



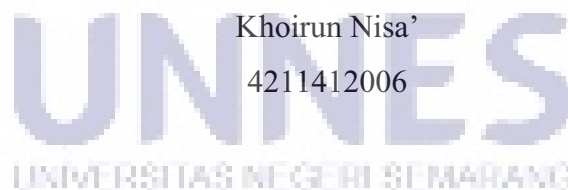
**ANALISIS TERMAL KACA *CULT* UNTUK
MENENTUKAN POTENSI DAUR ULANG**

Skripsi
disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

oleh

Khoirun Nisa'

4211412006



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2017

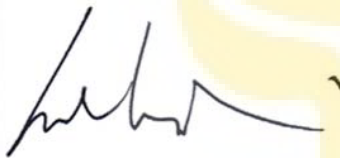
PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke Sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

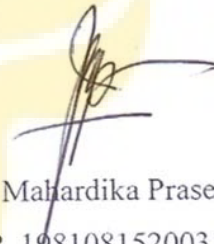
Semarang, Januari 2017

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Sulhadi, M.Si.
NIP. 197108161998021001



Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si.
NIP. 198108152003121003

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa yang tertulis dalam skripsi ini benar-benar hasil karya sendiri, bukan jiplakan dari karya tulis orang lain, baik setengah atau seluruhnya. Pendapat atau temuan orang lain yang terdapat dalam skripsi ini dikutip atau dirujuk berdasarkan kode etik ilmiah.

Semarang, 6 Januari 2017



NIM 4211412006

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul:

Analisis Termal Kaca *Cult* untuk Menentukan Potensi Daur Ulang
disusun oleh

Khoirun Nisa'

4211412006

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada
tanggal 6 Januari 2017



Panitia:

Ketua

Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si, Akt

NIP. 196412231988031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP. 196807141996031005

Ketua Penguji

Dr. Putut Marwoto, M.S.

NIP. 196308211988031004

Anggota Penguji/

Pembimbing Utama

Dr. Sulhadi, M.Si.

NIP. 197108161998021001

Anggota Penguji/

Pembimbing Pendamping

Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si.

NIP. 198108152003121003

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

Jalani hari ini dengan baik, insya Allah esok pun akan baik. Lakukan dengan sebaik dan seindah yang kita bisa, semampu kita dan jangan memaksa.

Berusahalah untuk menerima apapun yang terjadi, serta yakinlah bahwa semua hal yang telah terjadi pada diri kita maupun pada orang lain pastilah yang terbaik. Jika hasilnya belum sesuai dengan yang diharapkan, maka tetaplah melangkah dan lakukan perbaikan (Khoirun Nisa')

PERSEMBAHAN

Untuk Bapak, Ibu dan Adik-adikku

Keluarga Besarku

Bapak-Ibu Dosen

Sahabat-sahabatku

Keluarga Fisika Material

Fisika 2012

Almamaterku



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PRAKATA

Assalamu'alaikum wr. wb.

Alhamdulillah rabbi' alamiin, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga diberikan kemudahan dalam menyelesaikan skripsi ini. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada baginda Rasulullah SAW beserta keluarga, sahabat dan orang-orang yang mengikuti risalah beliau hingga akhir zaman.

Alhamdulillah, setelah melalui perjuangan yang begitu panjang, akhirnya atas izin-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul **“Analisis Termal Kaca *Cult* untuk Menentukan Potensi Daur Ulang”** dengan lancar. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Strata Sati Program Studi Fisika di Jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang dalam rangka memperoleh gelar Sarjana Sains.

Terselesaikannya skripsi ini tidak lepas dari natuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Sulhadi, M.Si., selaku dosen pembimbing I yang senantiasa sabar dalam membimbing dan meluangkan waktunya untuk memberikan arahan, saran dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si., selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktunya untuk memberikan saran dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
3. Dr. Putut Marwoto, M.S, selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan motivasi dalam penyelesaian skripsi ini.

4. Dr. Suharto Linuwih, M.Si., selaku ketua jurusan Fisika yang telah memberikan dukungan dan bantuannya selama penyusunan skripsi ini.
5. Dr. Khumaedi, M.Si., selaku dosen wali yang senantiasa memberikan nasihat dan motivasi.
6. Dr. Budi Astuti serta bapak dan ibu dosen yang telah memberikan saran dan ilmu yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi ini.
7. Asisten Laboratorium Fisika: Wasi Sakti Wiwit P, S.Pd., R. Muttaqin, S.Si., Natalia Erna S, S.Pd., dan Nurseto yang telah membantu penulis dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Didik Aryanto, M.Sc., yang telah membantu dan memberikan saran dalam karakterisasi sampel.
9. Bapak dan ibu tersayang, yang senantiasa membimbing serta mencurahkan perhatian dan waktunya untuk mendukungku. Terima kasih atas segala pengertian, dukungan, motivasi, semangat dan doa yang tiada henti.
10. Adik-adikku, Danang dan Dinda yang selalu mendoakan, memberikan motivasi, semangat dan keceriaan di setiap hariku.
11. Keluarga besarku, yang selalu memberikan dukungan, motivasi dan doa.
12. Sahabat-sahabatku, Umi, Yuni, Nia, Anisa, Dwy dan Santi yang senantiasa berbagi saran, motivasi dan semangat untuk terus berjuang bersama
13. Keluarga Lab. Fisika Terapan, Teh Nita, Dita, Santo, Dek Nisa, Dek Defin, Dek Ita, Dek Nila, Mbak Alif, Mbak Dika dan Mbak Tyas. Terima kasih telah berbagi ilmu, kebersamaan, dukungan dan motivasi dalam perjuangan melaksanakan penelitian.

14. Sahabat Fisika Material, Rofi, Reza, Mahmudah, Farida, Yani, Sapta, Sobirin, Margi dan Fandi. Terima kasih atas persahabatan, kebersamaan, semangat dan saran yang kalian berikan selama ini.
15. Departemen Litbang beserta keluarga besar pengurus Hima Fisika yang selalu memberikan motivasi dan semangat kepada penulis.
16. Teman-teman Fisika angkatan 2012 yang selalu membantu dan berbagi keceriaan dalam melewati suka duka perjuangan ini.
17. Sahabat-sahabat Pasadena Kos atas semangat dan doa yang selalu diberikan.
18. Semua pihak yang telah berbagi ilmu dan motivasi kepada penulis, serta membantu penulis selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna karena kesempurnaan hanya milik Allah swt. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat kedepannya bagi ilmu pengetahuan. Aamiin.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Semarang, Januari 2017

UNNES Penulis
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

ABSTRAK

Nisa', K. 2017. *Analisis Termal Kaca Cult untuk Menentukan Potensi Daur Ulang*. Jurusan Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Semarang. Pembimbing I: Dr. Sulhadi, M.Si., Pembimbing II: Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si.

Kata kunci: Kaca *Cult*, Stabilitas Termal, Suhu Kristalisasi, Suhu Pelelehan, Potensi Daur Ulang.

