

**SINTESIS LITIUM SILIKAT UNTUK KONSOLIDASI
BATUAN ANDESIT DI BALAI KONSERVASI BOROBUDUR**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat mencapai
gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Program Studi Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**



Diajukan oleh:

**MAYA AGUSTINA DWI JAYANTI
No Mahasiswa: 13612113**

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2016**

**SINTESIS LITIUM SILIKAT UNTUK KONSOLIDASI
BATUAN ANDESIT DI BALAI KONSERVASI
BOROBUDUR**

oleh:

**MAYA AGUSTINA DWI JAYANTI
No. Mahasiswa: 13612113**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Penguji Ujian Skripsi
Program Studi Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Islam Indonesia

Tanggal: 19 Desember 2016

Dewan Penguji

1. Prof. Riyanto, Ph.D.
2. Nahar Cahyandaru, S.Si., M.Dip.
3. Wiyogo Prio Wicaksono, S.Si., M.Si.
4. M. Arsyik Kurniawan S., S.Si., M.Sc.

Tanda Tangan



البحث والابتكار الانساني

Mengetahui,
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Islam Indonesia



(Drs. Allwar, M.Sc., Ph.D.)
NIK. 966120101



SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maya Agustina Dwi Jayanti

NIM : 13612113

Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Dengan ini menyatakan bahwa judul skripsi "SINTESIS LITIUUM SILIKAT UNTUK KONSOLIDASI BATUAN ANDESIT DI BALAI KONSERVASI BOROBUDUR" benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 21 Desember 2016

Yang membuat pernyataan,



Maya Agustina Dwi Jayanti

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **SINTESIS LITIMUM SILIKAT UNTUK KONSOLIDASI BATU ANDESIT DI BALAI KONSERVASI BOROBUDUR** untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan studi serta dalam rangka memperoleh gelar Sarjana Strata Satu pada Program Studi Kimia Fakultas matematika dan ilmu pengetahuan alam di Universitas Islam Indonesia.

Penghargaan dan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Ayahanda tercinta dan Ibunda yang kusayangi yang telah mencurahkan segenap cinta dan kasih sayang serta perhatiannya. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan Rahmat, Kesehatan, Karunia dan keberkahan di dunia dan di akhirat atas budi baik yang telah diberikan kepada penulis. Penulis juga mengucapkan terimakasih banyak kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat, nikmat, petunjuk dan karunia-Nya serta memberikan perlindungan, kemudahan serta kesabaran dalam setiap pekerjaan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian skripsi dan penulisan skripsi dengan sebaik-baiknya
2. Bapak Drs. Allwar. M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Islam Indonesia
3. Ibu Dr. Is Fatimah selaku ketua Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Islam Indonesia

4. Bapak Prof. Riyanto, Ph.D. selaku pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan serta motivasi dalam penelitian dan penyusunan skripsi.
5. Bapak Nahar Cahyandaru, S.Si., M.Dip. selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan serta motivasi dalam penelitian dan penyusunan skripsi.
6. Mas Yudhi Atmaja, Mbak Yuyun, Mas Widyo, Bapak Santoso, Mas Linus, Bu Dian, Bapak Ahmad, Bapak Roni dan segenap pegawai Balai Konservasi Borobudur yang telah membantu dalam penelitian skripsi.
7. Teman-teman seperjuangan (AKB 13) atas segala kegiatan yang telah dilakukan bersama-sama

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna karena masih banyak kekurangan yang ada pada penulis. Semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Yogyakarta, Desember 2016

Penulis

(Maya Agustina Dwi Jayanti)
NIM : 13612113

SINTESIS LITHIUM SILIKAT UNTUK KONSOLIDASI BATUAN ANDESIT DI BALAI KONSERVASI BOROBUDUR

INTISARI

MAYA AGUSTINA DWI JAYANTI

NIM : 13612113

Telah dilakukan sintesis lithium silikat sebagai bahan konsolidasi alternatif. Lithium hidroksida ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) dan aerosil SiO_2 digunakan sebagai prekursor serta asam sitrat sebagai pengkhelet. Variasi rasio mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 3,5:1 mol, 4:1 mol, 4,5:1 mol dilakukan untuk mengetahui arah reaksi produk yang akan dihasilkan. Hasil sintesis dikarakterisasi dengan TGA/DTA, XRD dan FTIR. Lithium orthosilikat diujikan sebagai bahan konsolidan mortar andesit dengan konsentrasi larutan 10% b/v, mortar dicetak dan dikeringkanselama 15 hari, kemudian mortar dikarakterisasi menggunakan, XRF, SEM, kekerasan dan kapilaritas.

Karakterisasi dengan FTIR menyatakan bahwa ketiga variasi mol dalam sintesis mengarah pada produk yang sama. Hasil TGA/DTA dan XRD menunjukkan bahwa kristal lithum ortosilikat berhasil disintesis pada temperatur 675°C . Hasil mortar yang dibuat menggunakan litium silikat (perbandingan $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 4:1 mol) memiliki nilai kekerasan 3-4 mohs, kandungan SiO_2 43,575%. Hasil SEM menunjukkan bahwa partikel andesit terdistribusi dengan baik. Mortar yang dihasilkan mendekati sifat fisik batu andesit yang dapat dilewati oleh air, hal ini dibuktikan dengan mortar memiliki porositas 11,69% dengan kecepatan rambat air 0,226 cm/menit dan massa air total $1,403 \text{ g/cm}^3$. Dari data pengukuran tersebut diketahui bahwa litium silikat yang disintesis dari perbandingan rasio mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 4:1 mol memberikan hasil mortar yang optimum.

Kata Kunci : Sintesis lithium silikat, konsolidasi, batu andesit

SYNTHESIS OF LITHIUM SILICATE FOR CONSOLIDATION ANDESIT STONE IN BALAI KONSERVASI BOROBUDUR

ABSTRACT

**MAYA AGUSTINA DWI JAYANTI
NIM: 13612113**

Synthesized lithium silicate as an alternative consolidation material had been done. Lithium hydroxide ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) and aerosol (SiO_2) used as precursor and citric acid as a chelating. Variations mol ratio of $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 3.5:1 mol, 4: 1 mol, 4.5: 1 mol conducted to determine the direction of the reaction product. The result of the synthesis is characterized by TGA / DTA, XRD and FTIR. Lithium orthosilicate tested as a consolidation materials mortar andesite with a concentration of 10% w/v. Mortar is molded and dried for 15 days, then mortars were characterized using, XRF, SEM, hardness and capillarity.

Characterization by FTIR showed that the three variations of moles in the synthesis leads to the same product. The results of TGA/DTA and XRD showed that lithum orthosilicate successfully synthesised at a temperature of 675°C . Mortar made using the lithium silicate (a ratio of 4: 1 mol) has a hardness value of 3-4 mohs, SiO_2 of 43.575%. SEM results showed that the particle andesite distributed as a well. Mortar produced andesite approaching physical properties that can be passed by the water, this is evidenced by the mortar has a porosity of 11.69% with a water velocity of 0.226 cm/min and a total water mass of 1.403 g/cm^3 . From the measurement data it was found that the lithium silicate which is synthesized from the mol ratio of 4: 1 mol provide optimum results mortar.

Keywords: Synthesis of lithium silicate, consolidation, andesite stone

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
INTISARI	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Konsolidasi Batuan	6
2.2 Karakterisasi Batu Candi Borobudur	8
2.3 Sintesis Litium Silikat	10
BAB III DASAR TEORI	13
3.1 Batuan Penyusun Candi Borobudur	13
3.2 Kondisi Batu dilapangan	14
3.3 Komposisi Kimia Batuan	15
3.4 Mineralogi Batuan.....	19
3.5 Kerusakan dan Pelapukan Batu Candi Borobudur	23

3.6 Sol-gel	30
3.7 Litium Silikat.....	32
3.8 Fumed Silika (Aerosil)	34
3.9 Litium Hidroksida	35
3.10 Asam sitrat.....	36
3.11 X-Ray Fluoresence	37
3.12 X-Ray Difrraction.....	41
3.13 SEM.....	42
3.14 Uji kekerasan.....	43
3.15 FTIR	43
BAB IV METODE PENELITIAN	47
4.1 Alat.....	47
4.2 Bahan.....	47
4.3 Cara Kerja	48
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	49
5.1 Karakterisasi Litium Silikat	49
5.2 Hasil Konsolidasi Mortal Batu Andesit dengan Litium Silikat.....	56
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	62
6.1 Kesimpulan.....	62
6.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	67



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Pembentukan batuan beku berdasarkan penurunan temperatur21

Gambar 2. Struktur asam sitrat.....	37
Gambar 3. Peristiwa pada tabung sinar-x	38
Gambar 4. Bagan alat XRF	39
Gambar 7. FTIR litium silikat.....	49
Gambar 5. TGA/DTA litium silikat	51
Gambar 6. Difraktogram litium silikat.....	52
Gambar 10. Hasil konsolidasi	56
Gambar 11. Kondisi mortal setelah kapilarisasi	58
Gambar 12. Hasil SEM pada konsolidasi menggunakan litium silikat.....	59



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi kimia batuan penyusun Candi Borobudur	21
Tabel 2. Ukuran dan komposisi mortal	48

Tabel 4. Perbandingan spektrum FTIR	50
Tabel 3. Perbandingan puncak 2 tetha	53
Tabel 5. Hasil kekerasan konsolidasi	56
Tabel 6. Kandungan SiO ₂	57
Tabel 7. Parameter analisis mortar batuandesit.....	61



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan massa LiOH dan SiO₂ pada masing-masing

variasi mol.....	67
Lampiran 2. Massa hasil litium silikat secara teoritis	68
Lampiran 3. Perhitungan persen rendemen hasil sintesis litium silikat	69
Lampiran 4. Proses persiapan sampel batu andesit.....	70
Lampiran 5. Proses sintesis litium silikat.....	72
Lampiran 6. Hasil mortar andesit.....	73
Lampiran 7. Alat sintesis dan analisis yang digunakan	74
Lampiran 8. Hasil karakterisasi.....	76



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia memiliki banyak peninggalan sejarah, baik berupa bangunan seperti candi, keraton, benteng pertahanan atau artefak, kitab sastra, dan lain-lain. Peninggalan sejarah merupakan warisan budaya masa lalu yang merepresentasikan keluhuran dan ketinggian budaya masyarakat. Peninggalan sejarah yang tersebar di seluruh kepulauan Indonesia merupakan kekayaan budaya yang harus dijaga dan dilestarikan eksistensinya karena dengan adanya peninggalan sejarah, bangsa Indonesia dapat belajar dari kekayaan budaya masa lalu untuk menghadapi tantangan dalam kehidupan berbangsa dan bernegara pada saat ini dan masa yang akan datang. Dalam hal ini, pemerintah menyadari bahwa peninggalan sejarah merupakan warisan budaya yang memiliki nilai historis.

