VTT Publications 387, 1999.
12. Adrianus, Effect of Jointing Types on Cable Fires Potential, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering University of Indonesia, in Indonesian Language, Jakarta, 2007.
13. Suwarno, Widyanto, M.R., Nugroho, Y.S., Video Based Smoke Detection: An Approach to Motion Segmentation Using Adaptive Gaussian Mixture Model, Proceedings of The 2nd International Conference on IT Application and Management: Managing Global Uncertainties, University of Indonesia, Depok, Indonesia, June 25th, 2009.
14. Wei, Z., Wang, X., An W., and Che, J., Target-Tracking Based Early Fire Smoke Detection in Video., 2009 Fifth International Conference on Image and Graphics, IEEE Computer Society, pp. 172-176.