Kaca merupakan salah satu produk keramik modern yang mempunyai ruang lingkup penggunaan sangat luas. Penggunaan kaca yang sangat luas ini memiliki dampak terhadap lingkungan, karena kaca-kaca yang sudah tidak terpakai lagi akan menjadi limbah yang tidak dapat terurai secara alami oleh pengurai organik. Daur ulang merupakan alternatif cara dalam menanggulangi limbah kaca (*cult*) yang ada. Kaca *cult* memiliki potensi untuk didaur ulang karena kaca *cult* tetap memiliki sifat-sifat yang sebagian besar sama dengan kaca yang baru. Analisis sifat termal kaca sangat diperlukan untuk mendaur ulang kaca. Kaca *cult* yang diperoleh dari lingkungan dikarakterisasi menggunakan EDX dan DSC untuk mengetahui komposisi dan parameter termal kaca *cult*. Berdasarkan analisis EDX diperoleh bahwa semua sampel kaca *cult* yang diteliti merupakan jenis kaca *soda-lime-silica*. Bahan utama penyusun kaca *cult* ini antara lain SiO_2 , Na dan Ca, sedangkan unsur-unsur penyusun lain seperti Al, K dan Mg memiliki persentase unsur yang lebih sedikit. Hasil DSC menunjukkan bahwa sampel kaca *cult* memiliki temperatur leleh pada kisaran $748\text{ }^\circ\text{C}$ hingga $780\text{ }^\circ\text{C}$, temperatur kristalisasi $715,5\text{ }^\circ\text{C}$ dan stabilitas termal kaca masing-masing sampel kaca *cult* sebesar $317,8\text{ }^\circ\text{C}$, $310,7\text{ }^\circ\text{C}$, $326,7\text{ }^\circ\text{C}$, $310,8\text{ }^\circ\text{C}$, $324,2\text{ }^\circ\text{C}$ dan $338,8\text{ }^\circ\text{C}$. Berdasarkan hasil analisis EDX dan DSC diketahui bahwa komposisi kaca berpengaruh terhadap sifat termal kaca *cult*. Mengacu pada hasil penelitian ini, maka semua sampel kaca *cult* yang diteliti berpotensi untuk didaur ulang. Daur ulang yang dapat dilakukan antara lain dengan mengolah kaca *cult* menjadi kristal, menjadi kaca kembali, atau menjadi produk baru yang berbasis kaca.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	v
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB	
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Sistematika Penulisan Skripsi	6
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kaca.....	7
2.2 Komposisi Kaca	9
2.3 Limbah Kaca (<i>Cult</i>).....	14

2.4 Sifat Termal Kaca.....	16
2.5 Analisis Termal Kaca	18
3. METODE PENELITIAN	24
3.1 Persiapan Alat dan Bahan.....	26
3.2 Penggerusan Kaca <i>Cult</i>	27
3.3 Penyaringan Kaca <i>Cult</i>	27
3.4 Karakterisasi EDX dan DSC	27
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil EDX Kaca <i>Cult</i>	31
4.2 Hasil DSC Kaca <i>Cult</i>	33
4.3 Pengaruh Komposisi Bahan terhadap Sifat Termal Kaca <i>Cult</i>	37
4.3.1 Stabilitas Termal	39
4.3.2 Temperatur Kristalisasi	40
4.3.3 Temperatur Pelelehan.....	40
4.4 Potensi Daur Ulang Kaca <i>Cult</i>	41
5. PENUTUP	44
5.1 Simpulan.....	44
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN	49

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Komposisi kaca <i>soda-lime-silica</i> pada umumnya.....	12
Tabel 2.2 Komposisi kaca borosilikat pada umumnya	13
Tabel 3.1 Nama sampel masing-masing kacacult.....	27
Tabel 4.1 Komposisi unsur penyusun kaca <i>cult</i>	32
Tabel 4.2 Sifat termal kaca <i>cult</i>	36
Tabel 4.3 Pengaruh komposisi terhadap sifat termal kaca <i>cult</i>	38



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 4.1 Kurva DSC kaca <i>cult</i>	35



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran 1. Hasil EDX Kaca <i>Cult</i>	49
Lampiran 2. Hasil DSC Kaca <i>Cult</i>	55
Lampiran 3. Dokumentasi Penelitian	61



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah sampah di Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya. Hal ini menjadi permasalahan yang serius terutama di kota-kota besar. Pada tahun 2003 hingga 2008, jumlah sampah di Bandung mengalami peningkatan sebesar 41%. Berdasarkan nilai tersebut, sampah yang diolah baru 10% dari sampah kota (Suyoto, 2008). Apabila tidak diolah secara tepat dan berkelanjutan, sampah sebagai barang buangan dapat menjadi masalah karena akan menimbulkan penyakit dan mencemari lingkungan.

Sampah yang ada meliputi sampah organik dan anorganik. Sampah anorganik memiliki peranan besar dalam mencemari lingkungan karena sulit terurai oleh alam. Kaca merupakan salah satu sampah anorganik karena kaca-kaca bekas (*cult*) yang sudah tidak terpakai lagi merupakan limbah yang tidak dapat terurai secara alamiah oleh pengurai organik (Sulhadi *et al.*, 2010). Berdasarkan data statistik Kementerian Negara Lingkungan Hidup Indonesia (KNLH) pada tahun 2008 menyebutkan bahwa limbah kaca yang dihasilkan oleh 26 kota besar di Indonesia mencapai 0.7 ton per tahun. Karakteristik kaca yang tidak dapat terurai secara alami membuat limbah kaca menjadi salah satu masalah bagi kelestarian lingkungan.

Daur ulang merupakan salah satu solusi dalam menanggulangi limbah kaca yang ada. Limbah kaca memiliki potensi untuk didaur ulang karena kaca

yang telah tidak digunakan tetap memiliki sifat-sifat yang sebagian besar sama dengan kaca yang baru. Selain itu, daur ulang juga menjadi upaya dalam meminimalisasi penggunaan bahan baku yang baru, mengurangi penggunaan energi, serta mengurangi polusi dan emisi gas rumah kaca jika dibandingkan dengan proses pembuatan barang baru (Taurino *et al.*, 2013; Melichar & Bydzovsky, 2015; Yatsenko *et al.*, 2015). Daur ulang sebagai alternatif cara untuk mengelola limbah kaca saat ini lebih difokuskan kepada sampah kaca atau kaca-kaca bekas yang biasanya ditemukan di masyarakat, seperti pecahan botol kaca, piring kaca, pecahan kaca lembaran, dan sebagainya.

Silika yang dikenal sebagai pasir kuarsa merupakan material terbesar yang digunakan untuk membuat kaca. Pada pembuatan kaca, temperatur minimal yang digunakan mencapai suhu 1200 °C. Hal ini bertujuan agar silika dapat meleleh. Selain silika, material lain yang turut memiliki andil besar dalam pembuatan kaca antara lain soda ash (*sea shell*) yang dikenal sebagai soda api (NaOH) dan *limestone*, dikenal oleh masyarakat sebagai batu gamping. Proses yang dilakukan untuk membuat kaca dengan menggunakan material tersebut memerlukan biaya produksi yang tinggi, sehingga untuk menekan biaya produksi maka saat ini kaca mulai dimodifikasi dengan cara menambahkan unsur-unsur lain dalam pembuatannya.

Kaca yang dihasilkan tidak harus diproduksi dengan menggunakan material yang baru, melainkan bisa juga diperoleh dengan mengolah limbah kaca yang sudah ada. Saat ini, pabrik kaca melakukan proses produksi dengan cara mengolah limbah kaca yang ada di masyarakat. Limbah kaca dibersihkan dan dipilah berdasarkan warna dan ketebalannya, kemudian dicampurkan dengan pasir

kuarsa atau silika (kemurnian 90%) dengan perbandingan 30% : 70%. Material pembentuk kaca tersebut selanjutnya dipanaskan pada suhu 1500 °C.

Suatu material memiliki potensi untuk memantulkan, menyerap dan meneruskan gelombang yang diterimanya termasuk gelombang cahaya. Kemampuan yang dimiliki oleh setiap material dalam merespon gelombang tersebut berbeda-beda. Pada kaca, gelombang yang diterimanya harus lebih banyak yang diteruskan daripada yang diserap atau yang dipantulkan ($I_T > I_R$ dan I_A). Oleh karena itu, komposisi bahan menjadi hal yang penting dalam proses pembuatan kaca (Shelby, 2005; Sartono, 2014).

