

**PENGARUH OKSIDATOR KALIUM PERKLORAT DAN
KALIUM PERIODAT TERHADAP SIFAT TERMAL, EMISI
SPEKTRUM, DAN FASA YANG TERBENTUK PADA
PIROTEKNIK BERBASIS Cu-PVC UNTUK APLIKASI SUAR
MERAH MUDA**

(Skripsi)

Oleh

Frila Dwi Untari

1917041044



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PENGARUH OKSIDATOR KALIUM PERKLORAT DAN KALIUM PERIODAT TERHADAP SIFAT TERMAL, EMISI SPEKTRUM, DAN FASA YANG TERBENTUK PADA PIROTEKNIK BERBASIS Cu-PVC UNTUK APLIKASI SUAR MERAH MUDA

Oleh

Frila Dwi Untari

Material piroteknik merupakan salah satu jenis material *less explosive* yang dapat menghasilkan efek berupa panas, cahaya, bunyi, gas, atau kombinasi dari itu semua. Komponen dasar dari piroteknik adalah oksidator, bahan bakar, dan komposisi lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat termal, emisi spektrum, dan fasa yang terbentuk dari proses penguraian komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC (B1) dan Cu-KIO₄-PVC (B2) selama proses pembakaran. Sampel dikarakterisasi menggunakan *Thermogravimetri Analysis* (TGA), *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), *X-ray Diffraction* (XRD) dan spektrometer. Masing-masing sampel mengalami dua dekomposisi utama dengan energi aktivasi 201,881 dan 307,003 kJ/mol untuk B1, 291,181 dan 192,486 kJ/mol untuk B2. Proses dekomposisi B1 terjadi secara difusi sedangkan B2 terjadi secara reaksi kimia. Sifat termal B1 lebih baik daripada B2, terlihat dari suhu pengapian (B1 = 294,06 °C; B2 = 285,33 °C) dan residu massa setelah proses pembakaran yang lebih tinggi daripada B2. Sampel B1 mengemisikan spektrum berwarna merah muda, sedangkan B2 mengemisikan warna merah muda ke *orange*. Adapun intensitas spektrum B1 lebih rendah dibandingkan B2. Emisi spektrum yang dihasilkan dari kedua sampel dipengaruhi oleh fasa yang terbentuk setelah proses pembakaran. Dimana, pada sampel B1 terbentuk fasa *dipotassium copper(I) chloride* (K₂CuCl₃), *potassium chloride* (KCl), dan *dicopper(I) oxide* (Cu₂O). Sedangkan pada sampel B2 terbentuk *sylvine* (KCl), *potassium iodide* (KI), *copper iodide* (CuI), dan *copper oxide* (CuO).

Kata Kunci : sifat termal, karakterisasi, energi aktivasi, fasa

ABSTRACT

EFFECT OF OXIDIZER POTASSIUM PERCHLORATE AND POTASSIUM PERIODATE ON THERMAL PROPERTIES, EMISSION SPECTRUM, AND PHASE FORMED IN PYROTECHNIC BASED ON Cu-PVC FOR PINK FLARE APPLICATION

By

Frila Dwi Untari

Pyrotechnic materials are a type of non-explosive material that can produce effects in the form of heat, light, sound, gas, or a combination of these. The basic components of fireworks are oxidizer, fuel, and other compositions. This study aims to analyze the thermal properties, emission spectra, and phases formed from the decomposition process of the pyrotechnic compositions Cu-KClO₄-PVC (B1) and Cu-KIO₄-PVC (B2) during the combustion process. Samples were characterized using Thermogravimetric Analysis (TGA), Differential Scanning Calorimetry (DSC), X-ray Diffraction (XRD), and a spectrometer. Each sample underwent two major decompositions with activation energies of 201.881 and 307.003 kJ/mol for B1, 291.181 and 192.486 kJ/mol for B2. The process of decomposition of B1 occurs by diffusion, while that of B2 occurs through chemical reactions. The thermal properties of B1 are better than B2, as seen from the ignition temperature (B1 = 294.06 °C; B2 = 285.33 °C), and the residual mass after the combustion process is higher than B2. Sample B1 emits a pink spectrum, while sample B2 emits pink to orange. While the intensity of the B1 spectrum is lower than B2. The emission spectrum produced from the two samples is influenced by the phase formed after the combustion process. In sample B1, dipotassium copper(I) chloride (K₂CuCl₃), potassium chloride (KCl), and copper(I) oxide (Cu₂O) phases were formed. Meanwhile, in sample B2, sylvine (KCl), potassium iodide (KI), copper iodide (CuI), and copper oxide (CuO) are formed.

Keyword : thermal properties, characterization, activation energy, phase

**PENGARUH OKSIDATOR KALIUM PERKLORAT DAN
KALIUM PERIODAT TERHADAP SIFAT TERMAL, EMISI
SPEKTRUM, DAN FASA YANG TERBENTUK PADA
PIROTEKNIK BERBASIS Cu-PVC UNTUK APLIKASI SUAR
MERAH MUDA**

Oleh

FRILA DWI UNTARI

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA SAINS**

Pada

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **PENGARUH OKSIDATOR KALIUM PERKLOLAT DAN KALIUM PERIODAT TERHADAP SIFAT TERMAL, EMISI SPEKTRUM, DAN FASA YANG TERBENTUK PADA PIROTEKNIK BERBASIS Cu-PVC UNTUK APLIKASI SUAR MERAH MUDA**

Nama Mahasiswa : **Frila Dwi Untari**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041044

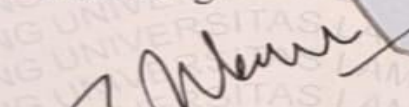
Program Studi : Fisika

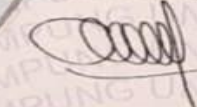
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



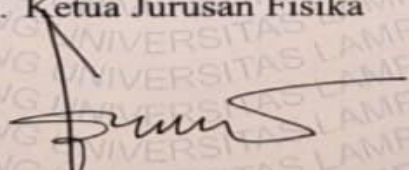
Pembimbing I

Pembimbing II


Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.
NIP. 19610723 198603 1 003


Abdul Basyir, M.Si.
NIP. 19910208 201902 1 004

2. Ketua Jurusan Fisika


Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 19801010 200501 1 002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.

Sekretaris : Abdul Basyir, M.Si.

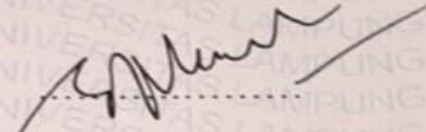
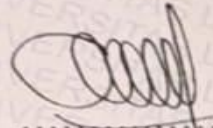
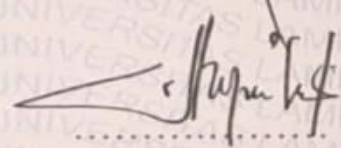
**Penguji
Bukan Pembimbing : Suprihatin, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam


Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 19711001 200501 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 29 Mei 2023


PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain. Sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis maupun diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebut dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Mei 2023




Fria Dwi Untari
NPM. 1917041044

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Frila Dwi Untari, dilahirkan pada tanggal 29 April 2001 di Klaten. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Sidik Purnomo dan Ibu Haryanti.

Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis adalah SD Negeri Sukamantri I pada Tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Pasar Kemis pada Tahun 2016, Sekolah Menengah Atas Negeri 11 Kabupaten Tangerang pada Tahun 2019. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada Tahun 2019 melalui jalur SBMPTN dan mengambil konsentrasi dalam bidang Material Fisika. Selama menempuh pendidikan, penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) sebagai pengurus di bidang kaderisasi pada tahun 2020-2021 dan Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas (BEM-F) sebagai anggota dinas hubungan diplomasi eksternal tahun 2019-2020. Penulis telah menyelesaikan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Pusat Riset Material Maju-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan pada tahun 2022. Penulis juga telah mengikuti program pengabdian masyarakat dengan mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada tahun 2022 di Desa Sidorejo,

Kecamatan Sumberejo, Kabupaten Tanggamus. Pada tahun 2023, penulis juga pernah menjadi asisten praktikum Fisika Eksperimen dan Fisika Komputasi.

Pengalaman penulis menulis ilmiah yakni laporan PKL pada tahun 2022 dengan judul “Perbandingan Fenomena Termal Selama Proses Pembakaran pada Komposisi Piroteknik Al-CaCO₃-*Arabic Gum* dan Fe-CaCO₃-*Arabic Gum*”. Selanjutnya, penulis melakukan penelitian bidang material piroteknik sebagai topik skripsi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung dengan judul “Pengaruh Oksidator Kalium Perklorat dan Kalium Periodat terhadap Sifat Termal, Emisi Spektrum, dan Fasa yang Terbentuk pada Piroteknik Berbasis Cu-PVC untuk Aplikasi Suar Merah Muda”. Penulis melakukan penelitian di Pusat Riset Material Maju-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan.

MOTTO

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is not to stop questioning”

-Albert Einstein-

“Dalam hal gaya, berenanglah mengikuti arus. Dalam hal prinsip, berdirilah seperti batu”

-Thomas Jefferson-

“Everybody is a genius. But if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will live its whole life believing that it is stupid.”

-Albert Einstein-

**Sebaik-baiknya pilihan yang kamu pilih merupakan sebuah konsekuensi
Lantas,
Konsekuensi seperti apa yang kamu pilih?**

-Penulis

PERSEMBAHAN

Dengan ketulusan dan rasa syukur kepada Allah SWT

Karya ini kupersembahkan kepada:

Kedua Orang tua tercinta

Bapak Sidik Purnomo & Ibu Haryanti

Engkau bagaikan

Laksana sinar matahari kepada dunia,
Laksana mata angin dalam navigasi,
Laksana anggota tubuh pada manusia, dan
Laksana pahlawan tanpa tanda jasa.

Terima kasih atas Laksana mu dalam hidupku.

Serta kuucapkan kembali rasa terima kasih ku kepada mu, atas segala do'a yang selalu dipanjatkan setiap waktu dan sujudmu. Terima kasih atas segala pengorbanan dengan cucuran keringat yang tak pernah diperlihatkan, Terima kasih atas motivasi yang tak pernah surut untuk disampaikan. Jika ada kata yang lebih indah dari kata Terima kasih ku ucapkan itu padamu.

Keluarga Besar, Teman-teman, & Orang-orang baik

Wahai Tuan dan Puan,

Terima kasih atas segala motivasi dan semangat yang selalu diberikan dalam keadaan suka maupun duka, Terima kasih sudah menjadi saksi manusia ini melewati segala prosesnya, dan Terima kasih atas hal-hal baik yang selalu diberikan untuk dapat menyelesaikan skripsi ini.