Dalam UU No. 5 Tahun 1992 yang dimaksud dengan benda cagar budaya adalah benda buatan manusia, bergerak atau tidak bergerak yang berupa kesatuan atau kelompok, atau bagian-bagian atau sisa-sisanya, yang berumur sekurang-kurangnya 50 tahun, atau mewakili masa gaya yang khas dan mewakili masa gaya sekurang-kurangnya 50 tahun, serta dianggap mempunyai nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan, dan kebudayaan, benda alam yang dianggap mempunyai nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan dan kebudayaan (UU No. 5 Tahun 1992 Pasal 1) (Haldoko, dkk., 2014).

Peninggalan sejarah yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia harus dijaga dan dilestarikan agar nilai-nilai luhur budaya bangsa Indonesia tetap terpelihara. Untuk melindungi benda-benda peninggalan sejarah yang menjadi kekayaan budaya bangsa tersebut, pemerintah mengeluarkan Undang-undang No 5 Tahun 1992, dan Peraturan Pemerintah (PP) No 10 Tahun 1993 sebagai

pedoman pelaksanaan undang-undang tersebut. UU No. 5 Tahun 1992 merupakan penyempurnaan dari produk hukum sebelumnya yaitu *Monumenten Ordonantie* Nomor 21 Tahun 1934 (*Staatsblad* Tahun 1934 Nomor 515) (Haldoko, dkk., 2014).

Candi Borobudur merupakan salah satu warisan budaya dunia (*World Heritage*) dan warisan budaya Indonesia yang tersusun dari batuan andesit didirikan pada tahun 800 M. Candi borobudur kembali dilakukan pemugaran pada tahun 1835 M oleh Theodore Van Erp kemudian dilakukan usaha perbaikan secara bertahap yaitu penempatan stupa, ukir-ukiran dan sebagainya. Karena posisi bangunan berada diatas bukit dan kekhawatiran akan terjadi kerusakan yang lebih parah atau hal yang lebih buruk bagi para pengunjung maka dilakukan pemugaran (Munandar, 2000).

Candi Borobudur terletak di alam terbuka sehingga sangat rentan terhadap proses kerusakan maupun pelapukan. Seperti proses pelapukan yang disebabkan oleh faktor iklim seperti retakan, penggaraman dan lain-lain. Batu candi yang berwarna gelap memiliki densitas lebih besar dibandingkan batu candi yang berwarna cerah karena kandungan ferro magnesium-nya lebih tinggi. Selain itu batu candi yang berwarna gelap mampu menyerap panas lebih besar dibandingkan dengan batu candi yang berwarna cerah. Batu candi yang ditumbuhi lumut memiliki densitas lebih kecil dan porositas lebih besar jika dibandingkan batu candi yang tidak ditumbuhi lumut. Kandungan silika pada batu candi yang ditumbuhi lumut lebih rendah jika dibandingkan dengan yang tidak ditumbuhi lumut. Hal ini karena proses pelapukan yang terjadi menyebabkan berkurangnya

kadar silika pada batu. Selain itu, kandungan kalium pada batu candi yang ditumbuhi lumut lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang tidak ditumbuhi lumut, karena kalium merupakan unsur yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan lumut. Oleh karena itu, perlu dilakukan pelestarian dan pemeliharaan untuk mengatasi kerusakan/pelapukan bahan bangunan candi atau perawatan candi yang mengalami retakan, patahan (Haldoko, dkk., 2014).

Bahan perekat agregat yang telah digunakan dalam konsolidasi batuan ialah epoksi resin yang digunakan untuk penyambungan batuan yang mengalami kerusakan. Penggunaan epoksi resin untuk penyambungan batuan yang mengalami kerusakan seperti patah atau terbelah serta untuk kamufase permukaan batu yang rusak dikenal semenjak pemugaran Candi Borobudur tahap II. Setelah pemugaran tahap II selesai dilakukan, Candi Borobudur ditetapkan sebagai *World Culture Heritage* oleh komite warisan dunia (UNESCO) pada tahun 1991. Sehingga pengelolaan dan pemeliharaan candi tersebut harus mengikuti aturan yang ditetapkan dan dimonitoring oleh UNESCO. Salah satu hasil monitoring yang dilakukan tahun 2009 menyatakan bahwa UNESCO tidak melanjutkan kegiatan yang berdampak buruk pada Candi Borobudur serta melanjutkan monitoring penelitian dan pengujian aktivitas untuk menemukan pengganti epoksi resin. Epoksi adalah kopolimer yang terbentuk dari dua bahan kimia yang berbeda. Epoksi resin umumnya diproduksi dari reaksi antara epiklorohidrin dan bisphenol-A. Ketika senyawa ini dicampur, kelompok amina bereaksi dengan gugus epoksida untuk membentuk ikatan kovalen. Setiap kelompok NH dapat bereaksi dengan grup epoksida sehingga polimer yang

dihasilkan kaku dan kuat, namun penggunaan epoksi resin justru diketahui dapat mempercepat kerusakan cagar budaya. Hal tersebut disebabkan karena epoksi memiliki sifat yang kedap air sehingga air dari luar baik itu air hujan maupun air dari kelembaban tertahan dan terakumulasi dibagian yang tertutup oleh resin yang menimbulkan efek lain terhadap cagar budaya tersebut (Anonim, 2014).

Selain epoksi resin, etil silikat juga telah digunakan sebagai bahan konsolidan batu Candi Borobudur, kelemahan etil silikat yaitu tidak dapat diterapkan pada batu yang basah atau batu yang memiliki kelembaban tinggi karena sifatnya yang hidrofobik (Thorn, 2011).

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai bahan konsolidasi alternatif yang lebih efektif dan efisien. Pada penelitian ini dilakukan kajian lebih lanjut mengenai litium silikat (Li_4SiO_4) yang diujikan sebagai bahan konsolidasi melalui pembuatan mortar andesit. Litium silikat disintesis dengan variasi rasio mol litium hidroksida (LiOH) dan aerosil (SiO_2) serta asam sitrat digunakan sebagai agen khelat.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana hasil sintesis dan karakterisasi litium silikat dengan menggunakan litium hidroksida (LiOH) dan *fume silica* (SiO_2)?

2. Berapa komposisi rasio mol optimum litium hidroksida (LiOH) dan *fume silica* (SiO₂) dalam sintesis litium silikat sebagai konsolidan yang menghasilkan mortar terbaik?

1.3 Tujuan penelitian

1. Mengetahui hasil sintesis dan karakterisasi litium silikat dengan menggunakan litium hidroksida (LiOH) dan *fume silica* (SiO₂) sebagai bahan baku.
2. Mengetahui komposisi rasio mol optimum litium hidroksida (LiOH) dan *fume silica* (SiO₂) dalam sintesis litium silikat sebagai konsolidan yang menghasilkan mortar terbaik

1.4 Manfaat penelitian

Memberikan bahan konsolidan alternatif untuk batu andesit dalam upaya konservasi cagar budaya Indonesia. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan formula konsolidan yang sesuai dengan kondisi lingkungan cagar budaya di Indonesia karena selama ini masih menggunakan produk impor sebagai bahan konsolidan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Batu Candi Borobudur

Beberapa penelitian tentang batu penyusun Candi Borobudur pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan Leisen and Leisen (2012) menerangkan bahwa pola dan tingkat pelapukan pada setiap individu blok batu sangat tergantung pada varietas batunya. Selain itu, penelitian mengenai karakteristik material di situs dan di laboratorium menunjukkan hasil yang berbeda untuk tiap masing-masing jenis batu. Ariyanto (1993) menerangkan bahwa faktor utama yang menyebabkan terjadinya pengelupasan batu penyusun Candi Borobudur adalah akibat pemuaihan dan pengerutan yang berbeda antara mineral-mineral pembentuk batuan dengan endapan garam.

Analisis sifat fisik batu yang dilakukan di laboratorium meliputi densitas, porositas, daya serap air, kekerasan dan temperatur. Hasil analisis sifat fisik batu yang dilakukan menyatakan bahwa, nilai densitas lebih tinggi pada batu berwarna gelap karena kandungan ferro magnesium yang lebih tinggi. Nilai berat jenis batu candi mengikuti pola yang sama dengan densitasnya, dimana batu yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi, densitasnya juga lebih tinggi. Nilai berat jenis ini berbanding terbalik dengan nilai porositas maupun daya serap airnya. Hal ini karena batuan dengan rapat massa yang lebih besar akan memiliki volume pori yang lebih kecil. Untuk kekerasan batu, nilai yang didapatkan relatif sama yaitu 4-6 skala mohs. Nilai kekerasan 6 skala mohs didapat pada batuan yang tekstur permukaannya halus (pori-pori batu kecil), sedangkan nilai kekerasan 4 skala mohs didapat dari andesit yang tekstur permukaannya kasar. Untuk pengukuran temperatur, andesit dengan warna gelap mampu menyerap panas yang lebih besar dibandingkan dengan andesit berwarna cerah. Hal ini disebabkan andesit

berwarna gelap memiliki kandungan ferro magnesium yang lebih tinggi, sehingga kemampuan menyerap dan menyimpan panas juga lebih tinggi (Haldoko, dkk., 2014).

Berdasarkan pengamatan dan penelitian batuan penyusun Candi Borobudur, batu kulit adalah jenis andesit, baik batu polos maupun batu relief. Batuan tersebut diperkirakan diambil dari Sungai Krasak berdasarkan kesamaan sifat-sifat batuanya dengan yang terdapat pada Candi Borobudur (Ariyanto, 1993).

2.2 Konsolidasi Batuan

Konsolidasi merupakan upaya untuk mengembalikan kekuatan dari batu, sehingga tidak menjadi semakin rusak. Batu yang mengalami pelapukan akan mudah rusak karena ikatan antar partikel penyusun batu yang telah melemah. Batu menjadi rapuh dan butiran-butiran partikel penyusun batu tersebut dapat terlepas dari batu. Konsolidasi dilakukan untuk menguatkan kembali ikatan antar partikel sehingga batu menjadi kuat kembali. Material konsolidan yang digunakan harus mampu mengikat antar partikel dan mengisi celah-celah antar partikel yang renggang.

Batu telah digunakan oleh manusia sebagai bahan bangunan, dan untuk patung selama ribuan tahun, karena kekuatan dan daya tahannya yang relatif tinggi. Namun, karena banyaknya polusi dari industri menyebabkan peningkatan kerusakan terhadap lingkungan termasuk batu. Konservasi pada batu dilakukan untuk mencegah kerusakan oleh garam terlarut dalam batu yang menjadi faktor kerusakan pada batu. Penelitian ini difokuskan pada perawatan konsolidasi Chamunda Devi yang berada di kampus Mahadev Temple, Bastar dari

Chatishgarh India. Konsolidasi dilakukan dengan mengikat garam dengan konsolidan, sehingga menekan aktivitas garam tersebut. Hal ini merupakan salah satu tujuan ketika konsolidan pertama kali diselidiki pada awal tahun 1970-an. Namun, beberapa benda masih menunjukkan pengkristalan setelah konsolidasi (Gupta, 2011).