Kriteria yang telah diperoleh para peneliti untuk kaca yang berpotensi didaur ulang yaitu kaca yang memiliki karakteristik tidak berwarna atau bening (Sulhadi *et al.*, 2010; Vieitez *et al.*, 2011). Kriteria lain yang juga perlu dimiliki kaca untuk dapat didaur ulang antara lain kekerasannya sedang dan secara termal memiliki rentang temperatur leleh 650 °C atau sedikit lebih tinggi (Sulhadi *et al.*, 2010). Selain itu, komposisi penyusun kaca tidak mengandung material yang berpengaruh pada warna kaca, atau terdiri dari material pewarna kaca namun dengan konsentrasi yang sedikit sehingga tidak menyebabkan hasil akhir kaca yang berwarna.

Komposisi bahan-bahan penyusun kaca juga sangat mempengaruhi titik leleh. Jenis kaca yang keras cenderung memiliki titik leleh yang tinggi, sehingga pengerjaan daur ulang kaca keras dipandang tidak efektif dan tidak efisien. Selain itu, perbedaan titik leleh bahan pada suatu harga temperatur akan menyebabkan kondisi fisik bahan hasil oksidasi kaca *cult* yang berbeda pula (Sulhadi *et al.*,

2010). Hal ini menjadikan sifat termal kaca *cult* merupakan sifat yang penting untuk dikaji.

Sifat termal kaca berupa perubahan sifat fisik terhadap fungsi temperatur kaca dapat diketahui dengan teknik analisis termal (Wismogroho & Widayatno, 2012). Analisis termal digunakan untuk menentukan beberapa sifat penting dari kaca, antara lain untuk menentukan indikator stabilitas terhadap kristalisasi, menentukan kecenderungan pembentukan kaca (*glassforming tendency*) dan energi aktivasi dalam proses kristalisasi pada kaca (Cahyana *et al.*, 2014). Sifat-sifat tersebut berperan penting bagi kaca untuk mengetahui potensi pengolahannya. Analisis termal dapat digunakan untuk mengetahui sifat termal kaca. Parameter-parameter termal yang dapat diperoleh antara lain stabilitas termal, temperatur kristalisasi, serta temperatur pelelehan.

Stabilitas termal berperan dalam menentukan kestabilan kaca yang dihasilkan terhadap tempaan termal. Temperatur kristalisasi berfungsi untuk mengetahui temperatur yang harus dicapai oleh material kaca untuk menjadi kristal, sedangkan temperatur pelelehan merupakan temperatur minimal yang diperlukan agar kaca dapat meleleh. Tinggi atau rendahnya temperatur pelelehan ini yang selanjutnya berperan dalam menentukan mudah atau tidaknya suatu kaca untuk diolah kembali atau didaur ulang. Berdasarkan parameter-parameter tersebut, sifat termal merupakan hal yang sangat penting untuk menentukan potensi daur ulang kaca.

Pengukuran perubahan aliran panas terhadap temperatur merupakan salah satu bagian dari penentuan sifat termal kaca berupa titik leleh, titik kristalisasi dan stabilitas termal. Analisis termal dapat dilakukan dengan menggunakan alat

Differential Scanning Calorimetry (DSC), Differential Thermal Analyzer (DTA), serta *Thermogravimetric Analyzer (TGA)*. Prinsip kerja DTA dan DSC yaitu mendeteksi perubahan panas yang terjadi akibat pelepasan maupun penyerapan panas (Royall *et al.*, 1998; Sahar, 2000; Simon *et al.*, 2007). Ketiga fitur alat analisis termal tersebut tersedia dalam *Simultaneous Termal Analysis (STA)*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka pada penelitian ini akan dilakukan analisis sifat termal kaca *cult* untuk menentukan potensi daur ulang. Parameter termal untuk menentukan potensi daur ulang tersebut meliputi stabilitas termal, temperatur kristalisasi dan temperatur pelelehan.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat termal kaca *cult*, komposisi bahan-bahan penyusun kaca *cult* dan pengaruh komposisi bahan terhadap sifat termal kaca *cult*. Parameter termal yang dikaji antara lain stabilitas termal, temperatur kristalisasi dan temperatur pelelehan. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan potensi daur ulang kaca *cult*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yaitu diperoleh hasil analisis sifat termal kaca *cult* guna menjadi dasar dalam proses daur ulang kaca selanjutnya. Hal ini akan bermanfaat dalam upaya efisiensi penggunaan energi dan kelestarian lingkungan.

1.5 Sistematika Penulisan Skripsi

Sistematika penulisan skripsi disusun dan dibagi menjadi tiga bagian untuk memudahkan pemahaman tentang struktur dan isi skripsi. Penulisan skripsi ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu bagian pendahuluan skripsi, bagian isi skripsi dan bagian akhir isi skripsi.

Bagian pendahuluan skripsi terdiri dari halaman judul, sari (abstrak), halaman pengesahan, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar gambar, daftar tabel, dan daftar lampiran.

Bagian isi skripsi, terdiri dari lima bab yang tersusun dengan sistematika sebagai berikut, bab 1 yang meliputi pendahuluan, berisi latar belakang, permasalahan, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan skripsi; bab 2 yang meliputi landasan teori, berisi teori-teori pendukung penelitian; bab 3 yang metode penelitian, berisi tempat pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian; bab 4 yang meliputi hasil penelitian dan pembahasan, dalam bab ini dibahas tentang hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan; dan bab 5 yang meliputi penutup yang berisi tentang kesimpulan hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang berkaitan dengan hasil penelitian.

Bagian akhir skripsi memuat tentang daftar pustaka yang digunakan sebagai acuan dari penulisan skripsi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kaca

Kaca merupakan material yang mempunyai struktur kristal amorf (Sulhadi, 2007). Kaca disebut amorf karena mempunyai ikatan antar atom yang berjangkauan pendek dan tidak memiliki keteraturan antar atom dalam skala besar. Kaca adalah suatu padatan amorf, karena tidak mempunyai rentang orde yang lebar, yakni pada saat tidak ada keteraturan dalam susunan molekulernya dengan skala yang lebih lebar pada beberapa kali ukurannya pada kelompok tersebut (Doremus, 1994). Kaca merupakan padatan amorf sepenuhnya yang mempunyai rentang lebar yang kecil dan menunjukkan suatu daerah dari sifat transformasi kaca (Shelby, 2005). Misalnya jarak antar atom silika (SiO_2) sekitar 3,6 angstrom dan mempunyai ketidakteraturan di atas 10 angstrom.

Kaca dipandang dari segi fisika merupakan zat cair yang sangat dingin. Kaca disebut demikian karena struktur partikel-partikel penyusunnya yang saling berjauhan seperti dalam zat cair namun berwujud padat. Hal ini terjadi akibat proses pembuatan kaca dilakukan melalui tahap pelelehan dan pendinginan. Tahap pendinginan (*cooling*) pada proses pembuatan kaca yang sangat cepat menjadikan partikel-partikel penyusun kaca tidak sempat menyusun diri secara teratur (Shelby, 2005; Aisyah & Martono, 2010).

Kaca memiliki sifat yang unik dibandingkan dengan material lain. Hal ini karena kaca tidak berpori (*porous*) dan tidak mudah dipengaruhi oleh bahan-

bahan lain di sekitarnya. Keunikan tersebut antara lain tidak mempunyai sifat kimia yang aktif, sehingga kaca tidak mudah bereaksi dengan bahan lain. Kaca tidak mudah korosi dan tidak mudah luntur. Sifat ini sangat diperlukan terutama sebagai tempat penyimpanan bahan kimia seperti asam atau alkali. Kaca juga dapat didaur ulang. Serpihan kaca yang telah pecah dapat dikumpulkan dan diproses kembali untuk diolah menjadi barang lain. Hal ini berarti bahwa apabila kaca dikelola dengan baik, maka seharusnya kaca tidak memiliki dampak terhadap pencemaran dan kerusakan lingkungan (Sahar, 1998).