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Oksidator Kalium Perklorat dan Kalium Periodat terhadap Sifat Termal, Emisi Spektrum, dan Fasa yang Terbentuk pada Piroteknik Berbasis Cu-PVC untuk Aplikasi Suar Merah Muda”. Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana dan melatih mahasiswa untuk dapat berpikir cerdas, kreatif, dan inovatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua.

Bandar Lampung, 10 Mei 2023

Penulis,



Frila Dwi Untari

SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Oksidator Kalium Perklorat dan Kalium Periodat terhadap Sifat Termal, Emisi Spektrum, dan Fasa yang Terbentuk pada Piroteknik Berbasis Cu-PVC untuk Aplikasi Suar Merah Muda”. Penulisan skripsi ini tentu tidak terlepas dari bantuan semua pihak yang tulus membantu, membimbing, dan mendoakan. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, diantaranya:

1. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. selaku Pembimbing I yang telah membimbing, memberikan pemahaman, dan memotivasi dalam penulisan skripsi;
2. Bapak Abdul Basyir, M.Si. selaku Pembimbing II yang senantiasa membimbing, membantu memberikan pemahaman, dan masukan dalam penelitian ini;
3. Ibu Suprihatin, S.Si, M.Si. selaku dosen Pembahas yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyelesaian skripsi ini;
4. Bapak Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si. selaku dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama penulis menempuh perkuliahan;

5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung;
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam;
7. Teman seperjuanganku Indriya Wati, Afifah Zahro, Vivi Savitri, Hilya Sofwatuz Zahra, dan Arin Sadita. Terima kasih atas semangat dan dukungannya selama ini;
8. Orang-orang baik Nurul Istiqomah, Delina Akmelia, Nabila Eka Putri, Annisa Safari Putri, Fatika Almayda, Nur Halisa, Dewi, dan Riana. Terima kasih atas motivasi yang selalu diberikan; dan
9. Teman-teman dan keluarga besar Himafi FMIPA Universitas Lampung.

Serta semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Semoga Allah SWT. Dapat membalas seluruh kebaikan dan mempermudah segala urusannya.

Bandar Lampung, 10 Mei 2023

Penulis,



Frila Dwi Untari

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRACT	i
ABSTRAK	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Komposisi Piroteknik	7

2.2 Material Piroteknik	9
2.2.1 Tembaga (Cu)	9
2.2.2 Kalium Perklorat (KClO ₄)	10
2.2.3 Kalium Periodat (KIO ₄)	11
2.2.4 Polivinil Klorida (PVC)	12
2.3 Sifat Termal	14
2.3.1 <i>Thermogravimetri Analysis</i> (TGA)	14
2.3.2 <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	16
2.4 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	17
2.5 Energi Aktivasi	20
2.6 Spektrometer	22

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan	24
3.3 Prosedur Penelitian	25
3.3.1 Pembuatan Sampel	26
3.3.2 Analisis Sifat Termal	27
3.3.2.1 Karakterisasi TGA	27
3.3.2.2 Karakterisasi DSC	27
3.3.3 Analisis Emisi Spektrum	28
3.3.3.1 Pembuatan Pelet	28
3.3.3.2 Uji Spektrometer	28
3.3.4 Karakterisasi XRD	28
3.4 Diagram Alir Penelitian	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis Termal	30
4.2 Hasil Emisi Spektrum	35
4.3 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	39

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 42

5.2 Saran 43

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Serbuk Tembaga	9
2.2 Kalium Perklorat dalam Bentuk (a) Kristal (b) Serbuk	10
2.3 Kalium Periodat	12
2.4 Serbuk PVC	13
2.5 Reaksi Pembentukan dari PVC	13
2.6 Kurva TGA	15
2.7 Komponen Utama TGA	16
2.8 Termogram DSC	17
2.9 Komponen dan Skema Dasar XRD	18
2.10 Difraksi Sinar-X pada Kristal	19
2.11 Mekanisme Spektrometer	22
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
4.1 Kurva Termogram TGA dan DSC Sampel B1 dan B2	30
4.2 Kurva Emisi Spektrum Sampel B1 dan B2	36
4.3 Diagram Kromatisitas Sampel B1 dan B2	37
4.4 Difraktogram XRD Sampel B1 dan B2	40

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Rentang Panjang Gelombang Dari Warna Spektral	8
2.2 Komposisi Suar Berwarna	9
2.3 Model Reaksi $g(\alpha)$	21
3.1 Bahan-Bahan Penelitian	24
3.2 Alat-Alat Penelitian	25
3.3 Persentase Sampel Penelitian	26
4.1 Suhu dan Kehilangan Massa Sampel B1 dan B2	31
4.2 Model Dekomposisi Energi Aktivasi Sampel B1 dan B2	34
4.3 Hasil Faktor Pre-Ekspensial dan $\log A$ Sampel B1 dan B2	35
4.4 Hasil Karakterisasi TGA dan DSC	35
4.5 Penampang emisi spektrum dan intensitas cahaya secara kualitatif sampel B1 dan B2	38

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material piroteknik merupakan salah satu jenis material *less explosive* yang dapat menghasilkan efek berupa panas, cahaya, bunyi, gas, atau kombinasi dari itu semua (Steinhauser dan Klapotke, 2010). Efek-efek ini dihasilkan oleh reaksi redoks antara pereduksi anorganik dengan oksidator dalam waktu pendek. Komposisi dasar dari piroteknik adalah oksidator (*oxidizer*), bahan bakar (*fuel*), dan komposisi lain seperti bahan pengikat (*binder*), sumber warna (*color source*), dan pewarna (*dye*) tergantung dengan tujuan penggunaan dari komposisi ini (Ineichen dan Berger, 2004). Suar (*flare*) merupakan salah satu aplikasi dari piroteknik yang biasanya digunakan oleh seseorang untuk memberikan sinyal darurat pada pesawat atau pelaut terdekat saat terjadi kecelakaan (Bailey dan Murray, 2000).

Suar menghasilkan cahaya dan warna melalui pembakaran komposisi piroteknik. Material oksidator yang umum digunakan untuk suar adalah strontium nitrat ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$), kalium nitrat (KNO_3), dan kalium perklorat (KClO_4), sedangkan material bahan bakar yang sering digunakan adalah magnesium (Mg) dan aluminium (Al) (Basyir dkk., 2021). Untuk menghasilkan spektrum warna di daerah tampak (380-780 nm), biasa digunakan elemen logam seperti stronsium

(Sr), barium (Ba), tembaga (Cu), dan natrium (Na) (Provatas, 2000). Elemen-elemen ini ketika dipanaskan dengan suhu tertentu akan mengemisikan warna merah, hijau, biru, dan kuning (Steinhauser dan Klapotke, 2010). Oleh karena itu, elemen-elemen ini disebut juga sebagai sumber warna (Sadek dkk., 2017).

Berdasarkan sensitivitas mata, retina mengandung dua jenis elemen fotosensitif, yaitu respon mata fotopik dan skotopik. Respon mata fotopik merupakan respon mata pada siang hari, sedangkan respon mata skotopik merupakan respon mata pada malam hari. Respon mata skotopik lebih sensitif daripada respon mata fotopik, namun kemampuan memisahkan warna kurang baik (Buc dkk., 1993). Dalam aplikasi suar, masing-masing warna cerah seperti merah, jingga, kuning, dan merah muda dapat digunakan sebagai penanda keadaan darurat, misi telah dihentikan, dan kecelakaan lalu lintas, serta dalam dunia hiburan dan militer (Antonis, 2010). Penelitian tentang suar merah, jingga, dan kuning sudah banyak dan sering dilakukan (Juknelevicius dkk., 2014; Sadek dkk., 2017, 2018; dan Basyir dkk., 2021). Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan mengembangkan suar merah muda, selain karena warna merah muda tidak serupa dengan warna-warna yang ada di alam, sehingga lebih mudah untuk diamati oleh mata manusia.

Penelitian tentang suar merah muda pernah dilakukan menggunakan kombinasi antara stronsium nitrat ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$) dan magnesium (Mg-Al) (Shimizu, 1983). Selain itu, Chaves (1990) mengembangkan suar ini menggunakan material 43 % dihydroxylammonium 5,5-Bis-1H-tetrazo-late ($\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_{10}\text{O}_2$), 52 % amonium perklorat (NH_4ClO_4), 2,1 % tembaga (II) Bis-(1(2)H-tetrazol-5-yl) amine dihydrate ($\text{C}_2\text{HN}_9\text{Cu} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), dan 2,9 % kalsium karbonat (CaCO_3). Penelitian

sejenis juga pernah dilakukan oleh Sadek dkk (2018) dengan mencampurkan komposisi suar kuning (27 % aluminium (Al), 61 % natrium nitrat (NaNO_3), dan 12 % gom arab ($\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{NNaO}_4$) dan komposisi suar biru (15 % aluminium (Al), 70 % amonium perklorat (NHClO_4), 8 % tembaga (II) karbonat ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), 7 % polivinil klorida (PVC). Adapun Gluck dkk (2018) membuat suar merah muda dari kombinasi material 57 % amonium perklorat (NHClO_4), 15 % magnesium (Mg-Al), 11 % stronsium sulfat (SrSO_4), 8 % stronsium karbonat (SrCO_3), 4 % parlon ($(\text{C}_4\text{H}_6\text{Cl}_2)_n$), dan 5 % kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$).

Secara umum, penelitian di atas menggunakan material perklorat (kalium atau amonium perklorat) sebagai oksidator. Material ini dapat menghasilkan unsur klorida yang dapat meningkatkan kemurnian warna (Juknelevicius dkk., 2014; Sadek dkk., 2016) dan bersifat non-higroskopis (Conkling dan Mocella, 2019). Namun, material ini bersifat toksik dan tidak ramah lingkungan (Winder, 2001; Shi dkk., 2011; Brusnahan dkk., 2016; Sabatini, 2017). Residu pembakaran dari KClO_4 berupa KCl dan gas HCl dapat mengkontaminasi air dan tanah. Dimana, saat ini belum ditemukan teknologi yang efisien untuk mengatasi kontaminasi perklorat dalam air (Prianto, 2008).