Konsolidan berbahan dasar *alkoxysilanes*, seperti *tetraethoxysilane* (TEOS) telah diterapkan secara luas pada cagar budaya berbahan batu di Korea karena dapat menembus kedalam kerusakan batu dan konsolidan berpolimerisasi dalam struktur berpori dari batu yang rusak dengan cara proses sol-gel. Konsolidasi ini secara signifikan meningkatkan kohesi di antara butir batu yang rusak. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi interaksi antara TEOS berbasis gel dan permukaan butir batu yang rusak sehingga bermanfaat dalam peningkatan pelestarian budaya monumen batu. Choi, *et al.*, (2012) mengembangkan interaksi antara batu dan konsolidan dengan *pretreatment alkoxysilanes*, dan telah dikarakterisasi untuk aplikasi konsolidan batu granit di Korea. Efek dari *pretreatment* dengan *alkoxysilanes* dibandingkan dengan larutan berbahan dasar TEOS termasuk produk komersial seperti Wacker OH 100. *Alkoxysilanes* digunakan untuk memperbaiki partikel SiO_2 dan diperoleh gel kering bebas retak untuk konsolidan. Uji yang dilakukan pada lampisan permukaan batu granit di Korea menunjukkan peningkatan interaksi batu dengan konsolidan TEOS.

Proses sol-gel telah berhasil diaplikasikan untuk konservasi dan restorasi batu. Namun, kelemahan dari hasil yang diperoleh oleh proses ini adalah

kecenderungan retaknya pori-pori batu yang dikonsolidasi selama pengeringan. Penelitian lebih lanjut dilakukan dengan peran surfaktan sebagai template untuk membuat ukuran pori kasar sehingga jaringan gel lebih seragam untuk memberikan alternatif yang efektif untuk mencegah konsolidan yang retak. Mosquera, *et al.*, (2009) juga meneliti alternatif lainnya dengan penambahan komponen organik untuk prekursor silika terhadap surfaktan. Gel organik-anorganik *hybrid* yang disiapkan di laboratorium menghasilkan sifat menolak air terhadap batu yang diteliti.

Salah satu keterbatasan konsolidan etil silikat yaitu tidak cocok untuk batu dalam lingkungan yang memiliki kelembaban tinggi. Air atau kelembaban yang tinggi menyebabkan konsolidan bereaksi terlalu cepat selain itu permukaan batu harus dijaga tetap hidrofobik hingga 8 minggu. Reaksi hidrolisis yang cepat mengarah ke pengembangan silika yang sedikit dan dengan demikian kemampuan mengikat terhadap batu lebih rendah (Thorn, 2012).

Litium silikat mengatasi kekurangan etil silikat yang membentuk litium karbonat dan kalsium silikat selain pembentukan silika. Selain hal tersebut, litium silikat dapat diterapkan pada batu dengan kondisi basah atau lembab. Hal ini mengatasi beberapa masalah ketidakcocokan yang dihadapi dengan silan yang diterapkan pada substrat *calcitic* (Wheeler, 2005).

Telah dilakukan penelitian di Perancis yang menunjukkan bahwa litium silikat merupakan konsolidasi bermanfaat untuk marmer dan dianggap sebagai konsolidan ideal untuk kapur dan pasir plester, termasuk fresco. Penelitian juga

sedang dilakukan untuk mengkonsolidasikan tanah liat mendukung lukisan yang sebelumnya telah distabilkan dengan silika koloid (Matteini, 2013).

Litium silikat tidak mengandung kelompok hidrofobik dan reaksi dapat berlangsung sepenuhnya dalam lingkungan hidrofilik. Hal ini, menjadikan litium silikat memiliki potensi besar sebagai konsolidan untuk permukaan basah. Pada penelitian ini membahas masalah konsolidasi terkait dengan empat lokasi, tuff vulkanik di Selandia Baru, sebuah gua kapur di Kepulauan Chatham, sebuah kalsit konsolidasi gundukan pasir di Australia Barat dan konglomerat berbutir halus di Uluru di Australia tengah. Masing-masing dari empat lokasi menyajikan tipologi pelestarian yang telah membatasi bagi kebanyakan metode konsolidasi lainnya. Ketidakcocokan antara kelembaban dan konsolidan dan bahwa antara kalsit dan silane telah diatasi dengan sistem saat ini. Manfaat lain dari litium silikat yang patut dipertimbangkan dalam banyak perawatan utama di mana solusi sudah ada seperti dengan kemampuan konsolidasi etil silikat sementara *miscibility* air dan dilusi rasio yang membuatnya lebih aman untuk digunakan, lebih mudah diangkut, dan lebih murah (Thorn, 2012).

2.3 Sintesis Litium Silikat

Larutan basa dalam telah dikembangkan untuk mensintesis kristal litium silikat (Li_4SiO_4) pada temperatur 500°C . Litium hidroksida ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) dan litium nitrat (LiNO_3) digunakan sebagai bahan dasar untuk mensintesis senyawa litium silikat dalam penelitian ini. Pada tahap analisis, luas permukaan dan morfologi, temperatur dari kedua bahan harus diketahui dan dilakukan perbandingan mol $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ dan LiNO_3 (Chang, *et al.*, 2001).

Penelitian mengenai sintesis Litium silikat dilakukan dengan menggunakan $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ dan SiO_2 sebagai bahan dasar pembuatan Li_4SiO_4 dengan asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}$) sebagai agen khelat. Serbuk Li_4SiO_4 dengan ukuran partikel sekecil 100 nm dapat disintesis pada temperatur sekitar 675°C . Hasil yang didapat menunjukkan bahwa kristal yang diperoleh dari sol-gel pada proses *water-based* memperlihatkan suatu penyusutan yang linier 5.2% saat dikalsinasi pada 900°C . Daya konduksi sol gel jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lainnya dimana sampel di uji pada temperatur yang sama (Wu, *et al*, 2009).

Litium silikat dapat disintesis dari LiOH , Asam sitrat, dan SiO_2 dengan rasio mol 12:4:3, LiOH dilarutkan dengan aquades dan asam sitrat dimana pH larutan diatur hingga pH 8,5. Konsentrasi LiOH dalam larutan ialah 0,3 mol/L. SiO_2 ditambahkan kedalam larutan dan dipanaskan pada suhu 70°C hingga membentuk gel transparan. maka sol-gel dimasukan ke dalam aseton oleh *nozzle* dan gel terbentuk karena efek dehidrasi dari aseton dan efek tegangan permukaan. Gel dimasukan kedalam aseton hingga waktu yang cukup untuk mencapai stabilitas yang lebih besar proses *aging* dilakukan pada suhu kamar maka diperoleh gel dikeringkan perlahan-lahan pada suhu $60\text{-}150^\circ\text{C}$ (Wu, *et al.*, 2010).

Serbuk litium ortosilikat dibuat dengan menggunakan dua prekursor yang berbeda yaitu, $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ dan LiNO_3 . Dengan jumlah $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 0,4 mol (16,784 g) dan 0,4 mol (27,576 g) dari LiNO_3 . Masing-masing bahan dilarutkan secara terpisah menggunakan 150 ml aquades. Setelah larutan litium hidroksida dan litium nitrat disiapkan, ditambahkan SiO_2 dengan jumlah 0,1 dengan luas

permukaan yang spesifik dari 350 m²/g ke masing-masing larutan. Setelah 20 menit pengadukan dan pencampuran, larutan homogen dimasukkan kedalam evaporator buchi pada tekanan 600 mbar pada 140°C selama 1 jam, diikuti dengan tekanan 100 mbar pada suhu yang sama selama 2 jam. Serbuk kemudian dipanaskan dengan variasi pengaturan suhu yang berbeda mulai 300-800°C pada selang waktu 100°C selama 2 jam (Chang, *et al.*, 2001).



BAB III

DASAR TEORI

3.1 Batuan Penyusun Candi Borobudur

Candi Borobudur merupakan salah satu warisan budaya Indonesia yang telah diakui sebagai salah satu warisan budaya dunia. Candi Borobudur dibangun sekitar tahun 800-an Masehi oleh para penganut agama Buddha Mahayana pada masa pemerintahan Raja Samaratungga yang berasal dari wangsa atau Dinasti Syailendra, dan merupakan tempat pemujaan bagi pemeluk agama Buddha. Candi Borobudur terletak di Desa Borobudur, Kecamatan Borobudur, Kabupaten Magelang. Secara astronomis Candi Borobudur terletak pada $7^{\circ}36'28''$ lintang selatan dan $110^{\circ}12'13''$ bujur timur. Candi Borobudur tersusun oleh andesit yang memiliki porositas tinggi. Karena porositas tinggi inilah, andesit penyusun Candi Borobudur memiliki kuat tekan yang tergolong rendah jika dibandingkan dengan batuan sejenis (Sampurno, 1969). Andesit dipilih karena ketersediaannya yang banyak, mengingat gunung api di Pulau Jawa kebanyakan mengandung magma *intermediet* dan membeku ketika mencapai puncak, sehingga menghasilkan batuan beku jenis andesit (Haldoko, dkk., 2014).

Andesit termasuk dalam batuan beku *intermediet* dengan kandungan silika 52-66%, memiliki tekstur yaitu *fenokris* (butiran kristal) dikelilingi oleh massa dasar yang *afanitik* (halus), dengan komposisi mineral utama plagioklas, mineral aksesori hornblende, biotit, piroksen dan massa dasar dapat berupa mineral *felsic* (asam, warna cerah) atau mineral (basa, warna gelap). Sedangkan batu candi dipilih yang memiliki porositas tinggi, karena dengan porositas tinggi maka batuan akan lebih mudah dipahat. Meskipun secara umum penyusun Candi

Borobudur merupakan batu yang sejenis (andesit), penyusun tersebut memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga memiliki tingkat kerusakan dan pelapukan yang berbeda. Kerusakan dan pelapukan ini banyak sekali macamnya, yang disebabkan oleh faktor penyebab yang berbeda-beda pula (Haldoko, dkk., 2014).

3.2 Kondisi Batuan di Lapangan

Candi Borobudur tersusun atas andesit. Namun jika diamati, andesit penyusun Candi Borobudur memiliki beberapa macam karakteristik, misalnya dilihat dari segi warna, pertumbuhan lumut maupun munculnya endapan garam. Dari hasil pengamatan di lapangan Menurut Haldoko, dkk., (2014) andesit penyusun Candi Borobudur dapat dikelompokkan menjadi 5 macam warna, yaitu:

BDR 1 : andesit warna abu-abu

BDR 2 : andesit warna abu-abu kecokelatan

BDR 3 : andesit warna abu-abu kehitaman

BDR 4 : andesit warna kemerahan

BDR 5 : andesit warna hitam

Pelapukan yang terjadi pada batu Candi Borobudur salah satunya disebabkan oleh tumbuhan tingkat rendah seperti lumut yang tumbuh pada permukaan batu. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan, pertumbuhan lumut pada tiap blok batu tidak sama. Ada blok batu yang banyak ditumbuhi oleh lumut, di sisi lain ada juga blok batu yang bersih dari pertumbuhan lumut. Hal ini disebabkan oleh faktor internal maupun eksternal. Faktor eksternal antara lain adalah keberadaan air yang membuat batuan menjadi lembab maupun intensitas sinar matahari. Sedangkan faktor internal sangat erat kaitannya dengan

karakteristik batu itu sendiri antara lain: porositas, daya serap air maupun unsur yang terkandung dalam batu tersebut. Jenis pelapukan lain yang terjadi pada batu Candi Borobudur adalah pelapukan kimia yang berupa penggaraman (Haldoko, dkk., 2014).