Kaca memiliki sifat transparan, sehingga benda apapun yang tersimpan di dalamnya masih dapat terlihat. Hal ini tentu dapat membantu dalam urusan perdagangan. Kaca berwarna juga dapat menahan atau melindungi benda dari sinar ultraviolet yang mampu merusak benda di sekitarnya. Oleh karena itu, benda yang tersimpan di dalam kaca bisa tahan lebih lama. Selain itu, kaca juga bisa menerima berbagai spektrum cahaya. Proses ini dapat menghambat kerusakan atau pembusukan benda yang berada di dalam botol kaca. Sebagian kaca dapat tahan terhadap penyinaran gelombang mikro (Sahar, 1998). Hal ini membantu mempermudah dalam proses pemanasan berbagai jenis bahan.

Keunikan lain yang dimiliki kaca berupa kemudahan dalam pembentukan untuk tujuan asesoris seperti pembuatan barang antik dan perhiasan dalam rumah. Apabila botol kaca tertutup rapat, ia akan kedap udara dan kelembabannya terjaga. Hal ini akan menghalangi organisme lain untuk masuk ke dalam botol. Selain itu, kaca dapat diberi tanda, diwarnai dan sebagainya, sehingga berbagai bentuk produk kaca yang beraneka ragam dapat dibuat dengan lebih mudah. Kaca juga bersifat dapat memantulkan, menyerap dan meneruskan atau membiaskan

cahaya yang melaluinya (Sahar, 1998). Hal ini sangat penting dalam pembuatan piranti optik.

2.2 Komposisi Kaca

Kaca komersial dapat dibagi menjadi beberapa kelompok utama. *Vitreous silica*, merupakan senyawa kaca komersial kompleks yang paling sedikit digunakan. Kaca ini dimanfaatkan untuk serat optik, optik pemancar ultraviolet dan infra merah, serta untuk aplikasi-aplikasi yang dibutuhkan pada temperatur tinggi. Di sisi lain, sebagian besar dari seluruh kaca diproduksi untuk kaca datar yang digunakan untuk jendela, cermin, dan aplikasi otomotif, botol kaca, serta kaca yang digunakan untuk lampu pijar. Kaca-kaca tersebut mempunyai kemiripan komposisi dan ditambahkan kaca *soda-lime-silica* (Shelby, 2005).

Sejumlah kaca jenis lain diproduksi untuk aplikasi khusus. Kaca *borosilicate* diketahui memiliki hambatan-kejut yang baik terhadap panas dan ketahanan yang baik terhadap bahan kimia, serta digunakan untuk peralatan masak, peralatan laboratorium kimia, perangkat panel datar seperti layar televisi dan alat-alat elektronik genggam, serta lampu pijar. Serat kaca digunakan untuk isolasi panas dan bunyi serta untuk produksi serat kaca halus penahan panas. Kaca mengandung unsur-unsur-unsur kuat, termasuk timbal, yang digunakan untuk televisi tradisional dan tabung sinar katoda. Banyak jenis lain dari kaca yang diproduksi dalam jumlah kecil untuk aplikasi yang sangat terbatas, termasuk optik, elektronik, biologis, dan penggunaan-penggunaan lain.

Sifat yang paling penting untuk kaca komersial adalah massa jenis, indeks bias, koefisien ekspansi termal, suhu transformasi kaca, modulus elastis dan

modulus geser, serta daya tahan terhadap bahan kimia. Sifat-sifat tersebut perlu ditinjau untuk setiap kelompok besar dari kaca komersial.

2.2.1 *Vitreous Silica*

Vitreous silica (kaca silika) adalah satu-satunya kaca komersial yang mengandung komponen kimia utama tunggal dan sering diproduksi secara langsung dari mineral yang terjadi secara alami (kwarsa). Kaca silika memiliki koefisien ekspansi termal yang sangat rendah, sehingga menjadikannya sangat tahan terhadap kejutan panas. Temperatur transformasi kaca yang tinggi juga memungkinkan penggunaannya untuk temperatur di atas 1000 °C. Selain itu, kaca silika memiliki transparansi optik pada rentang spektrum yang sangat lebar, sehingga memungkinkannya untuk digunakan sebagai serat optik untuk telekomunikasi, lensa, jendela, dan perangkat optik lainnya yang membutuhkan transmisi ultraviolet dan infra merah yang tinggi (Shelby, 2005).

Koefisien ekspansi termal dari kaca silika adalah satu dari beberapa sifat yang secara relatif tidak sensitif terhadap ketidakmurnian. Kaca silika merupakan satu-satunya kaca yang menunjukkan koefisien ekspansi termal negatif lebih dari batas rentang temperatur, dengan nilai ekspansi termal minimal antara 200 dan 250 K. Koefisien ekspansi termal dari kaca ini yaitu dari 0.5 sampai 0.6 ppm K⁻¹ di atas temperatur ruang dan hanya mengalami sedikit perubahan antara 25 dan 1000 °C.

Kaca silika memiliki ketahanan yang tinggi terhadap api dibandingkan dengan kaca komersial pada umumnya, dengan temperatur transformasi kaca berkisar dari 1050 sampai 1200 °C. Rentang kerapatan kaca silika berkisar antara

2,197 hingga 2,203 g cm⁻³, sedangkan indeks bias yaitu $\approx 1,457 \pm 0,003$ untuk sebagian besar produk. Ketakmurnian relatif pada kaca silika mempunyai dampak yang kecil terhadap T_g dan viskositas. Sebagian besar sifat lain dari kaca silika hanya sedikit yang disebabkan oleh konsentrasi hydroxyl, akan tetapi konsentrasi hydroxyl pada sifat kaca silika memiliki efek yang sama besarnya seperti efek perubahan temperatur fiktif. Oleh karena itu, sangat sulit untuk memisahkan efek hydroxyl dari sejarah termalnya.

2.2.2 Kaca Soda-Lime-Silica

Sebagian besar kaca komersial berbasis pada sistem dengan 4 bahan penyusun (*ternary*) yaitu *soda-lime-silica*, dengan sedikit penambahan oksida lain untuk mengatur sifatnya guna aplikasi khusus. Sementara itu, kaca silika mempunyai banyak sifat yang menjadikannya sangat diperlukan untuk aplikasi seperti kaca datar, botol, atau lampu. Akan tetapi, temperatur leleh yang tinggi dibutuhkan untuk membuat kaca silika (> 2000 °C). Hal ini menghindarkan aplikasinya untuk produk konsumsi yang lebih umum, karena biaya merupakan daya penggerak dalam menentukan komposisi kaca.

Pengembangan komposisi kaca soda-lime-silika merupakan kompromi antara sifat yang unik pada silika murni dan biaya untuk memproduksi kaca dalam jumlah besar yang dibutuhkan untuk jendela, botol, dan lampu penerangan elektrik. Penambahan soda pada hasil silika berperan besar dalam pengurangan temperatur yang dibutuhkan untuk meleleh. Namun, sejumlah besar soda juga menyebabkan daya tahan kaca yang rendah terhadap bahan kimia. Penggantian peran soda oleh lime (CaO), secara parsial mengurangi daya tahan terhadap bahan

kimia dan menghasilkan kaca dengan temperatur leleh yang sesuai (≈ 1500 °C). Hal ini menjadikan kaca dapat diterima untuk sebagian besar aplikasi konsumen. Komposisi khas kaca soda-lime-silika disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi kaca *soda-lime-silica* pada umumnya

Komponen (wt%)	Jendela	Botol	Lampu Pijar
SiO ₂	73	74	72
Na ₂ O	14	13	16
K ₂ O	-	0.3	1
MgO	4	0.2	4
CaO	9	11	3
Al ₂ O ₃	0.1	1.5	2
Fe ₂ O ₃	0.1	0.04	-
SO ₂	-	0.2	-

2.2.3 Kaca Borosilikat

Kaca *borosilikat* dihasilkan pada rentang komposisi yang luas. Komposisi beberapa kaca komersial borosilikat pada umumnya terdaftar pada Tabel 2.2. Sebagian besar kaca, terutama sodium borosilikat dengan sistem yang berbasis *ternary*, bersandar pada keadaan pemisahan fasa untuk sifat yang diinginkan, sedangkan banyak yang lainnya yang homogen. Sebagai hasilnya, sifat kaca juga berbeda untuk cakupan yang lebih luas. Secara umum, kaca dipilih untuk aplikasinya karena ketahanannya yang baik terhadap kejutan termal, serta memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap bahan kimia, atau resistivitas listrik yang lebih tinggi daripada kaca soda-lime-silika.