Salah satu upaya yang pernah dilakukan oleh Departemen Pertahanan AS untuk untuk menggantikan senyawa perklorat dalam aplikasi piroteknik adalah penggunaan senyawa nitrat (NO_3^-) (Chen dkk., 2006; Shortridge dkk., 2006; 2007). Akan tetapi, upaya itu kurang optimal. Kualitas suar dan bom kilat yang menggunakan senyawa nitrat (KNO_3) lebih rendah dibandingkan dengan

menggunakan senyawa perklorat (KClO_4). Brusnahan dkk menyatakan bahwa senyawa periodat (KIO_4) adalah senyawa yang potensial untuk menggantikan peran dari KClO_4 sebagai oksidator untuk aplikasi piroteknik. Secara termodinamik senyawa KIO_4 lebih stabil dibandingkan dengan KClO_4 (Cotton dkk., 1999; Moretti dkk., 2014; Brusnahan dkk., 2016). KIO_4 pernah digunakan sebagai oksidator dalam suar merah oleh Moretti dkk (2014), dimana senyawa ini dapat meningkatkan intensitas cahaya dari suar tersebut.

Logam tembaga (Cu) merupakan salah satu bahan bakar dan sumber penghasil warna hijau atau biru (Conkling dan Mocella, 2019; Weingart, 2001). Dalam proses pembakaran, atom Cu dapat bereaksi dengan senyawa radikal hidroksida “OH” atau atom oksigen (O) untuk membentuk CuOH atau CuO (Ripley dan McGriffen, 1962). CuO akan memancarkan emisi spektrum di wilayah merah (Meyerriecks dan Kosanke, 2003). Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan material Cu, diharapkan kombinasi antara CuO dengan garam kalium dapat menghasilkan spektrum emisi merah muda.

Untuk meningkatkan kemurnian warna dalam penelitian ini, material polivinil klorida ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$) digunakan untuk menghasilkan unsur klorin dalam jumlah sedikit, yang dapat digunakan sebagai penguat warna (Juknelevicius dkk., 2015; Army, 1989). Adapun persentase massa dari masing-masing komposisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 15 wt.% untuk material bahan bakar-sumber warna, 70 wt.% untuk material oksidator, dan 15 wt.% material pengikat. Besaran dari persentase ini merujuk pada persentase dari suar ungu dan biru yang sudah ada (Shimizu, 1980; Wilson, 2007).

Berdasarkan penjelasan di atas, mendorong penulis untuk melakukan penelitian mengenai suar merah muda berbasis Cu-PVC-KClO₄/KIO₄. Dimana sifat termal dan kualitas emisi spektrum dari komposisi ini akan dianalisis. Sifat termal ini berkaitan dengan level keamanan dari penggunaan komposisi ini, dimana dari data sifat termal diketahui suhu pengapian, nilai perubahan entalpi, energi aktivasi, dan proses penguraian dari masing-masing komposisi selama proses pembakaran. Karakterisasi yang dilakukan yakni menggunakan *Thermogravimetri Analysis* (TGA), *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dan *X-Ray Diffraction* (XRD), serta analisis emisi spektrum.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang telah dipaparkan di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana sifat termal dari komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC?
2. Bagaimana emisi spektrum yang didapatkan dari komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC?
3. Bagaimana fasa yang terbentuk dari proses penguraian komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC selama proses pembakaran?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui sifat termal dari komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC;

2. Mengetahui hasil emisi spektrum dari komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC; dan
3. Mengetahui fasa yang terbentuk dari proses penguraian komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC selama proses pembakaran.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini meliputi:

1. Analisis sifat termal komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC menggunakan TGA dan DSC;
2. Parameter sifat termal yang dianalisis dalam penelitian ini adalah suhu pengapian, nilai perubahan entalpi (ΔH), energi aktivasi (E), dan model dekomposisi dari proses penguraian masing-masing komposisi selama proses pembakaran;
3. Energi aktivasi diperoleh menggunakan metode *Coats & Redfern*; dan
4. Kualitas warna dari komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC yang diperoleh dari analisis emisi spektrum menggunakan spektrometer.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Dapat menganalisis sifat termal, emisi spektrum, dan fasa selama proses pembakaran dari komposisi piroteknik Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC;
2. Menjadi referensi bagi penelitian berikutnya mengenai suar piroteknik; dan
3. Sebagai alternatif untuk komposisi suar merah muda yang lebih ramah lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposisi Piroteknik

Zat atau campuran zat yang dirancang untuk menghasilkan efek panas, cahaya, suara, dan asap atau biasa dikenal dengan komposisi piroteknik. Hasil panas dan cahaya digunakan untuk suar (*flare*), sedangkan hasil partikel panas dapat digunakan untuk penyalap propelan, dan penghasil cahaya sering digunakan sebagai pencari (*tracer*) dan kepentingan pertunjukan (*artwork*). Untuk menghasilkan cahaya warna, biasa digunakan senyawa logam yang menghasilkan emisi spektrum (Provatas, 2000). Komposisi piroteknik masuk ke dalam bahan peledak, dengan bahan/zat yang terbentuk cair, padat, gas atau campurannya yang apabila dikenai suatu aksi berupa panas, benturan, gesekan akan berubah secara kimiawi menjadi zat-zat lain, perubahannya berlangsung dalam waktu yang sangat singkat yang disertai efek panas dan tekanan yang sangat tinggi. Dalam penggunaannya komposisi piroteknik banyak digunakan untuk kegiatan militer (Ineichen dan Berger, 2004).

Adapun komponen-komponen dalam komposisi piroteknik seperti bahan bakar (*Fuel*), oksidator (*oxidizer*), sumber warna (*color source*), dan bahan pengikat (*binder*). Bahan bakar dapat berasal dari material logam dan non logam, dimana material yang termasuk bahan bakar yang baik adalah material yang tahan terhadap oksidasi dan kelembaban udara (Conkling dan Mocella, 2019). Bahan

bakar yang sering digunakan adalah material-material logam seperti magnesium (Mg), aluminium (Al), titanium (Ti), tembaga (Cu), besi (Fe), dan seng (Zn), sedangkan material non logam seperti karbon (C), belerang (S), silikon (Si), dan boron (B). Adapun material sebagai pengoksidasi atau oksidator, dimana sebagai material oksidator material tersebut memiliki kandungan oksigen yang tinggi, sehingga dapat terurai pada suhu sedang hingga tinggi, dan tingkat higroskopisitas cukup rendah. Pada umumnya dalam komposisi piroteknik oksidator mengandung ikatan Cl-O atau N-O, seperti nitrat (NO_3^-), perklorat (ClO_4^-), stronsium nitrat ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$), kromat barium (BaCrO_4), dan kalsium (Ca). Selain itu, pengikat menjadi komponen yang sangat penting dalam komposisi ini, hal ini karena pengikat dapat mempengaruhi kinerja keseluruhan komposisi walaupun dalam jumlah sedikit dan tanpa pengikat ini semua komponen komposisi akan terpisah karena pengikat ini bertindak seperti lem untuk meyatukan komposisi (Conkling dan Mocella, 2019). Komponen-komponen ini dapat menjadi sumber warna pada komposisi piroteknik dapat dilihat dari spektrum yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Rentang panjang gelombang dari warna spektral (Steinhauser dkk., 2008).

Warna	Panjang Gelombang (nm)
Infrared	>700
Merah	700-610
Kuning	610-570
Hijau	570-500
Biru	500-450
Ungu	450-400
Ultraviolet	<400

Adapun beberapa komposisi warna suar dalam wt % ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Komposisi suar berwarna (Steinhauser dkk., 2008).

Bahan	Merah Biru Tua	Merah	Hijau Biru Tua	Kuning Biru Tua
Mg	24,4	-	21,0	30,3
KClO ₄	20,5	6,0	32,5	21,0
Sr(NO ₃) ₂	34,7	74,0	-	-
Ba(NO ₃) ₂	-	-	22,5	20,0
PVC	11,4	-	12,0	-
Na ₂ C ₂ O ₄	-	-	-	19,8
Cu Powder	-	-	7,0	-
Asphaltum	9,0	-	-	3,9
Binder	-	10,0	5,0	5,0
S _b	-	10,0	-	-

2.2 Material Piroteknik

2.2.1 Tembaga (Cu)

Tembaga memiliki rumus kimia Cu atau nama kimia cupprum, termasuk ke dalam unsur logam yang berbentuk kristal dengan warna kemerahan. Pada tabel periodik unsur, tembaga berada pada posisi nomor atom 29 dan dapat ditemukan di alam, namun pada umumnya ditemukan dalam bentuk senyawa padat dalam bentuk mineral (Natadisastra dkk., 2018).



Gambar 2.1. Serbuk Tembaga.

Gambar 2.1 menunjukkan serbuk tembaga yang berwarna kemerah-merahan. Dimana, unsur ini sangat mudah dibentuk dan lunak, serta memiliki titik leleh pada suhu 1084,62 °C dan titik didih pada 2562 °C. Berdasarkan sifat kimia tembaga dapat bereaksi dengan oksigen membentuk tembaga (II) oksida (CuO) dan atau tembaga (I) oksida (Cu₂O).

2.2.2 Kalium Perklorat (KClO₄)

Kalium perklorat adalah salah satu jenis garam dapur yang memiliki rumus kimia KClO₄. Senyawa ini termasuk ke dalam pengoksidasi kuat, namun pada umumnya bereaksi lambat dengan zat organik, dan biasanya digunakan sebagai pengoksidasi dalam kembang api, tutup perkursi amunisi, bahan peledak, dan propelan. Senyawa ini dapat menggantikan kalium klorat (KClO₃) sebagai kembang api, dikarenakan memiliki tingkat keamanan yang lebih unggul (Conkling dan Mocella, 2019). Kalium perklorat juga merupakan oksidator yang dapat mentransfer oksigen ke bahan yang mudah terbakar dengan bentuk fisik seperti padatan kristal tidak berwarna, ditunjukkan pada Gambar 2.2.



(a)



(b)

Gambar 2.2. Kalium perklorat dalam bentuk (a) kristal (b) serbuk.

Kalium perklorat termasuk bahan kristal putih dan non-higroskopis dengan titik leleh pada suhu 610 °C, jauh lebih tinggi dari titik leleh 356 °C KClO₃. Adapun dekomposisi yang terjadi pada suhu tinggi:



Membentuk kalium klorida dan gas oksigen, dengan kandungan oksigen aktif KClO₄ sebesar 46,2 % adalah salah satu yang tertinggi yang tersedia untuk piroteknik (Conkling dan Mocella, 2019).

2.2.3 Kalium Periodat (KIO₄)

Kalium periodat termasuk ke dalam garam anorganik dengan rumus kimia KIO₄, terdiri dari kation kalium dan anion periodat, dengan sifat fisik berwarna putih, tidak berbau, dan memiliki nilai densitas sebesar 3,618 g/cm³. Kalium periodat termasuk ke dalam senyawa yang stabil, oksidator kuat, mudah terbakar, dan sebagai zat pereduksi kuat, dengan tingkat kelarutan air sebesar 0,42 g/100 mL. Kalium periodat dapat terurai pada suhu 582 °C untuk membentuk kalium iodat dan oksigen. Kelarutan KIO₄ yang rendah membuatnya berguna sebagai pengoksidasi untuk bahan bakar dalam suatu komposisi (Conkling dan Mocella, 2019). Senyawa ini sulit untuk larut dalam air (salah satu garam kalium yang kurang larut, karena anion besar), sehingga memunculkan larutan yang sedikit basa. Ia terurai untuk membentuk kalium iodat, melepaskan gas oksigen (Al-Dhahir dkk., 1992). Senyawa ini merupakan kristal tidak berwarna atau bubuk kristal putih yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3. Kalium Periodat.