Munculnya penggaraman ini disebabkan oleh unsur yang ada pada batu terlarut oleh air dan keluar melalui pori-pori batu akibat penguapan lalu mengendap di permukaan batu. Karena itulah banyak faktor yang menyebabkan penggaraman terjadi baik faktor internal maupun eksternal. Faktor eksternal yang bekerja adalah air, karena keberadaan air ini dapat melarutkan unsur yang terkandung pada batu. Selain itu faktor internal juga sangat mempengaruhi terjadinya penggaraman, seperti keberadaan unsur yang dapat terlarut oleh air maupun porositas batuan, karena keberadaan pori-pori pada batuan ini menjadi celah untuk keluarnya hasil pelarutan yang pada akhirnya akan mengendap di permukaan batuan. Selanjutnya yang dilakukan adalah analisis sifat fisik, komposisi kimia maupun mineralogi batuan. Pelapukan kimia Pelapukan yang terjadi pada material batuan sebagai akibat dari proses atau reaksi kimiawi seperti penggaraman dan korosi.

3.3 Komposisi Kimia Batuan

Di alam terdapat tiga jenis batuan yaitu, batuan beku (*igneus rock*), batuan endapan (*sedimentary rock*) dan batuan ubahan (*metamorphic rock*). Batuan beku adalah batuan yang terjadi dari pembentukan magma. Magma adalah larutan silikat alam yang bersifat cair, panas dan pijar penuh dengan gas-gas volatil (gas-gas yang sangat mudah menguap). Batu endapan adalah batuan yang terbentuk

karena proses pengendapan, proses kimia dan proses biologis, salah satu sifat yang khas adalah adanya pelapisan. Batuan ini berasal dari batuan beku yang karena adanya proses pelapukan, akibatnya batuan tersebut menjadi lunak dan hancur, lalu oleh media transport (dapat berupa angin, es, dan air) dihanyutkan atau dibawa ke tempat lain yang lebih rendah lalu diendapkan ditempat tersebut. Batuan ubahan adalah batuan yang terbentuk oleh batuan yang sudah ada sebelumnya karena adanya proses metamorfisme akibat perubahan suhu dan tekanan yang lebih tinggi yang terjadi di kerak bumi (Suharyadi, 1984).

Batu andesit adalah batuan beku yang mempunyai kandungan silika lebih tinggi dibandingkan dengan batuan basalt, dan mempunyai kandungan silika lebih rendah dibandingkan dengan batuan *rhyolite* atau *felsite*. Secara umum mempunyai warna yang menandakan dengan baik akan kandungan silika dari lava, dengan kandungan basalt yang terlihat gelap dan kandungan felsitenya terang. Walaupun demikian para geologis akan selalu melakukan analisa kimia di dalam identifikasi batuan andesite ini, di lapangan batuan ini dicirikan oleh warna abu-abu atau medium sampai merah dari lava andesit. Andesit dinamakan dari pegunungan Andes di Amerika Selatan, dimana busur batuan batuan vulkanik bercampur dengan magma basalt dengan batuan-batuan keras jenis granit yang menghasilkan lava dengan komposisi intermiediate. Batuan andesit mempunyai kandungan fluida lebih sedikit dibandingkan batuan basalt dan diletuskan dengan hebatnya dikarenakan adanya gas-gas terlarut yang terdapat di dalamnya (Suharyadi, 1984).

Batuan ini berasal dari pembekuan magma di dekat atau di atas permukaan bumi, karena itu sering disebut batuan beku luar. Kegunaan andesit antara lain untuk bahan bangunan dan fondasi jalan. Dalam masyarakat andesit sering disebut batu gunung. Keberadaannya dapat berupa batuan gunung maupun bongkah-bongkah batuan sungai.

Andesit sebagian besar berwarna gelap *vesicular* batuan vulkanik yang bisanya porfiritik (berisi kristal yang lebih besar diatur dalam massadsar halus). Fenokris (kristal lebih besar) terdiri dari plagioklas, kaya kalsium, kalsium-rendah piroksen, dan titanium oksida besi diatur dalam halus. Beberapa andesit mengandung fenokris dari olivine dan beberapa berisi amphibole dan biotit, batuan ini terakhir umumnya lebih banyak mengandung potassium. Sifat porfiritik andesit berasal dari sejarah rumut magmatik kristalisasi dan evolusi sebagai mencair naik ke permukaan dari dalam bumi. Kebanyakan gunung berapi di Indonesia meletus lava andesit dan tephra (abu vulkanik) yang berkisar dalam komposisi dari andesit basal ke dasit. Letusan sering meledak, mencerminkan air yang relatif tinggi dan kandungan gas dari magma. Aliran piroklastik adalah fitur tertentu dari tipevulkanisme andesit dan termasuk di antara yang paling berbahaya dari bahaya gunung berapi (Haldoko, dkk., 2014).

Batu andesit terbentuk pada temperatur menengah dan banyak mengandung mineral andesin. Batu andesit mempunyai komposisi mineralogi piroksin, plagioklas, kuarsa, dan feldspar. Piroksin merupakan mineral berwarna gelap-hitam dan termasuk mineral mafik karena kaya akan magnesium dan besi. Piroksin terutama terdiri dari mineral augit. Kuarsa mempunyai komposisi kimia

SiO₂. Feldspar terdiri dari orthoklas (KAlSi₃O₈). Sebagai sumber utama unsur K (Kalium) pada batu (Suharyadi, 1984). Plagioklas terdiri dari mineral-mineral yang merupakan larutan keras dari dua molekul Na(AlSi₃O₈) dan Ca(Al₂Si₂O₈) yang tercampur dalam segala perbandingan. Plagioklas, kuarsa dan feldspar berwarna terang (felsik) karena miskin akan magnesium dan besi. Batu andesit mempunyai komposisi kimia sebagai berikut: SiO₂ 46%, FeO₃ 1,39%, FeO 7,07%, MgO₃ 1%, CaO 7,47%, K₂O 1,60% dan P₂O₅ 0,28% (Haldoko, dkk., 2014).

Batu penyusun Candi Borobudur yang berjenis andesit tersusun atas komposisi kimia yang terdiri dari unsur-unsur utama yaitu silikat, aluminium, besi, kalsium, magnesium, natrium, dan kalium. Dari hasil analisis kimia batu penyusun Candi Borobudur didapatkan komposisi kimia yang tertera pada Tabel 1. Hasil analisis komposisi kimia andesit Candi Borobudur menunjukkan bahwa andesit berwarna cerah relatif memiliki kandungan silika lebih tinggi dari pada andesit berwarna gelap. Selanjutnya untuk kandungan besi (Fe), andesit berwarna gelap memiliki nilai yang lebih tinggi dari andesit berwarna terang hal ini karena kandungan mineral mafik (*ferro magnesium silikat*) lebih tinggi, sehingga menyebabkan warna yang lebih gelap. Adapun komposisi kimia batuan penyusun Borobudur ditunjukkan pada Tabel 1 (Haldoko, dkk., 2014).

Tabel 1. Komposisi kimia batuan penyusun Candi Borobudur

Parameter	BDR 1 (%)	BDR 2 (%)	BDR 3 (%)	BDR 4 (%)	BDR 5 (%)
Al ₂ O ₃	16,93	17,19	14,35	15,47	13

CaO	2,68	2,6	3,89	3,5	1,96
FeO	4,78	4,62	6,03	5,37	6,78
Fe ₂ O ₃	5,31	5,14	6,71	5,97	7,53
MgO	1,57	0,62	1,55	0,62	1,29
Na ₂ O	3,81	3,5	4,13	4,02	3,29
K ₂ O	2,83	2,35	2,65	2,88	2,73
SiO ₂	59,69	59,97	58,15	58,2	56,12

3.4 Mineralogi Batuan

Identifikasi karakteristik batuan dari asper tekstur dan komposisi mineralogi dilakukan dengan analisis petrografi menggunakan mikroskop polarisasi. tekstur dan komposisi mineralogi dilakukan pada sayatan tipis andesit penyusun Candi Borobudur, terlihat kenampakan yang sama dari segi tekstur dan komposisi mineral. Datanya adalah sebagai berikut:

- BDR 1 Warna abu-abu kecokelatan, tekstur porfiritik, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (25%), piroksen (15%), mineral opak (5%) dan massa dasar berupa plagioklas (35%) dan gelas vulkanik (20%).
- BDR 2 Warna abu-abu kecokelatan, tekstur porfiritik, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (30%), piroksen (15%), mineral opak (5%) dan massa dasar berupa plagioklas (30%) dan gelas vulkanik (20%).
- BDR 3 Warna abu-abu kecokelatan, tekstur porfiritik, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (20%), piroksen (20%), mineral opak (5%) dan massa dasar berupa plagioklas (35%) dan gelas vulkanik (20%).

- BDR 4 Warna abu-abu kecokelatan, tekstur porfiritik, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (25%), piroksen (20%), mineral opak (5%) dan massa dasar berupa plagioklas (30%) dan gelas vulkanik (20%).
- BDR 5 Warna abu-abu kecokelatan, tekstur porfiritik, bentuk subhedral-anhedral, komposisi mineral terdiri dari fenokris berupa plagioklas (20%), piroksen (20%), mineral opak (5%) dan massa dasar berupa plagioklas (30%) dan gelas vulkanik (25%).

Dari hasil petrografi tersebut menunjukkan bahwa andesit penyusun Candi Borobudur tersusun atas mineral yang sama yaitu plagioklas, piroksen, mineral opak dan gelas vulkanik, yang membedakan hanyalah pada persentase komposisinya saja. Plagioklas yang ada berjenis andesit. Andesit yang berwarna lebih cerah relatif memiliki kandungan plagioklas lebih tinggi dibandingkan yang berwarna lebih gelap. Sedangkan untuk kandungan piroksen, andesit yang berwarna lebih gelap memiliki komposisi lebih tinggi dibandingkan andesit yang berwarna lebih cerah.