Pengetahuan mengenai kaca borosilikat dikenal dengan nama dagang Pyrex (nama dagang ini sebenarnya meliputi komposisi lain yang sangat baik, termasuk beberapa kaca yang bukan borosilikat). Kaca tertentu mengandung 81 wt% SiO₂ kasar, 13 wt% B₂O₃, 4 wt% Na₂O, dan 2 wt% Al₂O₃. Kaca borosilikat lain adalah homogen. Kaca ini secara khas memiliki temperatur leleh yang sangat tinggi dibandingkan kaca soda-lime-silika. Sebagian besar kaca adalah berbasis sistem borosilikat alkaline murni sebagai pengganti sistem borosilikat sodium. Hal ini menjadikan kaca yang dihasilkan lebih tahan api serta mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap bahan kimia dan resistivitas listrik yang lebih tinggi daripada kaca yang mengandung ion-ion monovalen. Kaca tersebut pada umumnya memiliki temperatur transformasi kaca yang lebih besar dari 600 °C, kerapatan dan indeks bias yang relatif tinggi dibandingkan dengan kaca sodium borosilikat, serta daya tahan yang baik terhadap bahan kimia dan resistivitas listrik yang sangat tinggi.

Tabel 2.2 Komposisi beberapa kaca borosilikat komersial pada umumnya

Komponen (wt%)	CGW-7740 (<i>labware</i>)	CGW-7070 (<i>listrik</i>)	CGW-7059 (<i>substrate</i>)	CGW-7052 (<i>sealing</i>)
SiO ₂	81	72	49	64
Li ₂ O	-	0.5	-	1
Na ₂ O	14	0.5	-	2
K ₂ O	-	0.3	1	3
BaO	-	-	25	3
Al ₂ O ₃	13	25	15	19

2.2.4 *Fiber Glass*

Fiber glass dapat dibagi lagi ke dalam dua kategori; serat isolasi bunyi dan termal biasa, dan serat bernilai tinggi digunakan dalam lingkungan termal yang lebih tinggi atau untuk produksi komposit atau kaca halus. Kaca tersebut mempunyai komposisi kompleks, biasanya mengandung silika, boric oksida, macam-macam alkali (natrium dan kalium) dan alkali murni (magnesium dan kalsium) oksida, dan sejumlah kecil alumina. Kaca dalam kategori kedua diproduksi oleh proses yang menarik seperti filamen yang kontinyu. Komposisinya sangat berbeda-beda didasarkan pada aplikasi dan juga mengandung konsentrasi alumina yang tinggi (Shelby, 2005).

2.3 *Kaca Cult*

Kaca komersial memiliki masa pakai yang berbeda-beda untuk setiap pengguna berdasarkan keperluannya. Kaca-kaca yang sudah tidak terpakai lagi merupakan limbah yang tidak akan terurai secara alamiah oleh pengurai organik. Akan tetapi, kaca *cult* dapat didaur ulang menurut warna dan tingkat kekerasannya. *Cult* dengan kekerasan sedang dan tidak berwarna memiliki potensi yang baik untuk didaur ulang. Hal ini karena kaca dengan karakteristik tersebut cenderung memiliki titik leleh yang sedang, sehingga pengerjaan daur ulangnya menjadi efektif dan efisien (Sulhadi *et al.*, 2010).

Secara umum, kata *cult* dapat digunakan untuk mengacu pada “kaca rusak” atau untuk “kaca limbah”. Perbedaan harus dibuat dengan memperhatikan apakah *cult* internal atau eksternal: perbedaan ini sangat penting karena *cult* internal tidak dipandang sebagai limbah, sedangkan *cult* eksternal bisa merupakan

yang belum digunakan ataupun yang telah digunakan dapat dikategorikan sebagai limbah. Ketika menggunakan “*cult*” dalam konteks limbah akhir ini akan selalu mengarah pada *cult* eksternal (Vieitez *et al.*, 2011).

Cult internal terdiri dari produk-produk yang kurang baik atau tidak sempurna yang terdeteksi atau ditolak oleh proses *quality control* selama proses pembuatan kaca industri, transisi fasa pada perubahan produk seperti perubahan ketebalan dan warna, serta produksi offcuts. Dasar pengertian *cult* internal merupakan fakta bahwa bahan-bahan kaca dapat secara langsung diserap kembali masing-masing proses industri sebagai bahan baku untuk operasi pelelehan yang baru, tanpa meninggalkan pabrik pembuatan kaca. *Cult* internal tidak dapat dianggap sebagai limbah karena belum pernah menjadi produk (Vieitez *et al.*, 2011).

Cult eksternal yaitu “kaca limbah yang dikumpulkan dan diproses kembali dengan tujuan mendaur ulang”. *Cult* eksternal dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu *pre-consumer* (kaca yang belum digunakan atau juga disebut *cult* kaca industri), serta *cult* kaca *post-consumer* (kaca yang telah digunakan) (Vieitez *et al.*, 2011).

Cult pre-consumer merupakan kaca limbah yang dihasilkan dari pembuatan produk yang mengandung kaca sebagai salah satu komponennya, dan yang memiliki fasilitas khusus di mana ia dihasilkan, menjadi limbah tetapi tidak mencapai pasar konsumen. Contoh *cult pre-consumer* yaitu *cult* kaca yang tersusun oleh offcuts dan potongan-potongan dari pembuatan yang kurang baik atau tidak sempurna pada beberapa produksi jendela mobil dari kaca datar (*flat*

glass), pada proses pembuatan kaca mobil dan yang dilelehkan kembali pada proses pembuatan kaca datar (Vieitez *et al.*, 2011).

Cult post-consumer merupakan kaca limbah yang berasal dari produk kaca yang telah digunakan di pasar konsumen. Sebagian besar *cult* merupakan kaca botol dan *cult* kaca datar (*flat glass*). Istilah *cult* digunakan untuk mengacu pada pemrosesan dan pengolahan kembali *cult*. *Cult* yang dimaksud yaitu *cult* eksternal yang sesuai dengan seperangkat kriteria kualitas minimal sehingga dapat ditetapkan kriteria kualitas minimal untuk mengolah kembali kaca *cult* sampai *cult* tersebut memperoleh status limbah akhir (Vieitez *et al.*, 2011).

2.4 Sifat Termal Kaca

Jika suatu bahan pembentuk kaca dipanaskan pada temperatur lelehnya dan didinginkan pada suatu temperatur tertentu, maka tidak semua bahan dapat membentuk kaca. Hal ini menunjukkan bahwa keadaan termodinamik pada temperatur tersebut sangat kritis dan menentukan dapat terbentuk atau tidaknya suatu kaca. Apabila keadaan termodinamik sesuai, maka kaca dapat terbentuk pada suhu tersebut. Suhu di mana kaca dapat terbentuk disebut suhu transformasi kaca. Suhu ini memiliki nilai yang berbeda-beda dan sangat bergantung pada komposisi kaca (Sahar, 1998).