Adapun kelemahan dari senyawa ini dimana kalium periodat memiliki harga tiga kali lebih mahal daripada kalium perklorat (Conkling dan Mocella, 2019).

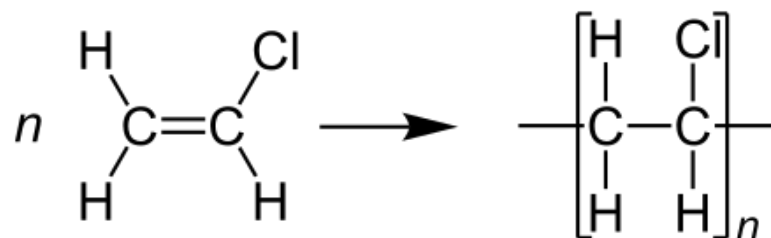
2.2.4 Polivinil Klorida (PVC)

PVC masuk ke dalam urutan ketiga polimer termoplastik dalam jumlah pemakaian di dunia, setelah pemakaian dari pada polietilena dan polipropilena. Di dunia, pemakaian PVC lebih dari 50 % diproduksi untuk bidang konstruksi. PVC memiliki sifat tahan lama, mudah dirangkai, dan juga memiliki harga yang relatif murah. PVC diproduksi menggunakan cara polimerisasi monomer vinil klorida ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$). Sifat yang dimiliki keras dan kaku, sehingga kekuatan benturan baik, mudah untuk disintesis, memiliki bentuk serbuk putih sehingga mudah diolah, mudah terdegradasi akibat panas dan cahaya serta mudah larut dalam suhu kamar (Billmeyer, 1984). Dalam piroteknik biasanya PVC digunakan sebagai pengikat, dimana pengikat ini menjadi komponen penting untuk menahan semua komponen, dapat memberikan kekuatan mekanis untuk ditekan, dan memiliki peran sebagai bahan bakar (Conkling dan Mocella, 2019). Bentuk serbuk dari polivinil klorida ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Serbuk PVC.

PVC termasuk kedalam polimer bertipe termoplastik dengan rumus molekul $(-CH_2 - CHCl -)_n$ dengan titik leleh (*melting point*) pada suhu sekitar $204\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalam kehidupan sehari-hari, kegunaan PVC sebagai pipa plastik, peralatan listrik, atap bangunan dan lain-lain (Umam, 2013). PVC merupakan tepung putih yang memiliki massa jenis $1,4\text{ g/cm}^3$ sehingga memiliki ketahanan terhadap air sangat baik, tidak beracun dan tahan terhadap banyak larutan (Surdia dan Kenji, 1985). PVC memiliki sifat-sifat kimia seperti karakteristik kelarutan, temperatur, dan energi radiasi yang tinggi. Senyawa ini sangat stabil karena berbentuk polimer dengan fasa padatan yang keras sehingga tidak bereaksi terhadap oksidator kuat. Dari segi *safety*, senyawa ini tidak berbahaya dan ramah lingkungan juga bersifat mudah terbakar (Fadlullah dan Sri, 2019). Reaksi pembentukan dari Polivinil klorida ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Reaksi pembentukan dari PVC.

PVC dibuat dengan cara reaksi polimerisasi suspensi atau emulsi monomer vinil klorida ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$) pada suhu 20 °C dan 500 °C (Cowd, 1991). Dari beberapa teknik yang ada, ternyata teknik polimerisasi suspensi adalah teknik polimerisasi yang paling banyak digunakan dalam pembuatan PVC.

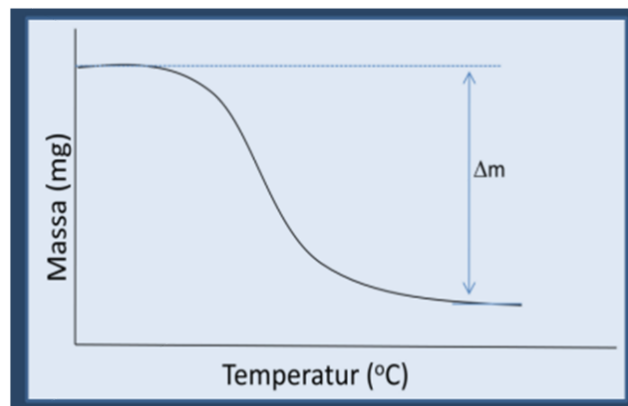
2.3 Sifat Termal

Sifat termal merupakan sifat yang menunjukkan respon material terhadap panas yang diterima suatu material. Untuk mengetahui sifat termal material perlu dilakukan analisis termal. Analisis termal merupakan suatu pengukuran yang dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisik dan kimia dari suatu material dan masuk ke dalam cabang dari ilmu material yang mempelajari perubahan sifat material sebagai fungsi dari suhu. Adapun yang termasuk ke dalam teknik analisis termal, seperti *Thermogravimetri analysis* (TGA) dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

2.3.1 Thermogravimetri Analysis (TGA)

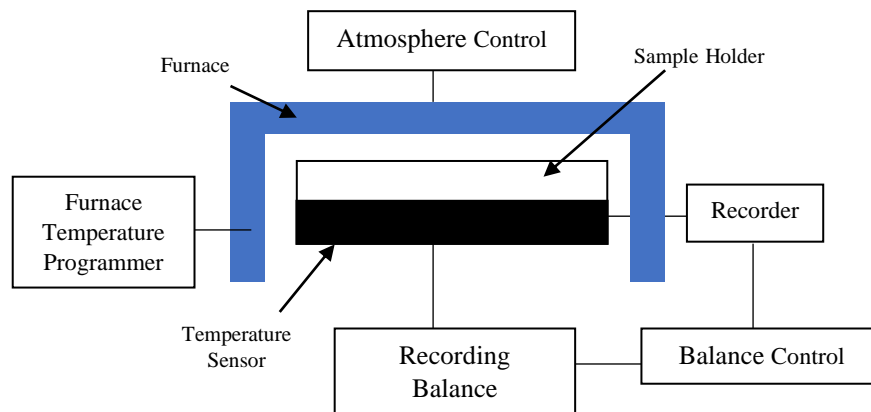
Thermogravimetric analysis (TGA) merupakan analisis untuk mengetahui kehilangan massa sampel selama proses pemanasan. Semakin cepat dan banyaknya kehilangan massa selama analisis mengindikasikan material yang lebih reaktif (Zhao dkk., 2011). Perubahan massa selama proses pengujian TGA disebabkan adanya dekomposisi dari material, yang meliputi demoisturisasi, devolatilisasi, oksidasi ataupun reduksi tergantung dari lingkungan atmosfer sekeliling (Sudarno, 2014).

Prinsip kerja dari metode TGA dengan pemanasan suatu bahan pada tempat khusus dengan suhu dan waktu tertentu, hingga mengalami penurunan pada massanya (Suyitno, 2009). Dalam pengujiannya, material uji diletakkan dalam dapur pemanasan yang dapat dikontrol temperaturnya. Disisi lain material uji juga ditimbang massanya setiap perubahan secara kontinyu. Sedangkan temperatur pemanasan dapat dinaikkan dengan laju tertentu, yang lebih dikenal dengan non-isothermal TGA. Sementara atmosfer disekitar benda uji dapat dikondisikan dalam lingkungan udara atau gas inert (N_2), dengan laju massa tertentu. TGA mengukur dan merekam perubahan massa sampel (Δm) selama proses pemanasan, hal ini terjadi karena adanya perubahan fasa. Perubahan massa kemudian diplot terhadap suhu dan atau waktu (Dewi dkk., 2016), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Kurva TGA.

Adapun komponen utama TGA yaitu pemegang sampel yang terdiri dari termokopel, wadah sampel, *furnace*, program temperatur, dan sistem perekam. Termokopel yang terdapat pada material uji dan pembanding berfungsi untuk menjamin sebuah distribusi panas yang rata (Suherman, 2009) ditunjukkan pada Gambar 2.7.



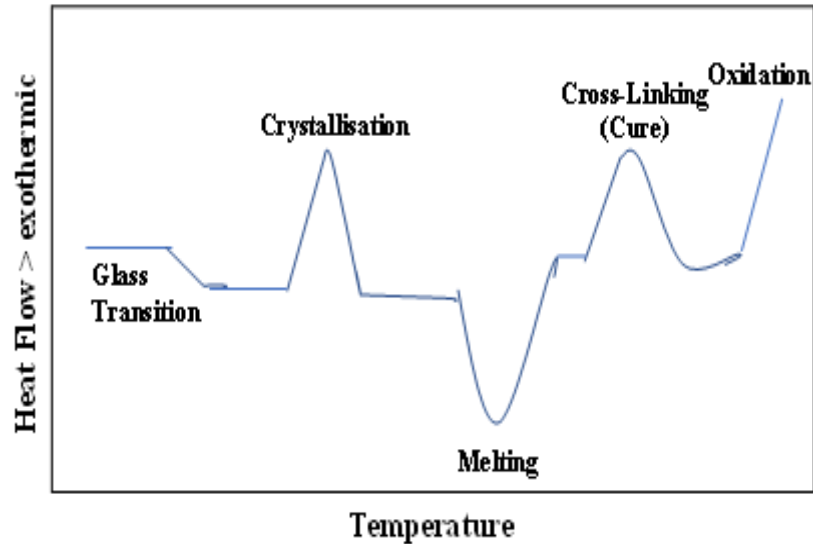
Gambar 2.7. Komponen utama TGA (Brown, 2001).

2.3.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Pada tahun 1964, diperkenalkan DSC sebagai analisis termal. DSC merupakan Teknik termoanalitik dimana perbedaan jumlah panas yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur material dan referensi diukur sebagai fungsi temperatur. Metode ini mirip dengan DTA menghasilkan sinyal ΔT , dengan pengoperasian menghubungkan perangkat keras ke perangkat lunak. Keduanya dihubungkan ke dalam sistem, secara kualitatif mengkonversi dari ΔT ke ΔH (Doggett, 2005).