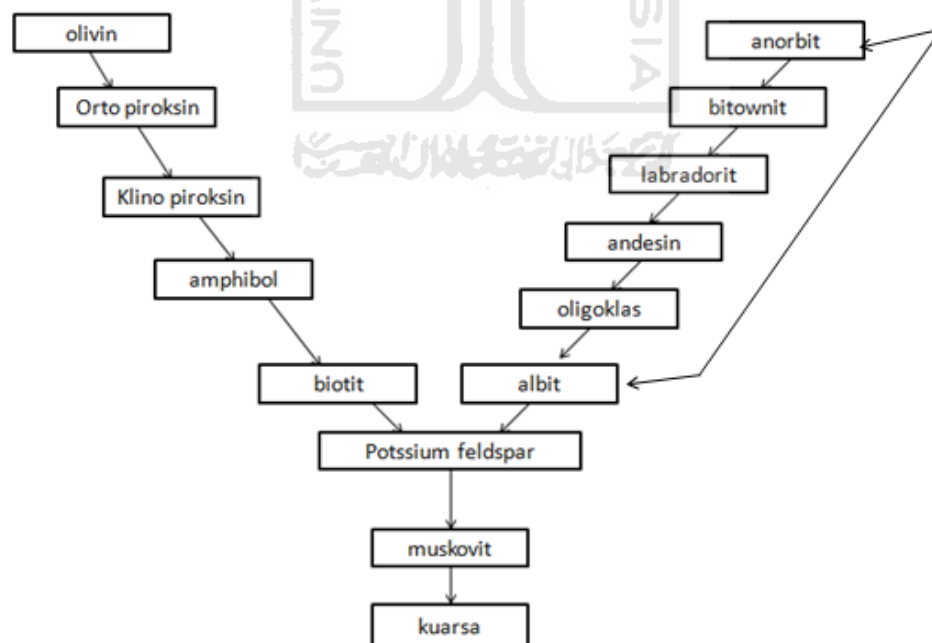
Batuan merupakan kumpulan dari mineral-mineral, dapat berasal dari satu jenis mineral ataupun dari berbagai jenis mineral. Mineral batuan adalah suatu zat (fasa) padat dari unsur kimia atau persenyawaan kimia yang dibentuk oleh proses anorganik dan mempunyai susunan kimiawi tertentu dengan suatu penempatan atom-atom secara beraturan di dalamnya maka setiap mineral mempunyai sifat fisik dan kimiawi tersendiri. Berdasarkan sifat-sifat fisik tersebut, setiap mineral

dapat dikenal. Sifat-sifat tersebut adalah sistem kristal, bentuk belahan, kekerasan, berat jenis, kilap dan warna.

Jenis batuan sudah sangat banyak dikenal, batuan tersebut disusun oleh mineral-mineral dari mineral utama, mineral pengiring, sampai mineral sekunder. Mineral-mineral tersebut dapat digolongkan pada dua golongan besar, yaitu:

- a. Golongan mineral utama hitam (*mofik*), misalnya piroksin, dan olivin
- b. Golongan mineral putih (*felsik*), misalnya kuarsa, *feldspar* dan *fledspatoid*

Dalam proses pendinginan magma, dimana tidak berlangsung membeku semua, mengalami penurunan suhu secara perlahan atau cepat. Penurunan temperatur ini akan diikuti oleh pembentukan mineral-mineral yang sesuai dengan temperatur pembentukannya. Pembentukan mineral berdasarkan penurunan temperatur telah tersusun seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Pembentukan batuan beku berdasarkan penurunan suhu (Swastika, dkk, 2014)

Sebelah kiri Gambar 1 mewakili mineral-mineral hitam, yang mulai terbentuk pada temperatur tinggi adalah olivin. Pada saat temperatur terus menurun, mineral juga terus terbentuk sesuai dengan temperaturnya. Mineral terakhir yang terbentuk adalah biotit, yang dibentuk pada temperatur sangat rendah. Beberapa mineral hitam yang banyak dijumpai adalah olivin, augit (piroksin), hornblende (amfibol) dan biotit (Haldoko, dkk., 2014).

Mineral yang pertama kali terbentuk merupakan mineral yang sangat tidak stabil dan mudah sekali berubah menjadi mineral yang dibawahnya. Mineral yang terbentuk pada temperatur yang paling rendah adalah mineral yang paling stabil. Sebelah kanan tabel diwakili oleh mineral kelompok plagioklas, karena mineral ini paling banyak dijumpai dan tersebar luas. Anortid adalah mineral yang pertama kali terbentuk pada temperatur tinggi dan banyak terdapat pada batuan beku seperti gabro dan basal. Andesin terbentuk pada temperatur menengah dan terdapat pada batuan beku diorit dan andesin, sedangkan mineral yang terbentuk pada temperatur rendah adalah albit, mineral yang banyak tersebar pada batuan asam seperti granit dan riolit. Beberapa mineral putih yang banyak dijumpai adalah plagioklas (anortid, bitownit, labradorit, andesin, oligoklas, muskovit, kuarsa, leusit) (Haldoko, dkk., 2014).

Mineral-mineral sebelah kanan dan kiri bertemu pada mineral potasium feldspar menuju ke muskovit dan berakhir kuarsa. Kuarsa merupakan mineral yang paling stabil diantara seluruh mineral, baik mineral felsik maupun mineral mafik. Gambar 1 juga memperlihatkan penurunan temperatur dari atas ke bawah serta kestabilan bertambah dari atas kebawah, sehingga mineral yang pertama kali

terbentuk mudah sekali mengalami pelapukan. Semakin ke bawah mineral akan semakin tahan terhadap pelapukan, mineral kuarsa adalah mineral yang paling tahan terhadap pelapukan (Haldoko, dkk., 2014).

Mineral-mineral utama pembentuk kerak bumi disebut mineral pembentuk batuan, terutama mineral golongan silikat. Golongan mineral berwarna tua disebut golongan mafit yang kaya magnesium dan besi, sedangkan yang muda disebut mineral felsik yang rendah akan kandungan magnesium dan besi.

3.5 Kerusakan dan Pelapukan Batu Candi Borobudur

1. Pengertian kerusakan dan pelapukan

Pengertian kerusakan atau *damage* digunakan untuk menggambarkan situasi dimana sebuah struktur kehilangan kekuatan atau sebuah kondisi menuju kehancuran atau keruntuhan. Adapun tanda-tanda kerusakan adalah retak, hancur, remuk, lepasnya elemen, serta perubahan bentuk yang permanen. Kerusakan berhubungan dengan proses mekanik, sedangkan pelapukan atau *decay* (*deterioration*) adalah perubahan material menuju pada pengurangan ketahanan, meningkatnya porositas dan kerapuhan, hilangnya material yang biasanya dimulai dari luar dan bekerja ke dalam, utamanya berhubungan dengan proses fisik, biologis dan kimia (Crocchi and Giorgi, 1998).

2. proses kerusakan dan pelapukan

Kerusakan dan pelapukan berdasarkan prosesnya dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok yaitu: kerusakan mekanis, pelapukan fisika, pelapukan kimia dan pelapukan biologi.

a) Proses kerusakan mekanis disebabkan oleh adanya gaya statis (gaya berat benda yang ada di atasnya) dan gaya dinamis (gaya yang bergerak) misalnya pengaruh gempa. Akibat yang ditimbulkan dalam bentuk retakan, pecahan dan renggang.

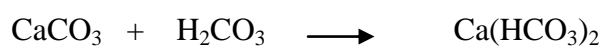
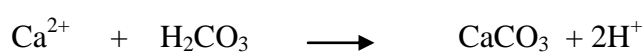
b) Proses pelapukan fisis yang disebabkan oleh adanya perbedaan suhu dan kelembaban antara siang dan malam. Bentuk gejala pelapukan secara fisika umumnya berupa keausan, pengelupasan, retakan-retakan mikro dan lain-lain.

c) Proses pelapukan kimia terutama disebabkan oleh adanya air, baik dalam bentuk air kapiler, air hujan, maupun air yang terpolusi. Gejala yang dapat diamati secara makroskopis adalah terjadinya sedimentasi kristal-kristal garam terlarut, oksidasi, korosi dan sebagainya.

d) Proses pelapukan biologis terutama disebabkan oleh pertumbuhan jasad. Selain secara estetika mengganggu, adanya sebagian jasad tertentu dari hasil sekresinya dapat melarutkan unsur-unsur bahan bangunan yang digunakan. Proses pelapukan biologi juga sekaligus dapat merusak secara mekanis akibat penyusupan akar-akar pohon jenis tanaman keras (Winarno,2001).

3. Pelapukan dan penggaraman

Penggaraman merupakan salah satu penyebab terjadinya pelapukan kimia, yang banyak terjadi pada relief Candi Borobudur. Proses penggaraman oleh adanya ion karbonat atau melalui proses karbonasi dapat dituliskan sebagai berikut:



Kalsium karbonat yang terbentuk $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ mudah larut apabila terjadi kenaikan suhu dan ion CO_3 akan terurai kemudian terbentuk endapan CaCO_3 kembali. Selain itu juga akan terbentuk sejumlah bikarbonat antara lain seperti $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (Vercoef, 1992).

Proses pelapukan oleh kristal garam, dapat terjadi melalui proses mekanis yaitu berkembangnya kristal-kristal garam pada pori-pori, kemudian terjadi tekanan sehingga batu menjadi hancur.

Kasus 1. Larutan yang melalui pori-pori kecil berpotensi mengendapkan kristal-kristal garam pada pori-pori yang besar. Apabila pori-pori kecil kering dan tidak membawa larutan lagi, pengendapan kristal garam pada pori-pori yang besar akan terhenti dan tidak terjadi tekanan.

Kasus 2. Pori-pori besar telah penuh terisi kristal-kristal garam, tetapi distribusi larutan melalui pori-pori kecil masih berlanjut, sehingga terjadi pertumbuhan kristal garam pada pori-pori besar dan penyumbatan pada pori-pori kecil, yang menyebabkan terjadinya pelapukan pada material batu. Tekanan ini juga dapat terjadi karena adanya kenaikan suhu yang menyebabkan proses pada kristal garam.

Garam hidrat yang berukuran lebih besar, lebih mudah mengisi pori-pori yang besar. Kemampuan garam ini dalam merusak batu karena adanya tekanan akibat perubahan garam menjadi *anhydrous* ataupun pecah menjadi hidrat yang lebih kecil. Kondisi ini terjadi karena adanya pengaruh perubahan kondisi lingkungan (suhu yang lebih tinggi dan kelembaban relatif yang lebih rendah menyebabkan bentuk hidrat yang lebih kecil). Tekanan terjadi saat kristal hidrat

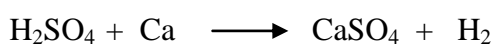
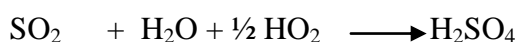
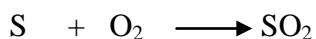
terperangkap pada pori-pori, kemudian berubah menjadi hidrat yang lebih kecil menyebabkan beberapa molekul air terbebas, volume keseluruhan menjadi lebih besar dari pada sebelumnya. Pada sisi lain, kristal garam *anhydrous* yang mengisi pori-pori besar berubah menjadi bentuk hidrat yang lebih produktif dengan menyerap air disekelilingnya, hal ini akan menyebabkan tekanan pada dinding pori bertambah besar.