Berkaitan dengan transformasi kaca, termodinamika yang mempengaruhi transformasi kaca tersebut antara lain yaitu keadaan entalpi, relaksasi dan volume bebas. Stabilitas termal kaca merupakan suatu nilai yang mewakili mudah atau tidaknya pembentukan kaca. Perubahan bentuk dari keadaan (*supercooled liquid*) menjadi padat terjadi pada T_g dan disebut sebagai suhu transformasi kaca. Pada

suhu ini, kesemua tahap kebebasan akan hilang dan kaca berada dalam keadaan metastabil (Sahar, 1998).

Suhu transformasi kaca lebih menggambarkan dan mewakili suatu suhu tertentu dan bukan suatu nilai yang tetap, maka perlu digunakan suatu titik yang disebut sebagai suhu fiktif, T_f , untuk memberikan nilai suhu yang tetap. Suhu ini diperoleh dari persilangan antara lengkungan *supercooled liquid* dengan kaca. Jika proses pendinginan dihentikan pada suatu suhu yang tetap, T , maka struktur kaca akan mengalami relaksasi sehingga kaca akan terbentuk pada suatu volume tertentu. Hal ini akan menjadikan kaca berada dalam keadaan seimbang dan sangat stabil. Akan tetapi, proses ini memerlukan waktu yang sangat lama (beberapa hari, minggu, bahkan tahun) dan tidak mudah untuk dilakukan. Suhu transformasi, T_g , sangat penting, karena dapat dikaitkan dengan parameter lain seperti temperature leleh, T_m , stabilitas termal kaca (Sahar, 1998).

Perubahan energi tertentu, C_v , suhu transformasi, T_g , suhu kristalisasi, T_c , dan temperatur leleh, T_m , dapat dianalisis menggunakan alat analisis termal berupa *Differential Thermal Analyzer* (DTA) dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Semua parameter tersebut dapat diserap melalui termogram yang menggambarkan proses eksotermal (melepas energi) dan endotermal (menyerap energi). Termogram memperlihatkan bentuk perubahan suhu. Ketika cairan mengalami transformasi menjadi kaca, maka sedikit energi akan diserap. Oleh karena itu, T_g dapat diperoleh dari persilangan lengkungan suhu fiktif, T_f (Sahar, 1998).

Ketika kaca akan menjadi kristal, yaitu pada suhu T_x , maka terjadi pelepasan energi. Hal ini menjadikan struktur atom mengalami relaksasi dan

menyusun rangkaian atom dalam keadaan teratur dan berulang. Oleh karena itu, suhu kristalisasi, T_c , akan menunjukkan suatu proses eksotermal. Sedangkan kaca yang melebur akan memerlukan energi yang banyak. Oleh karena itu, temperatur leleh, T_m seharusnya diperlihatkan dengan suatu puncak endotermal yang sangat jelas (Sahar, 1998).

Konduktivitas panas dan panas ekspansi merupakan sifat termal yang penting dari kaca. Kedua sifat ini digunakan untuk menghitung besarnya perpindahan panas yang diterima oleh cairan kaca tersebut. Hal ini berarti bahwa sifat termal suatu bahan itu berkaitan dengan perpindahan kalor. Analisis termal dapat didefinisikan sebagai pengukuran sifat-sifat fisik dan kimia material sebagai fungsi dari suhu. Pada prakteknya, istilah analisis termal seringkali digunakan untuk sifat-sifat spesifik tertentu. Misalnya entalpi, kapasitas panas, massa dan koefisien ekspansi termal. Pengukuran koefisien ekspansi termal dari batangan logam merupakan contoh sederhana dari analisis termal. Apabila material dipanaskan dengan laju pemanasan tetap, terjadi perubahan kimia, seperti oksidasi dan degradasi, dan atau perubahan fisika, seperti transisi gelas pada polimer, konversi dan inversi pada keramik, serta perubahan fase pada logam.

Berbagai teknik analisis termal digunakan untuk mengukur satu atau lebih sifat fisik dari sampel sebagai fungsi temperatur. Dua jenis teknik analisis termal yang utama adalah analisis termogravimetrik (TGA), yang secara otomatis merekam perubahan berat sampel sebagai fungsi dari suhu maupun waktu, dan analisis diferensial termal (DTA) yang mengukur perbedaan suhu, T , antara sampel dengan material referen yang inert sebagai fungsi dari suhu. Teknik yang berhubungan dengan DTA adalah *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

2.5 Analisis Termal Kaca

Analisis termal digunakan untuk menentukan beberapa sifat penting dari kaca diantaranya untuk menentukan indikator stabilitas terhadap kristalisasi, menentukan kecenderungan pembentukan kaca (*glassforming tendency*) dan energi aktivasi dalam proses kristalisasi pada kaca (Cahyana *et al.*, 2014). Analisis termal dapat dilakukan untuk menentukan perubahan massa, yaitu dengan *Thermogravimetric Analyzer* (TGA). Analisis termal juga dapat dilakukan dengan menggunakan alat *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) atau *Differential Thermal Analyzer* (DTA). Prinsip kerjanya adalah mendeteksi perubahan panas yang meningkat selama transformasi eksotermik dan penyerapan panas selama transformasi endotermik.

Analisis termal juga dapat dilakukan dengan menggunakan alat *Simultaneous Thermal Analyzer* (STA). STA memiliki tekanan udara yang optional, dapat digunakan untuk menentukan perubahan massa (TGA) dan reaksi kalorik (HDSC) sampel dalam rentang temperatur -150° hingga 2400°C . STA merupakan alat analisis termal yang simultaneous, yaitu secara optional menyediakan fitur analisis termal berupa TGA, DTA dan DSC.

2.5.1 *Differential Thermal Analyzer*

Differential Thermal Analyzer merupakan salah satu jenis alat analisis termal. DTA dapat digunakan untuk analisis struktur kaca, transisi fasa polimorfik, penentuan diagram fasa, jalur dekomposisi, kinetika energi, perhitungan entalpi dan kapasitas panas (Wismogroho & Widayatno, 2012).

Differential Thermal Analyzer (DTA) berbasis pada pengukuran perbedaan suhu antara referensi dengan sample ketika suhu lingkungan berubah dengan kecepatan tertentu. Perubahan struktur kristal dan ikatan kimia dalam suatu material selalu diikuti oleh pelepasan atau penyerapan panas terhadap lingkungan. Dengan menggunakan DTA, perubahan panas yang terjadi akibat pelepasan maupun penyerapan panas dapat dideteksi. Hal ini memungkinkan untuk mengetahui karakteristik perubahan struktur material atau ikatan kimia suatu material dengan memanfaatkan fenomena fisika ini (Wismogroho & Widayatno, 2012).

Differential Thermal Analyzer (DTA) mampu mengukur perbedaan suhu antara referensi inert dengan sample ketika suhu lingkungan berubah dengan laju pemanasan konstan. Ketika struktur kristal atau ikatan kimia dari suatu material berubah, perubahan tersebut akan berimbas kepada perubahan penyerapan atau pelepasan panas yang mengakibatkan perubahan suhu material yang terjadi tidak linier dengan referensi inert (Nagashaki, 1979). Dengan menganalisis data rekam perubahan tersebut, dapat diketahui suhu di mana suatu struktur kristal atau ikatan kimia berubah, perhitungan kinetik energi, entalpi, serta energi (Hatakeyama & Zhenhai, 1998).