Teknik DSC bertujuan untuk menganalisis perubahan suatu molekul dengan parameternya adalah perubahan suhu. Energi diberikan secara simultan ke dalam material dan referensi hingga kedua larutan mencapai temperatur yang sama. Perbedaan energi input yang digunakan untuk menyamakan temperatur material dan referensi pada tiap tahap pengamatan merupakan jumlah kelebihan kalor yang diserap (proses endotermik) atau dilepas (proses eksotermik) oleh molekul material (Bintang dkk., 2020). Efek termal berbentuk puncak, ditandai dengan

perubahan entalpi dan kisaran temperatur. Contoh efek termal adalah: meleleh, kristalilasi, transisi padat-padat, dan reaksi kimia.



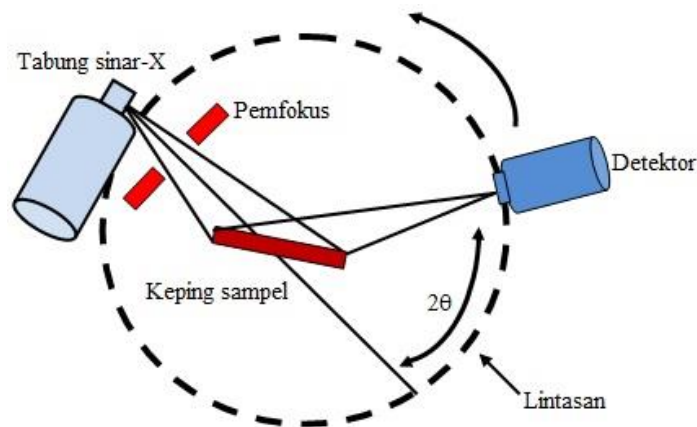
Gambar 2.8. Termogram DSC.

Pada Gambar 2.8 menunjukkan termogram dari DSC, ketika suhu meningkat sampel akhirnya mencapai suhu leleh dan menghasilkan puncak endotermik saat proses peleburan. Termogram DSC ini dapat digunakan untuk menentukan sejumlah sifat-sifat karakteristik sampel, serta untuk mempelajari oksidasi dan juga reaksi kimia lainnya. Prinsip dasar analisis DSC adalah material yang mengalami perubahan fisik seperti transisi fasa, diperlukan perubahan panas yang mengalir dari referensi dan sampel untuk mempertahankan suhu referensi dan sampel agar tetap sama.

2.4 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal dari suatu bahan padat, sehingga akan memunculkan puncak-puncak yang spesifik saat proses analisis. Pada umumnya metode difraksi digunakan untuk

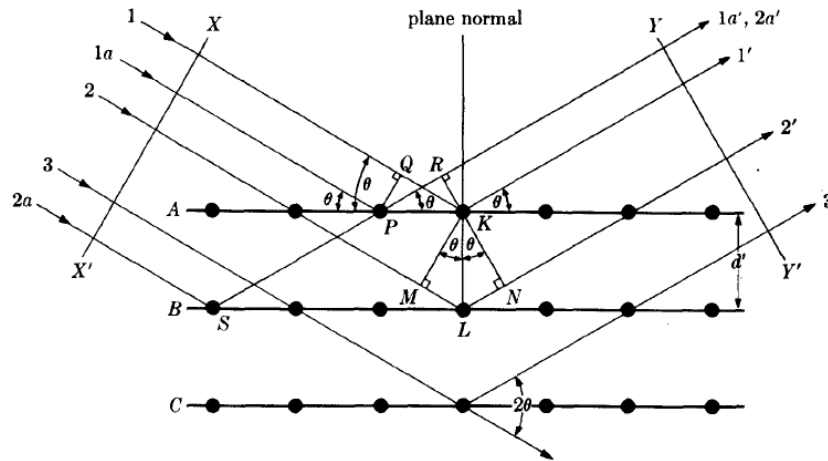
mengidentifikasi senyawa yang belum diketahui yang terkandung dalam suatu padatan dengan cara membandingkan data difraksi dengan *database* yang ada. XRD terdiri atas komponen-komponen penting seperti, tabung sinar-X, detektor, pemfokus dan lain-lain. Adapun komponen dan skema dasar XRD ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Komponen dan skema dasar XRD.

Gambar 2.9 menunjukkan skema spektrometer sinar-X berdasarkan pada analisis Bragg. Seberkas sinar-X jatuh tepat pada kristal dengan sudut θ dengan sebuah detektor diletakkan untuk mencatat sinar yang sudut hamburannya sebesar θ . Saat θ diubah, detektor mencatat puncak intensitas yang sesuai dengan orde n yang digambarkan dalam difraktogram. Apabila sinar-X mengenai suatu sampel, maka intensitas sinar yang ditransmisikan akan lebih rendah dibandingkan dengan intensitas sinar yang datang. Adapun syarat yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi maka dapat dilakukan perhitungan secara matematis sesuai dengan Hukum Bragg (Smallman dan Bishop, 1999). Berikut ini ilustrasi dari difraksi berkas cahaya menurut Hukum

Bragg, difraksi sinar-X akan terjadi pada sudut tertentu sehingga suatu zat akan mempunyai pola difraksi tertentu, ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Difraksi sinar-X pada kristal (Cullity, 1978).

Gambar 2.10 menunjukkan peristiwa difraksi yang terjadi. Sinar 1 dan 1a dalam sinar datang, sinar menumbuk atom K dan P pada bidang atom pertama dan tersebar ke segala arah. Akan tetapi, hanya pada arah 1' dan 1a', sinar-sinar yang tersebar ini benar-benar sefasa sehingga mampu memperkuat satu sama lain atau biasa disebut dengan pola terang (interferensi konstruktif), dimana dapat terbentuk ketika terjadi dari pantulan gelombang-gelombang sinar-X yang saling bertemu. Interferensi konstruktif tersebut terjadi sesuai dengan Hukum Bragg ditunjukkan pada persamaan (2.2).

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (2.2)$$

dimana:

n = adalah orde difraksi.

λ = panjang gelombang sinar-X.

d = jarak antar bidang atom-atom.

θ = sudut berkas datang.

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa jika panjang gelombang sinar-X yang digunakan diketahui dan sudut θ diukur (Budiarto dan Sanjaya, 2019).

2.5 Energi Aktivasi

Energi minimum yang dibutuhkan agar dapat melakukan suatu reaksi dikenal dengan istilah energi aktivasi dengan nama lain energi pengaktifan yaitu energi kinetik minimum yang harus dimiliki molekul-molekul pereaksi agar tumbukan antarmolekul dapat menghasilkan zat hasil reaksi (Muchtaridi dan Justiana, 2007). Energi aktivasi dapat diperoleh dari kurva termogram karakterisasi termal seperti DTA dan TGA. Metode pemodelan kinetika dekomposisi termal yang sering digunakan untuk menentukan nilai energi aktivasi (E) pada data keluaran TGA seperti metode *Coats & Redfern* dan *Flynn Wall Ozawa* sedangkan untuk data keluaran DTA menggunakan metode *Kissinger*.

Metode *Coats & Redfern* merupakan metode yang lebih efisien daripada dua metode lainnya, karena hanya menggunakan satu laju pemanasan. Akan tetapi, metode ini lebih kompleks karena harus menggunakan seluruh model reaksi $g(\alpha)$ yang tersaji pada Tabel 2.3. Penentuan model mekanisme beserta parameter kinetika dapat diperoleh dari persamaan regresi yang mempunyai nilai R^2 terbesar (Purbasari dan Samadhi, 2021). Selain nilai energi aktivasi, dan metode *Coats & Redfern* juga digunakan untuk menentukan pola dekomposisi termal suatu material (Dewi, 2017). Sedangkan untuk mencari nilai α ditunjukkan pada persamaan (2.3).

$$\alpha = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_f} \quad (2.3)$$

Dengan α adalah fraksi massa yang hilang, sedangkan w_0 , w_t , dan w_f adalah massa komposisi sebelum proses dekomposisi, massa komposisi selama proses dekomposisi, dan massa komposisi setelah proses dekomposisi.

Tabel 2.3. Model reaksi $g(\alpha)$ (Wang dkk., 2003; Kahrizsangi dan Abbasi, 2008; Elmay dkk., 2016)

	Model Reaksi	$g(\alpha)$
P1	Power Law 1	α^1
P2	Power Law 2	$\alpha^{1/2}$
P3	Power Law 3	$\alpha^{1/3}$
P4	Power Law 4	$\alpha^{1/4}$
P5	Power Law 5	$\alpha^{3/2}$
A2	Avrami-Erofeev 1	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$
A3	Avrami-Erofeev 2	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$
A4	Avrami-Erofeev 3	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$
D1	One dimensional diffusion	α^2
D2	Two dimensional diffusion	$(1 - \alpha)\ln(1 - \alpha) + \alpha$
D3	Three Diffusion Jander	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$
D4	Ginstling-Brouhstein	$1-(2/3)\alpha-(1-\alpha)^{2/3}$
F1	Chemical Reaction (first order)	$-\ln(1-\alpha)$
F2	Chemical Reaction (second order)	$(1-\alpha)^{-1}-1$
F3	Chemical Reaction (third order)	$[(1-\alpha)^{-2}-1]/2$
C2	Contracting Sphere	$1-(1-\alpha)^{1/2}$
C3	Contracting cylinder	$1-(1-\alpha)^{1/3}$
R2	Contracting area	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$
R3	Contracting volume	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$

Adapun persamaan metode *Coats & Redfern* menggunakan persamaan (2.4).

$$\ln \frac{g(\alpha)}{T^2} = \ln \frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (2.4)$$

Dengan $g(\alpha)$ merupakan persamaan model reaksi, sedangkan A, R, E, dan T secara berurut adalah faktor pre-eksponensial (s^{-1}), konstanta gas ideal (8,314 J

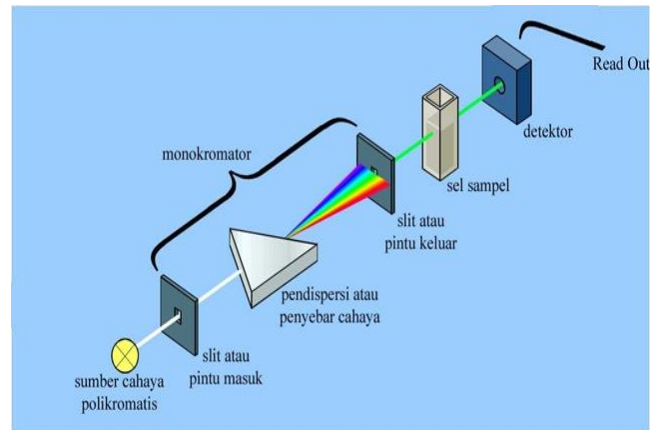
$\text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$), energi aktivasi (kJ/mol), dan suhu (K). Adapun persamaan untuk faktor pre-eksponensial ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$-\ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) = \text{intersep} \quad (2.5)$$

Energi aktivasi untuk setiap proses dekomposisi yang ditampilkan dalam Tabel 2.3 dapat ditentukan dari plot $\ln \frac{g(\alpha)}{T^2}$ versus $\frac{1}{T}$, dengan β adalah laju pemanasan dan $g(\alpha)$ adalah laju konversi tetap (Dewi, 2017).