Erosi alveoli adalah bentuk pelapukan pada material berpori dimana kristalisasi garam terjadi pada pori bagian dalam. Proses ini terjadi karena air tanah yang membawa unsur terlarut membasahi suatu material (yang kontak dengan tanah), mengakibatkan kelembaban material tersebut meningkat, kondisi ini dipicu pula oleh adanya air hujan. Pada permukaan material tertiuip angin dengan kecepatan tinggi sehingga permukaanya lebih kering dan penguapan terjadi sangat cepat pada bagian alveolus sebelum garam terlarut mencapai permukaan material. Kejadian ini mengakibatkan terbentuknya garam pada pori-pori bagian dalam material (*alveolus*).

Efflorescence adalah kristal garam yang terbentuk pada permukaan material berpori. Air yang membawa mineral terlarut sampai pada permukaan material, dimana penyerapan air besar dan kecepatan angin rendah. Sehingga proses penguapan lambat dan pada keadaan ini kristal garam yang terbentuk di luar pori-pori. Efek merusak dari kristalisasi garam ini lebih kecil dibandingkan oleh proses kristalisasi garam yang lain.

Pelapukan juga dapat terjadi antara lain karena sulfatasi, karbonasi dan lain-lain. Sulfatasi terjadi karena unsur belerang (S) yang teroksidasi menjadi

SO₂ yang kemudian bereaksi dengan H₂O menjadi asam sulfat (H₂SO₄). Dengan adanya asam sulfat tersebut maka unsur batuan seperti Fe²⁺, Ca²⁺ dan Mg²⁺ akan larut, sehingga kondisi batu menjadi rapuh. Proses pelarutan kalsium dapat ditunjukkan pada reaksi berikut:



Sumber S dan SO₂ dapat berasal dari asap gunung berapi, emisi kendaraan bermotor maupun industri (Verhoef, 1992).

3.6 Mortar dan aplikasinya pada bangunan bersejarah

Mortar adalah bahan yang merupakan hasil dari campuran antara agregat (seperti butir pasir), bahan pengikat atau binder (seperti kapur, semen, dan lainnya) dan air. Sifat dan karakteristik dari sangat tergantung pada jenis bahan pengikatnya. Seiring perkembangan waktu, bahan pengikat terus dikembangkan sampai selanjutnya berkembang pesat bahan semen buatan sebagai binder.

Mortar merupakan bahan komposit yang telah digunakan sejak ratusan tahun yang lalu sebagai salah satu komponen penunjang dalam bangunan. merupakan bahan komposit yang dibuat dari satu atau bahan pengikat, satu atau lebih jenis bahan agregat, air dan bahan tambahan dan diklasifikasikan menurut tipe dari bahan pengikat (Candeias, *et al.*, 2004). Bahan-bahan pengikat yang digunakan terus menerus mengalami perkembangan. Pembuatan didasarkan pada teknologi penggunaan kapur sejak jaman Romawi hingga pada akhirnya kini

diganti dengan bahan pengikat Portland Cement (PC). Klasifikasi berdasarkan fungsi dalam aplikasinya secara teknis (Palomo, 2006):

- a. Sebagai plester
- b. Sebagai tampilan depan (lantai, tembok, elemen arsitektural lainnya)
- c. Sebagai dekorasi (pelaph dan relief)
- d. Bangunan (*binding/perekat, pointing, scaling, repair*).

Klasifikasi yang kedua berdasarkan fungsi dari bahan pengikat alaminya (Palomo, 2006):

- a. Mortar yang berbahan dasar kapur

Binder yang digunakan pada jenis ini adalah kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang akan menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) jika terkarbonasi (senyawa ini yang bertanggung jawab pada proses pengerasan material). Secara umum kapur bangunan didefinisikan sebagai kalsium oksida dan kalsium hidroksida, magnesium oksida dan magnesium hidroksida, silika, alumina dan besi oksida. Sifat-sifat utama kapur antara lain: mempunyai kekuatan mekanis yang rendah, mudah diaplikasikan, elastis rendah (mudah terdeformasi), permeabilitas air yang tinggi dan tidak tahan pada perubahan temperatur. Sifat penting lainnya adalah tidak menghasilkan garam terlarut sehingga terhindar dari disolusi kristalisasi garam yang dapat menyebabkan *efflorescence* atau penggaraman.

b. Mortar yang berbahan dasar kapur dan bahan pozzolanik

Bahan pozzolanik adalah bahan alam yang diindustrialisasi sebagai bahan dasar bangunan. Komponen utama pozzolanik adalah kombinasi silika-aluminium yang bila bercampur dengan kapur dapat menghasilkan produk yang keras. Reaksi dapat terjadi pada temperature biasa dan menghasilkan kalsium silikat hidrat yang mempunyai kekuatan yang cukup sebagai bahan bangunan.

c. Mortar yang berbahan dasar kapur dan semen Portland

Bahan pengikat semen Portland merupakan bahan artifisial yang diserbuk dengan halus dan dapat mengalami pengerasan setelah ditambah air. Bahan baku utama pada pembuatan semen Portland terdiri dari mineral oksida kapur, silika, alumina dan besi. Komponen-komponen tersebut berinteraksi satu sama lain dalam tanur (kiln) menghasilkan konstituen utama pembentuk semen. Konstituen tersebut adalah trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A), dan tetrakalsium aluminoforit (C_4AF). Interaksi konstituen tersebut dengan air menghasilkan produk hidrasi yang berkontribusi pada pengerasan semen. Semen Portland umumnya ditambah dengan sedikit gypsum untuk memberikan perkerasan awal pada saat digunakan, karena perkerasan semen sendiri membutuhkan waktu tersendiri.

d. Mortar yang berbahan dasar lainnya

Bahan dasar lainnya yang sering digunakan antara lain gipsium, tanah liat dan bahan pengikat organik. Bahan gipsium mempunyai kekerasan yang kurang dan tidak sesuai untuk bangunan di tempat terbuka yang berinteraksi dengan air. Bahan tanah liat juga kurang keras dan tidak cocok dengan perubahan

kelembaban, karena mengalami kembang susut. Bahan pengikat organik berbagai macam jenisnya, mulai bahan organik tradisional hingga bahan organik modern seperti polimer.

e. Mortar yang berbahan dasar senyawa lainnya

Dengan bahan pengikat lebih dari satu saat ini lebih banyak digunakan. Bahan bangunan yang digunakan sehari-hari saat ini pada dasarnya juga merupakan dengan bahan dasar lebih dari satu. Kombinasi yang paling umum adalah penggunaan kapur dan semen. Beton modern juga merupakan kombinasi, karena menggunakan pengikat semen sebagai bahan utama dan ditambah dengan bahan pemercepat perkerasan dalam bentuk polimer organik.

3.7 Sol-gel

Sol gel merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam preparasi material oksida logam berukuran nano. Sol merupakan suatu partikel yang terdispersi dalam suatu fasa cair membentuk koloid sedangkan gel merupakan padatan yang tersusun dari fasa cair dan padat dimana kedua fasa ini saling terdispersi dan memiliki struktur jaringan internal. Proses sol-gel sendiri didefinisikan sebagai proses pembentukan senyawa anorganik melalui reaksi kimia dalam larutan pada suhu rendah. Dalam proses tersebut terjadi perubahan fasa dari suspensi koloid (sol) membentuk fasa cair kontinyu (gel). Metode sol-gel memiliki beberapa keuntungan antara lain:

1. Tingkat stabilitas thermal yang baik
2. Luas permukaan BET (Brunaur, emmet dan teller) yang tinggi
3. Stabilitas mekanik yang tinggi

4. Daya tahan pelarut yang baik
5. Modifikasi permukaan dapat dilakukan dengan berbagai kemungkinan.

Proses sol-gel telah banyak diaplikasikan secara luas. Sebagian besar produk sol-gel adalah bahan keramik dan gelas dalam berbagai bentuk seperti bubuk ultrafine atau spherical, lapisan film tipis, serat keramik, membrane inorganic mikropori, gelas dan keramik monolitik, dan bahan aerogel berpori. Prekursor yang digunakan pada umumnya adalah logam inorganic yang dikelilingi oleh ligan yang reaktif seperti logam alkoksida ($M(OR)_2$), dimana R menunjukkan grup alkil. Proses sol gel terbagi kedalam 4 tahapan, yaitu hidrolisis, kondensasi, pematangan atau aging dan kalsinasi.

a. Hidrolisis

Pada tahap pertama logam prekursor dilarutkan dalam alkohol dan terhidrolisis dengan penambahan air pada kondisi asam, netral atau basa menghasilkan sol koloid. Faktor yang berpengaruh terhadap proses hidrolisis adalah rasio air/prekursor dan jenis katalis hidrolisis yang digunakan. Peningkatan rasio pelarut/prekursor akan meningkatkan reaksi hidrolisis. Reaksi berlangsung cepat sehingga waktu gelasi lebih cepat. Katalis yang digunakan pada proses hidrolisis adalah jenis katalis asam atau katalis basa, namun proses hidrolisis adalah jenis katalis asam atau alkali basa namun proses hidrolisis juga dapat berlangsung tanpa menggunakan katalis. Dengan adanya katalis maka proses hidrolisis akan berlangsung lebih cepat dan konversi menjadi lebih tinggi.

b. Kondensasi

Pada tahapan ini terjadi proses transisi dari sol menjadi gel. Reaksi kondensasi melibatkan ligan hidroksil untuk menghasilkan polimer dengan ikatan kondensasi melibatkan ligan hidroksil untuk menghasilkan polimer dengan ikatan M-O-M.

c. Pematangan atau aging

Setelah reaksi hidrolisis dan kondensasi, dilanjutkan dengan proses pematangan gel yang terbentuk. Proses ini lebih dikenal dengan nama proses aging. Pada proses pematangan ini terjadi reaksi pembentukan jaringan gel yang lebih kaku, kuat dan menyusut didalam larutan.

d. Kalsinasi (pengeringan)

Tahap terakhir ialah proses penguapan larutan dan cairan yang tidak diinginkan untuk mendapatkan struktur sol-gel yang memiliki luas permukaan yang tinggi. Kalsinasi berguna untuk melepaskan template yang digunakan saat proses sol gel.

3.8 Litium Silikat

Litium ortosilikat memiliki rumus molekul Li_4SiO_4 dengan titik leleh 1255°C , titik didih 1256°C dan densitas 2.39 g/cm^3 . Litium ortosilikat (Li_4SiO_4) merupakan larutan padat yang dikenal sebagai konduktor Li-ion. Li_4SiO_4 telah dipilih sebagai salah satu senyawa yang paling menjanjikan untuk bahan pemuliaan padatan tritium dalam reaktor fusi karena litium memiliki massa kepadatan atom yang tinggi dan menguntungkan perilaku rilis tritium. Untuk

bahan pemuliaan, perilaku migrasi tritium merupakan item penting, yang secara signifikan berhubungan dengan konduktivitas (Wikipedia, 2016).