Prinsip dasar DTA adalah apabila dua buah krusibel dimasukkan kedalam tungku DTA secara bersamaan, krusibel yang berisi sampel ditempatkan disebelah kiri dan krusibel kosong sebagai pembanding disebelah kanan. Kemudian kedua krusibel tersebut dipanaskan dengan aliran panas yang sama besar dan akan terjadi penyerapan panas yang berbeda oleh kedua krusibel tersebut. Besarnya perbedaan penyerapan panas yang terjadi disebabkan oleh perbedaan temperatur yang

menyebabkan terjadinya suatu reaksi perubahan fisika atau kimia. Perubahan temperatur tersebut dicirikan oleh pembentukan puncak eksotermik atau endotermik.

Prinsip dasar TGA merupakan perubahan temperatur yang menyebabkan terjadinya perubahan berat. Apabila temperatur sampel (T_s) lebih besar dari temperatur pembanding (T_r) yang terjadi adalah reaksi penambahan berat. Apabila temperatur sampel (T_s) lebih kecil dari pada temperatur pembanding (T_r) maka yang terjadi adalah reaksi pengurangan berat (Ginting, 2005).

Penggunaan penting dari DTA pada kaca adalah untuk mengukur suhu transisi gelas, T_g . Titik ini tidak muncul sebagai puncak yang jelas namun sebagai perluasan anomali dari baseline pada kurva DTA; T_g menunjukkan suhu dimana suatu kaca mengalami transformasi dari padatan yang rigid menjadi cairan *supercooled* dan sangat *viscous*. Titik transisi kaca merupakan sifat penting dari kaca karena sifat ini merepresentasikan batas suhu atas dimana suatu kaca dapat digunakan dan juga memberikan suatu parameter yang dapat diukur secara cepat untuk mempelajari kaca (Hruby, 1972).

Kaca-kaca yang sangat stabil secara kinetik, seperti kaca silika, titik transisi kaca T_g biasanya merupakan satu-satunya proses termal yang terdeteksi pada DTA karena kristalisasi terlalu lambat untuk dapat berlangsung. Untuk jenis kaca lainnya, kristalisasi atau devitrifikasi dapat muncul pada temperatur tertentu di atas T_g dan di bawah titik leleh, T_f . Devitrifikasi nampak sebagai suatu proses eksoterm yang diikuti dengan proses endoterm pada suhu yang lebih tinggi yang berkorelasi dengan pelelehan dari kristal-kristal yang sama. Contoh dari kaca yang dapat terdevitrifikasi dengan mudah adalah gelas-gelas metal, yang dapat

diperparasi sebagai film tipis melalui quenching secara cepat suatu komposisi alloy cair tertentu. Material pembentuk kaca jenis lain adalah polimer-polimer amorf dan semikonduktor chalcogenida amorf.

Keberadaan DTA dapat digunakan sebagai alat karakterisasi atau analisis material. Pada suatu sampel yang identitasnya tidak diketahui maka penggunaan DTA saja tidak akan banyak membantu pada identifikasinya. Namun DTA dapat menjadi berguna pada perbandingan sekelompok material tertentu, misalnya mineral kaolin yang telah disebutkan sebelumnya. DTA juga dapat digunakan sebagai panduan bagi penentuan kemurnian, misalnya transisi dalam besi sangat sensitif dengan kehadiran impuritas; pada penambahan 0,02 wt% karbon suhu transisi berkurang dari 910 ke 723 °C. Titik leleh juga seringkali dipengaruhi oleh impuritas, terutama apabila impuritas ini dapat memunculkan eutektik dengan titik leleh yang lebih rendah.

2.5.2 Differential Scanning Calorimetry

Teknik yang berhubungan dengan DTA adalah *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Pada DSC, peralatan didisain untuk memungkinkan pengukuran kuantitatif perubahan entalpi yang timbul dalam sampel sebagai fungsi dari suhu maupun waktu. Analisis termal menggunakan DSC dapat memberikan informasi berupa: Entalpi, energi pelelehan, kapasitas panas, reaksi entalpi, *glass point*, *melting point*, kristalinitas, stabilitas oksidasi, *aging*, kemurnian, transformasi fasa, hubungan kepadatan, *eutecticum*, *polymorphism*, serta identifikasi produk.

2.5.3 *Thermogravimetric Analyzer*

Thermogravimetric Analyzer (TGA) juga dapat digunakan untuk menentukan ketidakmurnian, dengan membandingkan hilangnya massa pada dekomposisi dari senyawa tertentu dan dekomposisi yang diharapkan berlangsung pada senyawa murni secara teoritis.

2.5.4 Aplikasi DTA, DSC dan TGA

Penggunaan analisis termal pada ilmu zat padat (*solid state*) sangat banyak dan bervariasi. Secara umum DTA dan DSC lebih bermanfaat dibandingkan TGA. TGA mendeteksi efek yang melibatkan hanya perubahan massa saja. DTA dan DSC juga dapat mendeteksi efek ini, namun juga dapat mendeteksi efek lainnya seperti transisi polimorfik, yang tidak melibatkan perubahan berat. Pada beberapa persoalan akan sangat menguntungkan untuk menggunakan DTA, DSC dan TGA karena peristiwa-peristiwa termal yang terdeteksi pada DTA dapat diklasifikasikan menjadi beragam proses yang melibatkan berat ataupun yang tidak melibatkan berat.

DTA dan DSC juga dapat digunakan untuk studi mengenai transisi fasa polimorfik dengan mudah dan akurat karena banyak sifat-sifat fisik dan kimia dari sampel tertentu yang dapat dimodifikasi dan berubah sama sekali sebagai konsekuensi dari suatu transisi fasa. Apabila dibandingkan dengan pencarian dan preparasi material baru, maka akan lebih baik untuk memodifikasi sifat-sifat dari material yang telah ada melalui pembentukan larutan-larutan padat dengan penambahan aditif tertentu. Suhu transisi fasa sering sangat bervariasi pada

komposisi larutan padat, sehingga DTA ataupun DSC dapat menjadi monitor yang sensitif bagi sifat dan komposisi material.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil analisis kaca *cult* dengan EDX, maka dapat disimpulkan bahwa kaca *cult* yang diteliti merupakan jenis kaca *soda-lime-silica*. Sifat termal kaca *cult* dipengaruhi oleh bahan-bahan penyusun kaca, antara lain Si, O, Na, Ca, Al, Mg dan K dengan unsur Si memiliki persentase yang lebih tinggi. Kandungan Si yang tinggi menyebabkan produk kaca yang dihasilkan memiliki T_g , T_c dan T_m yang tinggi, sedangkan kandungan Si yang lebih rendah mengakibatkan produk kaca yang dihasilkan memiliki T_g , T_c dan T_m yang lebih rendah. Stabilitas termal kaca dan homogenisasi bahan-bahan penyusun kaca juga mempengaruhi kualitas produk kaca yang dihasilkan.