2.6 Spektrometer

Spektrometer merupakan piranti atau alat optik yang digunakan untuk menghasilkan sinar dari spektrum dengan panjang gelombang tertentu (Gandjar dan Rohman, 2007). Spektrometer juga memiliki fungsi untuk mengidentifikasi molekul atau atom, dimana setiap molekul atau atom memiliki karakteristik spektrum yang berbeda-beda dan untuk menentukan konsentrasi, panjang gelombang serapan maksimum dan nilai absorbansi atau transmitansi sinar pada sampel larutan. Dalam spektrometer, terdapat sumber cahaya berupa lampu (Tungsten, Deutrium atau Wolfram), selanjutnya kolimator untuk memotong sinar yang menyebar, prisma berfungsi untuk menyeleksi spektrum cahaya atau dapat juga menggunakan grating atau kisi, dan detektor untuk menangkap cahaya yang ditransmisikan oleh sampel (Afandi dan Purwanto, 2018). Adapun skematis spektrometer ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Mekanisme Spektrometer.

Prinsip kerja dari spektrometer dimana cahaya yang berasal dari lampu diteruskan melalui lensa menuju ke monokromator, kemudian cahaya ini diubah dari polikromatis menjadi cahaya monokromatis, kemudian berkas cahaya dilewatkan pada sampel yang mengandung zat dengan konsentrasi tertentu. Cahaya yang terbentuk ada yang diabsorpsi dan dilewatkan, cahaya yang diterima kemudian dihitung untuk mengetahui cahaya yang terserap oleh sampel (Gandjar dan Rohman, 2007).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada 20 November 2022 – 20 Januari 2023 yang bertempat di satuan kerja Pusat Riset Material Maju-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan-bahan dan alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1. dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1. Bahan-bahan penelitian.

No	Nama Bahan	Fungsi
1	Tembaga (Cu)	Sebagai bahan bakar dan sumber warna
2	Kalium Perklorat (KClO ₄)	Sebagai oksidator
3	Kalium Periodat (KIO ₄)	Sebagai oksidator
4	Polivinil Klorida (PVC)	Sebagai pengikat dan penguat warna

Tabel 3.2. Alat-alat penelitian.

No	Nama Alat	Fungsi
1	Neraca analitik tipe KERN 220-4N	Mengukur massa serbuk sampel
2	Kertas saring	Tempat meletakkan bahan-bahan sampel
3	Spatula	Mengaduk dan memindahkan serbuk sampel
4	<i>Tube</i> alumina	Tempat meletakkan serbuk dalam proses <i>milling</i>
5	<i>Planetary Ball Mill</i> 4000ℓ	Mencampurkan semua bahan sampel
6	<i>Automatic press</i> tipe <i>Carver Auto Series NE</i>	Membuat serbuk sampel menjadi pelet
7	Spektrometer Seri Maya 2000 pro	Melihat spektrum cahaya dari sampel
8	<i>X Ray Diffraction Rigaku</i> <i>Smartlab</i>	Identifikasi dan analisis fasa sampel
9	<i>Thermogravimetric</i> SETARAM- <i>Simultaneous</i> <i>Thermal Analyzer</i>	Menganalisis massa bahan yang bereaksi saat suhu meningkat
10	<i>Differential Scanning</i> Calorimetry SETARAM- <i>Simultaneous Thermal</i> <i>Analyzer</i>	Menganalisis proses eksotermik dan endotermik saat proses pembakaran

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini meliputi proses pembuatan sampel, analisis sifat termal, analisis emisi spektrum, dan karakterisasi fasa pada residu pembakaran untuk komposisi Cu-KClO₄-PVC dan Cu-KIO₄-PVC.

3.3.1 Pembuatan Sampel

Pembuatan sampel pada penelitian ini menggunakan metode *milling*, dengan prosedur yang dilakukan untuk membuat sampel adalah:

1. Timbang serbuk Cu sebanyak 1,2 g;
2. Timbang serbuk PVC sebanyak masing-masing 1,2 g;
3. Kemudian masukan semua bahan yang sudah ditimbang kedalam *tube* alumina;
4. Masukkan bola-bola alumina dengan perbandingan 1 : 9 dengan serbuk;
5. Masukkan kedalam mesin *milling* selama 10 menit dengan kecepatan 130 rpm;
6. Masukkan serbuk KClO_4 atau KIO_4 sebanyak 5,6 g kedalam *tube* alumina yang sudah di *milling*;
7. *Milling* kembali *tube* alumina selama 5 menit, dengan kecepatan 75 rpm; dan
8. Keluarkan serbuk yang sudah di *milling*.

Pada penelitian ini menggunakan 2 komposisi dengan persentase massa yang berbeda, sehingga dapat ditulis sampel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Persentase Sampel Penelitian.

Sampel	Komposisi	% massa			
		Cu	KClO_4	KIO_4	PVC
B1	Cu- KClO_4 -PVC	15	70	-	15
B2	Cu- KIO_4 -PVC	15	-	70	15

3.3.2 Analisis Sifat Termal

Prosedur penelitian dibagi menjadi dua tahap, yaitu: Karakterisasi TGA dan DSC.

3.3.2.1 Karakterisasi TGA

Prosedur yang dilakukan pada karakterisasi TGA adalah:

1. Sampel ditimbang masing-masing sebanyak 0,3 g;
2. Sampel dimasukkan ke dalam plastik klip, tempelkan label nama komposisi pada plastik klip; dan
3. Sampel dimasukkan ke dalam layanan karakterisasi TGA menggunakan alat SETARAM-*Simultaneous Thermal Analyzer*. Sampel di karakterisasi dari suhu 20-1000 °C dengan laju pemanasan sebesar 20 °C/menit di dalam ruang yang dialiri gas nitrogen.

3.3.2.2 Karakterisasi DSC

Prosedur yang dilakukan pada karakterisasi DSC adalah:

1. Sampel ditimbang masing-masing sebanyak 0,3 g;
2. Sampel dimasukkan ke dalam plastik klip, tempelkan label nama komposisi pada plastik klip;
3. Sampel dimasukkan ke dalam layanan karakterisasi DSC menggunakan alat SETARAM-*Simultaneous Thermal Analyzer*. Sampel di karakterisasi dari suhu 20-1000 °C dengan laju pemanasan sebesar 20 °C/menit di dalam ruang yang dialiri gas nitrogen; dan
4. Hitung perubahan entalpi proses (ΔH) dengan menggunakan persamaan (3.1).

$$\Delta H = \frac{A \times K}{m} \quad (3.1)$$

Dengan A merupakan area di bawah puncak, K adalah koefisien kalibrasi, dan m merupakan massa awal sampel.

3.3.3 Analisis Emisi Spektrum

Prosedur penelitian dibagi menjadi dua tahap, yaitu: Pembuatan pelet dan analisis emisi spektrum.

3.3.3.1 Pembuatan Pelet

Prosedur yang dilakukan pada pembuatan pelet adalah:

1. Sampel ditimbang masing-masing sebanyak 1 g; dan
2. Sampel dimasukkan ke alat *Automatic press* tipe *Carver Auto Series NE* dengan tekanan 5 ton selama 5 detik.

3.3.3.2 Uji Spektrometer

Prosedur yang dilakukan pada uji spektrum adalah:

1. Pelet setiap sampel diletakkan didalam terowongan gelap;
2. Spektrometer diletakkan 1 meter didepan terowongan gelap;
3. Pelet dibakar menggunakan tabung *Liquified Butane Fuel*; dan
4. Spektrometer menangkap gelombang tampak yang diemisikan oleh pelet.

3.3.4 Karakterisasi XRD

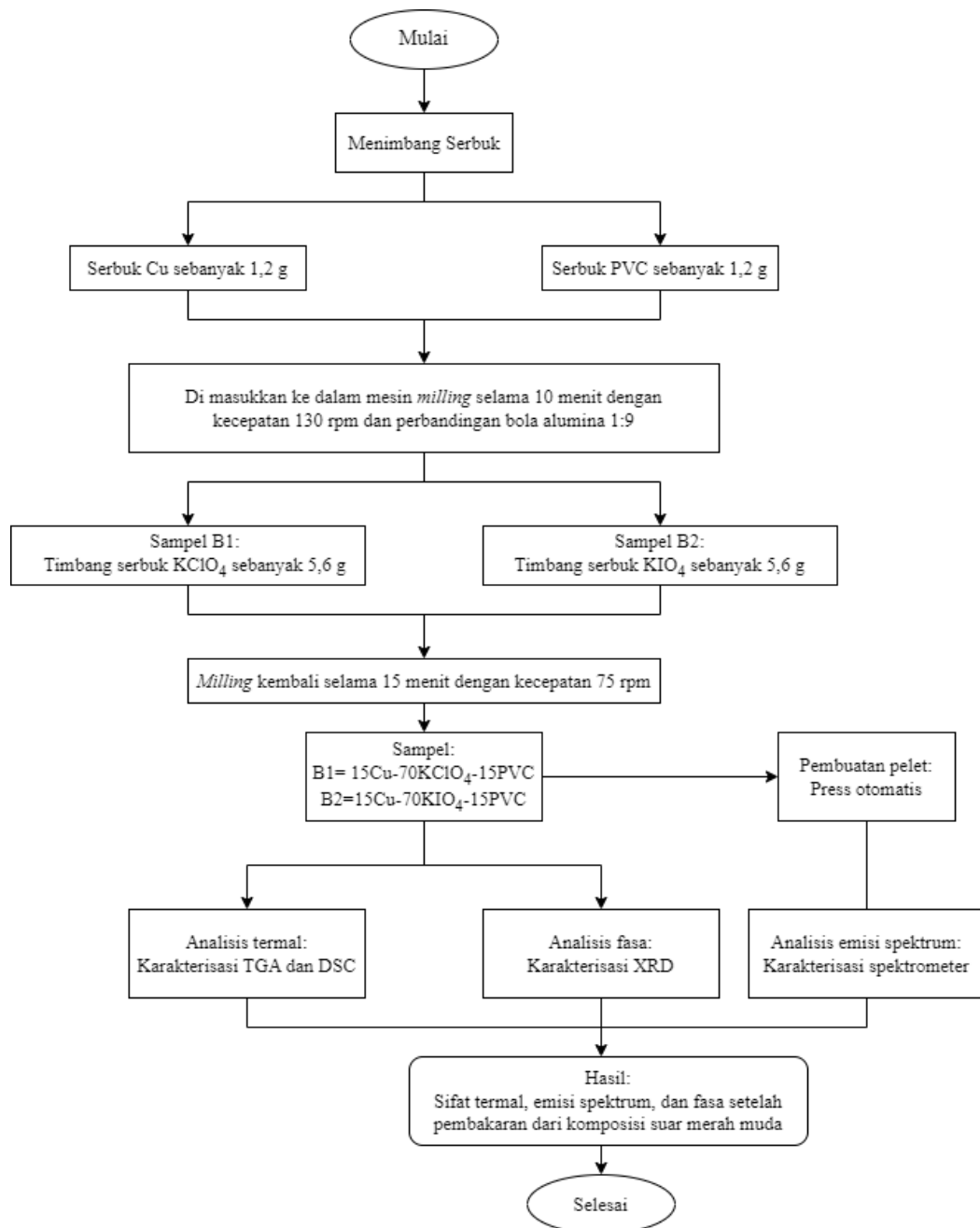
Prosedur yang dilakukan pada karakterisasi XRD adalah:

1. Sampel ditimbang masing-masing sebanyak 1 g;
2. Sampel dimasukkan ke dalam plastik klip, tempelkan label nama komposisi pada plastik klip; dan

3. Sampel dimasukkan kedalam layanan karakterisasi XRD menggunakan alat *X-Ray Diffraction Rigaku Smartlab*, dengan tabung *X-ray Cu-Ka* dengan 2theta antara $10-120^\circ$, dan kecepatan pindai sebesar $5^\circ/\text{menit}$.

3.4 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

1. Sampel B1 memiliki suhu pengapian pada suhu 294,06 °C sedangkan sampel B2 pada suhu 285,33 °C, dengan nilai perubahan entalpi sampel B1 sebesar 153,740 kJ/mol dan sampel B2 sebesar 139,530 kJ/mol, dan juga diperoleh energi aktivasi dari sampel B1 sebesar 201,881 kJ/mol dan 307,003 kJ/mol dengan model *diffusion controlled Ginstling-Brouhstein*, sedangkan sampel B2 sebesar 291,181 kJ/mol dan 192,486 kJ/mol dengan model dekomposisi *chemical reaction third order* dan *second order*. Berdasarkan parameter kinetika dekomposisi termal sampel B1 memiliki stabilitas termal yang lebih baik dari pada sampel B2.
2. Emisi spektrum sampel B1 dengan panjang gelombang pada rentang 436-500 nm memancarkan warna ungu dan biru dan pada rentang 606-635 nm warna merah. Sedangkan sampel B2 dengan panjang gelombang rentang 468-534 nm memancarkan warna biru dan ungu dan pada rentang 642-658 nm warna merah. Pencampuran warna biru dan merah menghasilkan nyala api warna merah muda (*pink*), dan diperoleh bahwa intensitas sampel B2 lebih tinggi dibandingkan sampel B1.

3. Setelah proses pembakaran sampel B1 didominasi oleh fasa *dipotassium copper(I) chloride* (K_2CuCl_3) dan fasa *sylvine* atau *potassium chloride* (KCl) serta fasa *dicopper(I) oxide* (Cu_2O), sedangkan sampel B2 didominasi oleh fasa *potassium iodide* (KI) dan *gamma* (CuI) atau *copper(I) iodide*, serta fasa *sylvine* (KCl) dan *copper oxide* (CuO).

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat memvariasikan persentase massa dari komposisi Cu-KIO₄-PVC untuk memperoleh stabilitas termal yang lebih baik dari komposisi yang menggunakan KClO₄.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Dhahir, T.A., Dhanaraj, G., dan Bhat, H.L. 1992. Growth of alkali metal periodate from silica gel and their characterization. *Journal of Crystal Growth*. Vol. 121. No. 1-2. Hal. 132–140.
- Afandi, R. dan Purwanto, A. 2018. Spektrofotometer Cahaya Tampak Sederhana untuk Menentukan Panjang Gelombang Serapan Maksimum Larutan $\text{Fe}(\text{SCN})_3$ dan CuSO_4 . *Spektrometer cahaya tampak*. Vol.2. Hal. 161-166.
- Antonis, K.D. 2010. *ChemMatters Space Food*. <https://www.acs.org/chemmatters> diakses pada tanggal 18 Oktober 2022 pukul 22.00.
- Aravind, S.L., Sivapirakasam, S.P., Balasubramanian, K.R., dan Sutionarayanan, M. 2020. *Thermo-Konetic Studies On Azodicarbonamide/Potassium Periodate Airbag Gas Generants*. Vol. 144. No. 5. Hal. 15-22.
- Ardaniswari, D.W., Josalina, Haritsah, H., dan Sembiring, S. 2020. Karakteristik Termal dan Fungsionalitas Komposit Silika Sekam Padi Dengan Aspal. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Vol. 8. No. 1. Hal. 101-110.
- Army. 1989. *Military Explosives. Headquarters*. USDot. Department of the Army.
- Asri, N.S., Basyir, A., Aryanto, D., Isnaeni., Sagita, D., Widayatno, W.B., Wismogroho, A.S., dan Lesmana, D., 2022. Novel CaCO_3 -based material formulation for orange-colored spectrum tracer projectile. *Trends In Sciences*. Vol. 19. No. 22. Hal. 1-13.
- Bailey, A., dan Murray, S.G. 2000. Pyrotechnics, in: Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Brassey.
- Basyir, A., Asri, N.S., Aryanto, D., Isnaeni, Firdharini, C., Widayatno, W.B., dan Wismogroho, A.S. Sn-CuO-Arabic Gum Composition for Red Tracer Projectile Ammunition Potential. 2021. *Jurnal Pertahanan*. Vol. 7. No.1. Hal. 18-28.
- Billmeyer, F.W. 1984. *Textbook of Polimer Sciense*. 3rd Edition. John Willey and Sons. Inc. Singapore.

- Bintang, M., Fri, R., Ukhradiya, M.S., dan Dimas, A. 2020. *Biokimia Fisik*. IPB Press. Bogor.
- Blaine, G. 2015. *Practical Aspects of Kinetics Determination by Thermal Analysis*. TAWebinar by TA Instruments, <https://www.youtube.com/watch?v=ofsy6Ggj4PY> diakses pada 30 Januari 2023.
- Breusov, O.N., Kashina, N.J., dan Rezvina, T.V. 1970. Thermal Decomposition of Chlorates, Bromates, Iodates, Perchlorates and Periodates of Potassium, Rubidium and Cesium. *Zh Neorg Khim*. Vol. 15. Hal. 612-614.
- Brusnahan, J.S., Shaw, A.P., Moretti, J.D., dan Eck, W. 2016. Periodates as Potential Replacements for Perchlorates in Pyrotechnic Compositions. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*. Vol. 42. No. 1. Hal. 62-70.
- Brown, D.H. 2001. *Teaching by Principles*, 2nd. Longman. New York.
- Buc, S. M., Adelman, G., dan Adelman, S. 1993. *Development of Alternate 7.62 mm Tracer Formulations*. Vol. OMB. No. 07. <https://doi.org/10.1090/dimacs/029/2>.
- Budiarto, S., dan Sanjaya, U. 2019. *Sintesis Paduan Aluminium (6061) Dengan Metalurgi Serbuk Dan Proses T6 Untuk Bahan Fin Roket*. Fakultas Teknik. Program Study Teknik Mesin. Universitas Kristen Indonesia. Jakarta.
- Chaves, J.W. 1990. Blue Strobe Light Pyrotechnic Composition. *Pyrotechnica*. Vol. 14. No. 1. Hal. 33-45.
- Chen, M. Motyka, J., dan Wejsa. 2006. *Perchlorate Free Pyrotechnic Composition and its Application in M115A2 Ground Burst Simulator and M116A1. Hand Grenade Simulator, 33rd International Pyrotechnics Society Seminar*. Fort Collins. CO. USA.
- Conkling, J.A., dan Mocella. C. 2019. *Color and light production, in: Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory, 3rd ed*. CRC Press.
- Cotton, F.A., Wilkinson, G., Murillo, C.A., dan Bochmann, M., 1999. *Advanced Inorganic Chemistry, 6th ed*. New York.
- Cowd, M.A. 1991. *Kimia Polimer*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Cullity, B.D. 1978. *Elements of X-Ray Diffraction, 2nd ed*. Addison-Wesley Publishing Company. USA.
- Dewi, W.U., dan Ismah, Y.A. 2016. Dekomposisi Termal Propelan Komposit Berbasis Ammonium Perklorat/ Hydroxy Terminated Polybutadiene (AP/HTPB). *Jurnal Teknologi Dirgantara*. Vol. 14. No. 1. Hal. 17-24.

- Dewi, W.U. 2017. Evaluasi Kinetika Dekomposisi Termal Propelan Komposit AP/HTPB Dengan Metode Kissinger, Flynn Wall Ozawa Dan Coats-Redfern. *Jurnal Teknologi Dirgantara*. Vol. 15. No. 2. Hal. 115-132.
- Doggett, A.M. 2005. Root Cause Analysis: A Framework for Tool Selection. *The Quality Management Journal*. Vol. 12. No. 4. Hal. 34-45.
- Ellern, H., 1968. *Military and Civilian Pyrotechnics*. Chemical Publishing Company Inc. New York.
- Elmay, Y., Jeguirim, M., Trouve, G., dan Said, R. 2016. Kinetic analysis of thermal decomposition of date palm residues using coats-redfern method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Vol. 38. No. 8. Hal. 1117-1124.
- Fadlullah, F.G., dan Sri, I.M. 2019. *Pra Rancangan Pabrik Polyvinyl Chloride Dari Vinyl Chloride Monomer Kapasitas 85.000 Ton/Tahun*. Fakultas Teknologi Industry. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Islam Negeri. Yogyakarta.
- Gandjar, I.G., dan Rohman, A. 2007. *Kimia Farmasi Analisis*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Gluck, J., Klapotke, T.M., dan Sabatani, J.J. 2018. Flare Of Strobe: A Tunable Chlorine-Free Pyrotechnic System Based on Lithium Nitrate. *Journal Communication*. Vol. 54. No. 7. Hal. 821-824.
- Grobler, J.M., Focke, W.W., Derrick, N.P., Oberholster, A.J., Kelly, C., dan Labuschagn, G. 2020. Sensiting The Micron-Sized Alumunium/Potassium Periodate Thermite. *Journal of Energetic Materials*. Vol. 38. No. 4. Hal. 455-466.
- Ineichen, H., dan Berger, B. 2004. Pyrotechnics in Fireworks. *Chimia*. Vol. 58. No. 6. Hal. 369-373.
- Juknelevicius, D., Mikoliunalte, L., Sakirzanovas, S., Kubilius, R., dan Ramanavicius, A. 2014. A Spectrophotometric Study of Red Pyrotechnic Flame Properties Using Three Classical Oxidizers; Ammonium Perchorate, Potassium Perchlorate, Potassium Chlorate. *KAPI*. Vol. 640. No. 12-13. Hal. 2560-2565.
- Juknelevicius, D., Karvinen, E., Klapotke, T.M., Kubilius, R., Ramanavicius, A., dan Rusan, M., 2015. Copper(I) bromida: An alternative emitter for blue-colored flame pyrotechnics. *Chemisrty A European Journal*. Vol. 21. No. 43. Hal. 15354-15359.
- Juknelevicius, D., Kubilius, R., Ramanavicius, A. 2015. Oxidizer ratio and oxygen balance influence on the emission spectra of green-colored pyrotechnic flames. *European Journal of Inorganic Chemistry*. Vol. 33. No. 1. Hal. 5511-5515.