Litium silikat dispersi berair dari silikat. Tidak mengandung kelompok hidrofobik dan reaksi berlangsung sepenuhnya dalam lingkungan hidrofilik, memberikan litium silikat potensi besar sebagai konsolidan untuk permukaan basah. Litium silikat sesuai dengan kemampuan konsolidatif etil silikat sementara *miscibility* air dan dilusi rasio yang membuatnya lebih aman untuk digunakan, lebih mudah diangkut, dan lebih murah. Menurut Thorn (2012) kelebihan litium silikat ialah:

1. Menyediakan kuat nat lebih kohesif
2. Mencapai kekuatan konsolidatif mirip dengan 100% etil silikat pada 20%

Litium Silikat

3. Tidak dipengaruhi oleh batu yang sangat jenuh air
4. Menjadi pilihan biaya yang efektif yang dapat dikirim lebih leluasa karena sifat kurang peledak dan beracun.

3.9. Fume Silica (Aerosil)

Aerosil merupakan material limbah industri yang dihasilkan dari proses peleburan *silicon* dan *ferosilicon* yang juga dikenal dengan nama *microsilica*. *Silica fume* memiliki ukuran partikel yang sangat halus dengan ukuran partikel rata-rata $\approx 100\text{nm}$, ukuran tersebut 100 kali lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran partikel dari semen. Kandungan utama Aerosil adalah SiO_2 dalam bentuk *amorphous* sebesar 95% dan sebagian unsur lain dalam jumlah kecil seperti Fe, Al, Ca, Mg, K, Na dan S (Siddique, 2011).

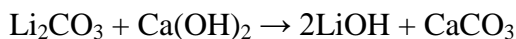
Aerosil memiliki warna putih dan abu-abu dan memiliki 3 jenis bentuk produkyakni *undesified silica fume (as produced)*, *slurry* dan *densified silica fume*. Namun yang paling banyak digunakan adalah *undesified silica fume* dan *densified silica fume*, kedua jenis ini yang membedakan adalah *bulk density* (kepadatan) dimana *densified silica fume* merupakan modifikasi dari *undesified* dengan meningkatkankepadatan sehingga *densified silica fume* memiliki kepadatan yang lebih tinggidibandingkan *undesified silica fume* (Thokchom, *et al.*, 2011).

Pada umumnya Penambahan Aerosil dilakukan dalam pembuatan beton pada semen memiliki 3 fungsi: 1) menghaluskan ukuran pori dan meningkatkan kepadatan pada matriknya; 2) bereaksi dengan *lime* (CaO) bebas; 3) menghaluskan ikatan antar muka pasta semen dengan gregat sehingga dari penambahan Aerosil ini tentunya akan meningkatkan kekuatan pada beton (Siddique, 2011). Namun pemakaian Aerosil dalam geopolimer telah dilaporkan Thokchom, *et al.*(2011) dimana penambahan Aerosil menurunkan kekuatan pada pasta geopolimer.

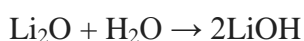
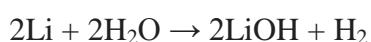
3.10. Litium Hidroksida

Litium hidroksida merupakan senyawa anorganik dengan rumus LiOH. Litium hidroksida adalah bahan kristal higroskopis putih, larut dalam air dan sedikit larut dalam etanol, tersedia secara komersial dalam bentuk anhidrat dan sebagai monohidrat (LiOH.H₂O), keduanya merupakan basa kuat. Litium hidroksida adalah basa yang paling lemah di antara logam alkali hidroksida (Wikipedia, 2016).

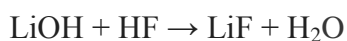
Litium hidroksida yang dihasilkan dalam reaksi metatesis antara litium karbonat dan kalsium hidroksida:



Hidrat awalnya diproduksi dehidrasi dengan pemanasan di bawah vakum sampai 180°C. Di laboratorium, litium hidroksida timbul oleh aksi air di litium atau litium oksida. Persamaan untuk proses ini mengikuti:



Meskipun litium karbonat lebih banyak digunakan, hidroksida merupakan prekursor efektif untuk garam litium, misalnya:

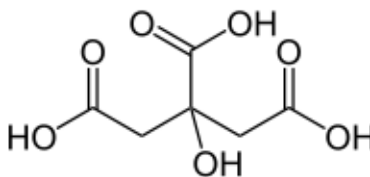


3.11. Asam Sitrat

Asam sitrat merupakan asam organik lemah yang ditemukan pada daun dan buah tanaman genus Citrus (jeruk-jerukan). Senyawa ini merupakan bahan pengawet yang baik dan alami, selain digunakan sebagai penambah rasa asam pada makanan dan minuman ringan, dalam biokimia asam sitrat dikenal sebagai senyawa antara yang terjadi dalam mitokondria yang penting dalam makhluk hidup. Zat ini juga dapat digunakan sebagai zat pembersih yang ramah lingkungan dan sebagai antioksidan. Asam sitrat terdapat pada berbagai jenis buah dan sayuran, namun ditemukan pada konsentrasi tinggi, yang dapat mencapai 8% bobot kering, pada jeruk lemon dan limau (misalnya jeruk nipis dan jeruk purut). Rumus kimia asam sitrat adalah $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (Wikipedia, 2016).

Keasaman asam sitrat didapatkan dari tiga gugus karboksil COOH yang dapat melepas proton dalam larutan. Jika hal ini terjadi, ion yang dihasilkan adalah ion sitrat. Sitrat sangat baik digunakan dalam larutan penyangga untuk mengendalikan pH larutan. Ion sitrat dapat bereaksi dengan banyak ion logam membentuk garam sitrat. Selain itu, sitrat dapat mengikat ion-ion logam dalam pengkelatan, sehingga digunakan sebagai pengawet dan penghilang kesadahan air.

Pada temperatur kamar, asam sitrat berbentuk serbuk kristal berwarna putih. Serbuk kristal tersebut dapat berupa bentuk *anhydrous* (bebas air), atau bentuk monohidrat yang mengandung satu molekul air untuk setiap molekul asam sitrat. Bentuk *anhydrous* asam sitrat mengkristal dalam air panas, sedangkan bentuk monohidrat didapatkan dari kristalisasi asam sitrat dalam air dingin. Bentuk monohidrat tersebut dapat diubah menjadi bentuk *anhydrous* dengan pemanasan di atas 74°C. Secara kimia, asam sitrat bersifat seperti asam karboksilat lainnya. Jika dipanaskan di atas 175°C, asam sitrat terurai dengan melepaskan karbon dioksida dan air (Wikipedia, 2016).



Gambar 2. Struktur Asam sitrat

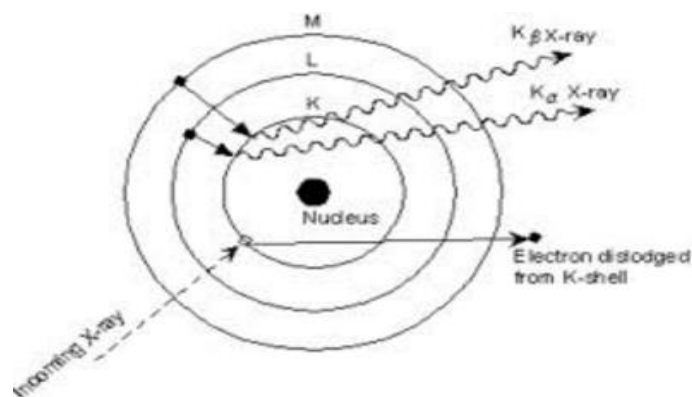
3.12 X-Ray Fluorescence

XRF merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis komposisi kimia beserta konsentrasi unsur-unsur yang terkandung dalam suatu sampel dengan

menggunakan metode spektrometri. XRF umumnya digunakan untuk menganalisa unsur dalam mineral atau batuan. XRF digunakan untuk analisa kualitatif dari unsur-unsur mayor dan minor dengan nomor atom lebih besar dari natrium dalam suatu sampel.

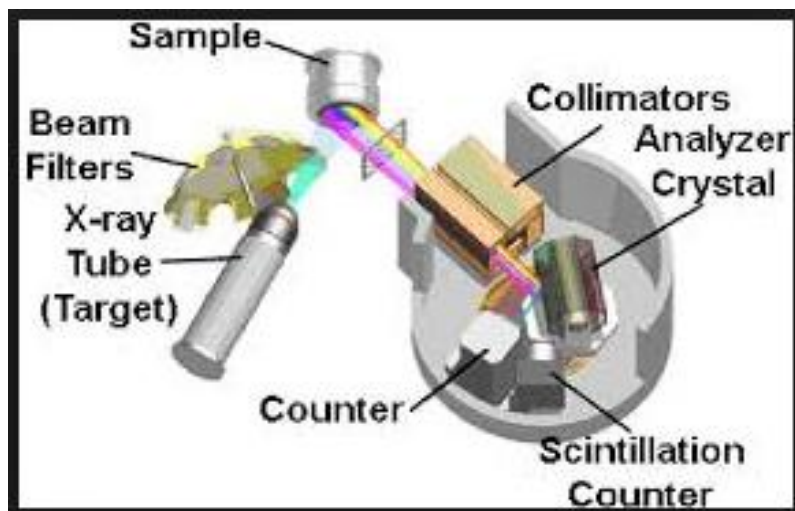
Spektrometri pendar sinar-X adalah cara analisis terhadap cuplikan berdasarkan pengukuran tenaga dan intensitas sinar-X suatu unsur di dalam cuplikan hasil eksitasi sumber radioisotop. Tenaga sinar-X cuplikan yang terukur dipakai sebagai dasar analisis kuantitatif (Dixit and Deshpande, 1985 & Eugene, 1978).

X-Ray Fluorescence Spectrometry merupakan teknik analisa non-destruktif yang digunakan untuk identifikasi serta penentuan kosentrasi elemen yang ada pada padatan, bubuk ataupun sampel cair. XRF mampu mengukur elemen dari Berilium (Be) hingga Uranium pada level *trace element*, bahkan dibawah level ppm. Secara umum, XRF spectrometer mengukur panjang gelombang komponen material secara individu dari emisi fluorescence yang dihasilkan sampel saat diradiasi dengan sinar-X (Anonim, 2009). Peristiwa yang terjadi pada tabung sinar-X dijelaskan pada Gambar 3 (Nelson, 2008).



Gambar 3. Peristiwa pada Tabung sinar X

Apabila terjadi eksitasi sinar-X primer yang berasal dari tabung X-ray atau sumber radioaktif mengenai sampel, sinar-X dapat diabsorpsi atau dihamburkan oleh material. Pada dasarnya prinsip kerja dari spektrometer pendar sinar-X adalah sinar x primer yang berasal dari sumber pengeksitasi ditembakkan terhadap cuplikan. Pancaran radiasi sinar x tersebut akan berinteraksi dengan cuplikan dalam proses efek fotolistrik. Proses interaksi tersebut akan menghasilkan pendaran sinar x sekunder dari cuplikan, yang ditangkap oleh detektor kemudian dianalisis. Bila energi sinar tersebut lebih tinggi dari energi ikatan elektron dalam kulit K, L atau M dari atom target maka akan menyebabkan elektron tersebut keluar dari orbitnya sehingga terjadi kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini kemudian diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar dengan diikuti adanya pelepasan energi yang berupa sinar-X. Sinar-X ini mempunyai spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu sesuai dengan perpindahan elektron yang terjadi dalam atom yang bersangkutan (Eugene, 1978). Proses dimana sinar-X diabsorpsi oleh atom dengan mentransfer energinya pada elektron yang terdapat pada kulit yang lebih dalam disebut efek fotolistrik. Emisi sinar-X dihasilkan dari proses yang disebut X Ray Fluoresence (XRF) (Viklund, 2008). Bagan alat XRF (sinar-X Fluresence) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan alat XRF (Shackley, 2009)

Keterangan :

1. Sampel

Sampel yang akan dianalisis ditempatkan dalam wadah yang disebut tabung sampel.