Analisis DSC juga menunjukkan bahwa semua kaca *cult* yang diteliti memiliki potensi untuk didaur ulang. Daur ulang yang dapat dilakukan antara lain dengan mengolah kaca *cult* menjadi kristal karena memiliki suhu kristalisasi yang rendah yaitu pada 715,5 °C. Kaca *cult* juga berpotensi untuk diolah kembali menjadi kaca karena memiliki stabilitas termal yang tinggi, yaitu pada kisaran 310,7 °C hingga 338,8 °C. Temperatur leleh kaca *cult* yang rendah pada suhu 748 °C hingga 780 °C juga akan memudahkan kaca *cult* untuk diproses dan diolah kembali menjadi produk baru yang berbasis kaca. Kaca bola lampu merupakan kaca *cult* yang paling berpotensi untuk didaur ulang karena memiliki stabilitas

termal yang paling tinggi, serta memiliki temperatur kristalisasi dan temperatur melting yang paling rendah dibandingkan kaca *cult* yang lain.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, analisis sifat termal kaca *cult* ini masih perlu disempurnakan. Oleh karena itu, saran yang dapat diberikan untuk penelitian mengenai potensi daur ulang kaca *cult* selanjutnya, antara lain parameter termal berupa perubahan entalpi perlu dikaji lebih lanjut untuk mengetahui besarnya energi yang diperlukan untuk mencapai suhu transformasi kaca, suhu kristalisasi dan suhu pelehan. Kajian ini guna menjadi dasar perhitungan efisiensi dari energi panas yang digunakan untuk melakukan proses daur ulang. Sifat mekanik produk hasil daur ulang dari kaca *cult* juga perlu dikaji dalam penelitian selanjutnya untuk menentukan potensi penggunaan produk hasil daur ulang tersebut. Selain itu, penelitian untuk memperoleh informasi lebih detail mengenai klasifikasi komposisi produk kaca komersil berdasarkan penggunaannya juga perlu dilakukan dalam penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah & H. Martono. 2010. Pengaruh Perlakuan Panas Dan Kandungan Limbah Terhadap Perubahan Struktur Gelas Limbah. *Journal of Waste Management Technology*, Vol.13 No.2.
- Aisyah. 2012. Perubahan Komposisi Bahan Pembentuk Gelas pada Karakteristik Gelas-Limbah. *Journal of Waste Management Technology*, Vol. 15, No. 2. ISSN 1410-9565.
- Cahyana, A., Marzuki, A. & Cari. 2014. *Kinematika Kristalisasi pada Kaca 60TeO₂-30ZnO-10Na₂O*, Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Pendidikan Fisika (SNFPF) Ke-5, Vol. 5 No. 1 ISSN: 2302-7827.
- Doremus, R. H. 1994. *Glass Science Second Edition*. New York: John Wiley & Sons. Inc.
- Ginting, A.B. 2005. *Analisis Kestabilan Panas Bahan Polimer Menggunakan Metode Thermal Gravimetry*. Prosiding PPI-PDIPTN, Puslitbang Teknologi Maju-BATAN, Jogjakarta, ISSN 0216-3128 pp. 35-41.
- Hatakeyama, T. & Zhenhai L. 1998. *Handbook of Thermal Analysis*. John Wiley & Sons. Inc.
- Hruby, A. 1972. Evaluation of Glass-Forming Tendency by Means of DTA. *Czech J. Phys.*, B 22 pp.1187-1188.
- Indiani, E. & Umiati N.A.K. 2009. Keramik Porselen Berbasis Feldspar sebagai Bahan Isolator Listrik. *Jurnal Telkomnika*, Vol. 7 No. 2 pp. 83-92.
- Kosuge, T., Y. Benino, V. Dimitrov, R. Sato & T. Komatsu. 1998. Thermal Stability and Heat Capacity Changes at The Glass Transition in K₂O-WO₃-TeO₂ Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 242 pp. 154-164.
- Kumar, S. & K. Singh. 2012. Glass Transition, Thermal Stability and Glass Forming Tendency of Se_{90-x}Te₅Sn₅In_x Multi-Component Chalcogenide Glasses. *Thermochimica Acta*, 528 pp. 32-37.
- Melichar, T. & Bydzovsky, J. 2015. Sintered Board Materials Based On Recycled Glass. *Materials and technology*, 49(4): 607–611.
- Nagashaki, M. 1979. *Introduction to Experimental Techniques for Thermal Analysis*, Shinku Riko Press.

- Pramuda, A., Marzuki A., Cari, Wahyudi & Susanto, R. 2013. Penentuan Indeks Bias Kaca TBZP Terdedah Ion Nd^{3+} dengan Metode Sudut Brewster. *Jurnal MIPA*, 36 (2): 131-144.
- Qiang, J.B., W. Zhang & A. Inoue. 2008. Effects of Al and Ti Additions on The Thermal Stability, Glass-Forming Ability and Mechanical Properties of $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{20}\text{Zr}_{20}$ Glassy Alloy. *Materials Science and Engineering*, B 148 pp. 114–118.
- Royall, P.G., Craig, D.Q.M. & Doherty, C. 1998. Characterisation of the Glass Transition of an Amorphous Drug Using Modulated DSC. *Pharmaceutical Research*, Vol. 15 No. 7.
- Sahar, M.R. 1998. *Sains Kaca*. Skudai, Johor Darul Ta'zim: Universiti Teknologi Malaysia.
- Sahar, M.R. 2000. *Fizik Bahan Amorfus*. Skudai, Johor Darul Ta'zim: Universiti Teknologi Malaysia.
- Sartono, B., A. Marzuki & Cari. 2014. Karakterisasi Optik Kaca TZN yang Sebagian Berfase Kristal. *Jurnal Materi dan Pembelajaran Fisika (JMPPF)*, Vol. 4 No. 1 ISSN: 2089-6158.
- Shelby, J.E. 2005. *Introduction to Glass Science and Technology, 2nd Edition*. Cambridge, United Kingdom: The Royal Society of Chemistry.
- Simon, V., D. Muresan & S. Simon. 2007. Iron effect on glass stability of sodium-calcium-phosphate glasses. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 37 pp. 219–222.
- Sulhadi. 2007. *Structural and Optical Properties of Erbium Doped Tellurite Glasses*. Disertasi. Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.
- Sulhadi, Khumaedi, & A. Yulianto. 2010. *Aplikasi Proses Oksidasi untuk Menentukan Potensi Daur Ulang Limbah Kaca (Cult)*. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY, pp. 61-66.
- Sulhadi, M.I. Savitri, M.A.N. Said, I. Muklisin, R. Wicaksono, & M.P. Aji, 2014. *Fabrication of Mesoporous Composite From Waste Glass and Its Use as a Water Filter*. AIP Conference Proceedings. 1586: 139-142.
- Suyoto, B. 2008. *Fenomena Gerakan Mengolah Sampah*. Jakarta: PT. Prima Infosarana Media.
- Taurino, R., P. Pozzi, G. Lucchetti, L. Paterlini, T. Zanasi, C. Ponzoni, F. Schivo & L. Barbieri. 2013. New Composite Materials Based on Glass Waste. *Journal of Composites: Part B*, 45 pp. 497–503.

- Vieitez, E.R., Eder, P., Villanueva, A., & Saveyn, H. 2011. End-of-Waste Criteria for Glass *Cult: Technical Proposals*. Luxembourg: Publications Office of The European Union. EUR – *Scientific and Technical Research series* – ISSN 1831-9424. ISBN 978-92-79-23101-8. doi:10.2791/7150.
- Wismogroho, A.P. & W.B. Widayatno. 2012. *Pengembangan Alat Differential Thermal Analysis untuk Analisis Termal Material Ca(OH)₂*. Telaah Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, 30 (1): 7-12, ISSN: 0125-9121.
- Xiao, X., F. Shoushi, W. Guoming, H. Qin & D. Yuanda. 2004. Influence of Beryllium on Thermal Stability and Glass-Forming Ability of Zr-Al-Ni-Cu Bulk Amorphous Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 376 pp. 145-148.
- Yanlinastuti, Indaryati, S. & Rahmiati. 2009. *Analisis Sifat Termal Logam Uranium, Paduan Uno dan UmoSi Menggunakan Differential Thermal Analyzer*, Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir, Yogyakarta, ISSN 1978-0176.
- Yatsenko, E.A., B.M. Goltsman, V.A. Smolii & A.S. Kosarev. 2015. Foamed Slag Glass – Eco-Friendly Insulating Material Based on Slag Waste. *IEEE*. 978-1-4799-7993-6/15/\$31.00.
- Zhang, W., F. Jia, Q. Zhang & A. Inoue. 2007. Effects of Additional Ag on The Thermal Stability and Glass-Forming Ability of Cu-Zr Binary Glassy Alloys. *Materials Science and Engineering*, A 459 pp. 330-336.