- Kahrizsangi, R.E., dan Abbasi, M.H. 2008. Evaluation of Reliability of Coats-Redfern Method for Kinetic Analysis of Non-Isothermal TGA. *Journal Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 18. No. 1. Hal. 217-221.
- Kamali, A.R., Razavizadeh, H., dan Hadavi, S.M.M. 2007. A Process for Production of Titanium Aluminide: Reaction Mechanism. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. Vol. 16. No. 3. Hal. 199-124.
- Klapotke, T.M., Rusan, M., dan Sabatini, J.J., 2014. Chlorine-free pyrotechnics: Copper(I) iodide as a “green” blue-light emitter. *Angewandte Chemie International Edition*. Vol. 53. No. 36. Hal. 9665-9668.
- Ma, X., Zhao, W., Le, W., Li, J., Chen, P., dan Jiao, Q. 2021. Synergistic Effect of Potassium Oxysalts on Combustion and Ignition of Al/CuO Composites. *Article Nanomaterials*. Vol. 11. No. 12. Hal. 3-12.
- Mayasari, H.E. dan Wirapraja, A.G. 2019. Karakteristik dan Kinetika Dekomposisi Termal Komposit CR/NR dengan Substitusi Bahan Pengisi. *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*. Vol. 2. No. 2. Hal. 59-63.
- Meyerriecks, W., dan Kosanke, K. 2003. Color Values and Spectra of the Principal Emitters in Colored Flames. *Journal of Pyrotechnics*. Vol. 8. No. 18. Hal. 710–731.
- Moretti, J.D., Sabatini, J.J., dan Chen, G. 2012. Periodate salts as pyrotechnics oxidizers: Development of barium-and perchlorate-free incendiary formulations. *Energetic Materials*. Vol. 124. No. 28. Hal. 7087-7089.
- Moretti, Sabatini, J.J., dan Potret, J.C. 2014. High-Performing Red Light-Emitting Pyrotechnic Illuminants Through the use of Perchlorate-Free Materials. *Chemistry A European Journal*. Vol. 20. No. 28. Hal. 8800-8804.
- Muchtaridi, A., dan Justiana, S. 2007. *Kimia 2 SMA Kelas XI*. Penerbit Yudhistira. Jakarta.
- Natadisastra, G.G., Hasan, Z., Sriati, dan Lili, W. 2018. Kemampuan penyerapan logam berat tembaga (Cu) pada akar *avicennia marina* di perairan karangsong, kabupaten indramayu. *Jurnal perikanan dan kelautan*. Vol. 9. No. 2. Hal. 41-48.
- Prabhumirashi, L.S., dan Khoje, J.K. 2002. TGA and DTA Studies On En And Tm Complexes of Cu(II) Chloride, Nitrate, Sulphate, Acetate and Oxalate. *Thermochimica Acta*. Vol. 383. No. 1-2. Hal. 109-118.
- Prianto, B. 2008. Produksi Ammonium Perklorat (NH_4ClO_4) Sebagai Symbol Kemajuan Teknologi Roket Dan Rudal. *Jurnal Berita Dirgantara*. Vol. 9. No. 1. Hal. 1-5.

- Provatas. 2000. *Energetic Polymers and Plasticisers for Explosive Formulations – A review of recent advances*. DSTO Technical Report Nr. TR-0966.
- Purbasari, A., dan Samadhi, T. W. 2021. Kajian Dehidroksilasi Termal Kaolin menjadi Metakaolin menggunakan Analisis Termogravimetri. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. Vol. 17. No. 1. Hal. 105-112.
- Ripley, W., dan McGriffen, J. 1962. *Investigation of Visibility and Formulation of Ashless Blue Flare*. Dokumen DTIC.
- Sabatini, J.J. 2017. A Review of Illuminating Pyrotechnics. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*. Vol. 10. No. 2. Hal. 6-55.
- Sadek, R., Kassem, M., Abdo, M., dan Elbasuney, S. 2016. Spectrally adapted red flares with enhanced color quality and luminous intensity. *Proceeding of the 8th ICEE Conference*, Cairo: 19-21 April 2016. Hal. 282-303.
- Sadek, R., Kassem, M., Abdo, M., dan Elbasuney, S. 2017. Novel Yellow Colored Flame Compositions with Superior Spectral Performance. *Defence Technology*. Vol. 13. No. 1. Hal. 33-39.
- Sadek, R., Kassem, M., Abdo, M., Fahd, A., dan Sherif, E. 2018. Novel Blue flare tracer with enhanced color quality and luminous intensity. *Journal of Luminescence*. Vol. 195. Hal. 8-13.
- Sadek, R., Kassem, M., Abdo, M., Fahd, A., Tantawy, H., Elsaidy, A., dan Elbasuney, S. 2018. Novel Colored Flames Via Chromaticity of Essential Colors. *Defence Technology*. Vol. 15. No. 2. Hal. 210-215.
- Shamsipur, M., Pourmortazavi, S.M., dan Hajimirsadeghi, S.S. 2011. An Investigation on Decomposition Kinetics and Thermal Properties of Copper-Fueled Pyrotechnic Compositions. *Combust Sci And Tech*. Vol. 183. No. 8. Hal. 575-587.
- Shimizu, T. 1980. Studies on Blue and Purple Flame Compositions Made with Potassium Perchlorate. *Pyrotechnica*. Vol. 6. No. 1. Hal. 1-8.
- Shimizu, T. 1983. The Critical Burning of Pyrotechnic Compositions. *Originally Appeared in Pyroteknikdagen*. Vol. 2. Hal. 1-20.
- Shi, Y., Zang, N., Gao, J., Li, X., dan Cai, Y. 2011. Effect Of Fireworks Display on Perchlorate in Air Aerosols During the Spring Festival. *Journal Elsevier*. Vol. 45. No. 6. Hal. 1323-1327.
- Shi, S. dan Zhao, L. 2014. Effect of Humidity on the Thermal Stability of Red Pyrotechnic Composition. *Advanced Materials Research*. Vol. 1030-1032. Hal. 52-55.

- Shortridge, R.G., Wilharm, C.K., Yamamoto, C.M., dan Dreizin, E.L. 2006. *Development and Testing of Perchlorate-Free Red and Green Pyrotechnic Flare Compositions 33rd International Pyrotechnics Society Seminar*. Fort Collins. CO. USA.
- Shortridge, R.G., Wilharm, C.K., dan Yamamoto, C.M. 2007. *Elimination of Perchlorate Oxidizers from Pyrotechnic Flare Compositions, Defense Technical Information Center (DTIC)*. Fort Belvoir. VA. USA.
- Smallman, R.E., dan Bishop, R.J. 1999. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Songping, W., dan Shuyuan, M. 2006. Preparation of Micro Size Copper Powder with Chemical Reduction Method. *Journal Material Letters*. Vol. 60. No. 20. Hal. 2438-2442.
- Steinhauser, G., dan Klapotke, T.M. 2008. "Green" Pyrotechnics: A Chemists' Challenge. *Angew Chem*. Vol. 47. No. 18. Hal. 3330-3347.
- Steinhauser, G., dan Klapotke, T.M. 2010. Using the chemistry of fireworks to engage students in learning basic chemical principles: A lesson in eco-friendly pyrotechnics. *Journal of Chemical Education*. Vol. 87. No. 2. Hal. 150-156.
- Sudarno. 2014. *Karakterisasi Serbuk Gergaji dan Campurannya di Bawah Kondisi Isothermal dan Non-Isothermal*. Pascasarjana. Teknik Mesin. Universitas Negeri Semarang. Surakarta.
- Suherman. 2009. *Karakteristik Fungsionalitas dan Termal Bahan Keramik Cordierite (Mg₂Al₄Si₅O₁₈) Berbasis Silika Sekam Padi Akibat Perlakuan Kalsinasi*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Sulakhudin, S.P. 2019. *Kimia Dasar Konsep dan Aplikasi dalam Ilmu Tanah*. Deepublish. Yogyakarta.
- Surdia, T., dan Kenji, J. 1985. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Edisi ke-4. PT. Pradnya Paramita. Jakarta.
- Suyitno. 2009. Perumusan Laju Reaksi Dan Sifat-Sifat Pirolisis Lambat Sekam Padi Menggunakan Metode Analisis Termogravimetri. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 11. No. 1. Hal. 12-18.
- Umam, M.K. 2013. *Pengaruh Pemanasan dan Perubahan Bentuk pada Kekuatan*. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin FT*. Vol. 11. No. 2. Hal. 1-7.
- Wang, X., Ke-Ke, Y., Yu-Zhong, W., Bo, W., Ya, L., dan Bing, Y. 2003. Thermogravimetric Analysis of The Decomposition of Poly(1,4-dioxan-2-one)/ Strach Blends. *Journal Polymer Degradation and Stability*. Vol. 81. No. 3. Hal. 415-421.

Weingart, G.W. 2001. *Pyrotechnics*. Survival Press. USA.

Wilson, C. 2007. *Cannonfuse: Collection of Pyrotechnic Compositions*. PML. USA.

Winder, C., 2001. The toxicology of chlorine. *Environmental Research Section*. Vol. 85. Hal. 105-114.

Zhao, Y., Hu, H., Jin, L., dan Bo, W. 2011. Pyrolysis Behavior of Vitrinite and Inertinite from Chinese Pingshuo Coal by TG-MS and in A Fixed Bed Reactor. *Fuel Processing Technology*. Vol. 92. No. 4. Hal. 780-786.