2. Tabung sinar-X

Sebuah tabung sinar-X adalah tabung vakum yang menghasilkan sinar-X. tabung ini digunakan dalam mesin sinar-X. sinar-X bagian dari spectrum elektromagnetik, sebuah radiasi pengionan dengan panjang gelombang lebih pendek dari sinar ultraviolet. Seperti halnya tabung vakum, ada katoda, yang memancarkan elektron kevakum dan anoda untuk mengumpulkan elektron, sehingga membentuk aliran arus listrik, yang dikenal sebagai balok, melalui tabung. Sebuah sumber listrik tegangan tinggi yang terhubung dikatoda dan anoda untuk mempercepat elektron.

3. Penyaringan radiasi

Komponen ini digunakan untuk menyaring sinar yang dipancarkan oleh tabung sinar-X agar tidak mengenai kulit.

4. Detektor

Detektor dalam alat XRF (Sinar-X fluorescence) digunakan untuk mengukur intensitas cahaya yang dipantulkan. Detektor akan merekam dan memproses isyarat penyinaran ini dan mengkonversi isyarat itu menjadi suatu arus yang akan dikeluarkan pada printer atau layar computer.

5. Spektrometer Elektronik

Sinar-X dihasilkan di suatu tabung sinar katoda dengan pemanasan kawat pijar untuk menghasilkan elektron-elektron, kemudian elektron-elektron tersebut dipercepat terhadap suatu target dengan elektron. Ketika elektron-elektron mempunyai energi yang cukup untuk mengeluarkan elektron-elektron dalam target, karakteristik spektrum sinar-X dihasilkan.

6. Komputer

Merupakan alat penunjuk sistem pencatat hasil berupa angka yang dibaca oleh rekorder dan pengontrol selama dilakukannya analisis.

Kelebihan XRF adalah dapat menentukan kandungan mineral dalam bahan biologis maupun dalam tubuh secara langsung, akurasi yang tinggi, dan dapat menentukan unsur dalam material tanpa adanya standar. Kelemahan dari metode XRF adalah tidak dapat mengetahui senyawa apa yang dibentuk oleh unsur-unsur yang terkandung dalam mineral yang akan kita teliti dan tidak dapat menentukan struktur dari atom yang membentuk material itu (Setiabudi, 2010).

3.13. X-Ray Diffraction

Komponen utama XRD yaitu terdiri dari tabung katoda (tempat terbentuknya sinar-X), sampel holder dan detektor. Instrumen XRD memberikan data-data difraksi dan kuantitatif intensitas difraksi pada sudut-sudut dari suatu bahan. Data yang diperoleh dari XRD berupa intensitas difraksi sinar-X yang terdifraksi dan sudut-sudut 2θ . Tiap pola yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu (Widyawati, 2012).

Suatu kristal yang dikenai oleh sinar-X tersebut berupa material (sampel), sehingga intensitas sinar yang ditransmisikan akan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Berkas sinar-X yang dihamburkan ada yang saling menghilangkan (interferensi destruktif) dan ada juga yang saling menguatkan (interferensi konstruktif). Interferensi (Grant, 1998).

Suatu material jika dikenai sinar-X maka intensitas sinar yang ditransmisikan akan lebih rendah dari intensitas sinar datang., hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar-X yang dihamburkan ada yang saling menghilangkan karena fasenya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasenya yang sama. Berkas sinar-X yang menguatkan (interferensi konstruktif) dari gelombang yang terhambur merupakan peristiwa difraksi (Taqiyah, 2012).

3.14. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Pemeriksaan dengan SEM pada dasarnya merupakan pemeriksaan dan analisis data permukaan. Tampilan yang diperoleh adalah data dari permukaan

yang tebalnya sekitar 20- μ m dari permukaan (Siswosuwarno, 1996). Gambar permukaan yang diperoleh merupakan gambar topografi dan penangkapan elektron sekunder yang dipancarkan oleh spesimen. Instrumen SEM terdiri dari sebuah senapan elektron yang memproduksi berkas elektron pada tegangan dipercepat sebesar 2-30 kV. Berkas elektron tersebut dilewatkan pada beberapa lensa elektromagnetik untuk menghasilkan image berukuran $< \sim 10$ nm pada sampel yang ditampilkan dalam bentuk film fotografi atau ke dalam tabung layar (Trewin, 1988).

Pada prinsipnya cara kerja SEM dimulai dari berkas elektron berinteraksi dengan sampel yang akan menghasilkan *Secondary Electron* (SE) yang didalam detektor SE tersebut diubah menjadi sinyal listrik selanjutnya akan menghasilkan gambar pada monitor. Sinyal yang keluar dari detektor ini berpengaruh terhadap intensitas cahaya didalam tabung monitor, karena jumlah cahaya yang dipancarkan oleh monitor sebanding dengan jumlah elektron yang berinteraksi dengan sampel. Apabila jumlah elektron yang dipancarkan semakin banyak maka gambar yang dihasilkan semakin terang dan demikian sebaliknya.

3.15. Uji Kekerasan

Kekerasan adalah sifat resistensi dari suatu mineral terhadap kemudahan mengalami abrasi (*abrasive*) atau mudah tergores (*scratching*). Kekerasan suatu mineral bersifat relatif, artinya apabila dua mineral saling digoreskan satu dengan lainnya, maka mineral yang tergores adalah mineral yang relatif lebih lunak dibandingkan dengan mineral lawannya. Skala kekerasan

mineral mulai dari yang terluak (skala 1) hingga yang terkeras (skala 10) diajukan oleh Mohs dan dikenal sebagai Skala Kekerasan Mohs.

3.16. *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*

Prinsip kerja spektrofotometer infra merah adalah sama dengan spektrofotometer yang lainnya yakni interaksi energi dengan suatu materi. Spektroskopi inframerah berfokus pada radiasi elektromagnetik pada rentang frekuensi 400-4000 cm^{-1} , di mana cm^{-1} yang dikenal sebagai wavenumber (*1/wavelength*), yang merupakan ukuran unit untuk frekuensi. Untuk menghasilkan spektrum inframerah, radiasi yang mengandung semua frekuensi di wilayah IR dilewatkan melalui sampel. Mereka frekuensi yang diserap muncul sebagai penurunan sinyal yang terdeteksi. Informasi ini ditampilkan sebagai spektrum radiasi dari% ditransmisikan menjadi *wavenumber*.

Spektroskopi inframerah sangat berguna untuk analisis kualitatif (identifikasi) dari senyawa organik karena spektrum yang unik yang dihasilkan oleh setiap organik zat dengan puncak struktural yang sesuai dengan fitur yang berbeda. Selain itu, masing-masing kelompok fungsional menyerap sinar inframerah pada frekuensi yang unik. Sebagai contoh, sebuah gugus karbonil, C=O, selalu menyerap sinar inframerah pada 1670-1780 cm^{-1} , yang menyebabkan ikatan karbonil untuk meregangkan (Silverstein, 2002).

Atom-atom di dalam suatu molekul tidak diam melainkan bervibrasi (bergetar). Ikatan kimia yang menghubungkan dua atom dapat dimisalkan sebagai dua bola yang dihubungkan oleh suatu pegas. Bila radiasi inframerah dilewatkan melalui suatu cuplikan maka molekul-molekulnya dapat

menyerap (mengabsorpsi) energi dan terjadilah transisi di antara tingkat vibrasi dasar dan tingkat tereksitasi. Contoh suatu ikatan C-H yang bervibrasi 90 triliun kali dalam satu detik harus menyerap radiasi inframerah pada frekuensi tersebut untuk pindah ke tingkat vibrasi tereksitasi pertama. Pengabsorpsian energi pada frekuensi dapat dideteksi oleh spektrofotometer infra merah yang memplot jumlah radiasi infra merah yang akan memberikan informasi tentang gugus fungsional suatu molekul (Blanchard, *et al.*, 1986).

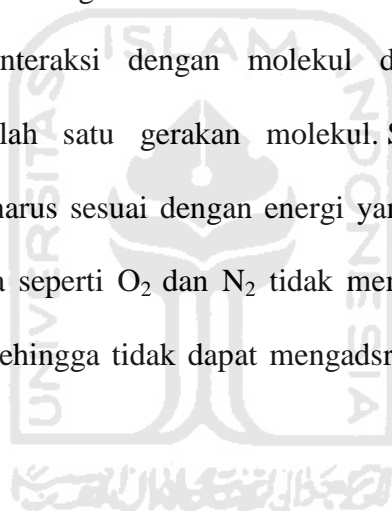
Inframerah merupakan radiasi elektromagnetik dari suatu panjang gelombang yang lebih panjang dari gelombang tampak tetapi lebih pendek dari gelombang mikro. Spektroskopi inframerah merupakan salah satu teknik spektroskopi yang didasarkan pada penyerapan inframerah oleh senyawa. Karena spectrum IR memiliki panjang gelombang yang lebih panjang dari panjang gelombang yang lain maka energi yang dihasilkan oleh spektrum ini lebih kecil dan hanya mampu menyebabkan vibrasi atom-atom pada senyawa yang menyerapnya. Daerah radisai sinar inframerah terbagi menjadi 3 antara lain:

1. Daerah IR dekat ($13000\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$)
2. Daerah IR tengah ($4000\text{-}200\text{ cm}^{-1}$)
3. Daerah IR jauh ($200\text{-}10\text{ cm}^{-1}$)

Kebanyakan analisis kimia berada pada daerah IR tengah. IR jauh digunakan untuk menganalisis zat organik, anorganik dan organologam yang memiliki atom berat (massa atom di atas 19). Sedangkan IR dekat menganalisis kuantitatif dengan kecepatan tinggi. Karena panjang gelombang IR lebih pendek dari panjang gelombang sinar tampak ataupun sinar UV maka energi IR tidak

mampu mentransisikan elektron, melainkan hanya menyebabkan molekul hanya bergetar.

Setiap molekul memiliki harga energi tertentu. Bila suatu senyawa menyerap energi dari sinar IR maka tingkatan energi didalam molekul itu akan tereksitasi ketingkatan energi yang lebih tinggi. Sesuai dengan energi yang diserap maka yang akan terjadi pada molekul itu adalah perubahan energi vibrasi yang diikuti dengan perubahan energi rotasi. Interaksi ini terjadi dengan syarat adanya perubahan momen dipol sebagai akibat dari vibrasi. Radiasi medan listrik berubah-ubah akan berinteraksi dengan molekul dan akan menyebabkan perubahan amplitudo salah satu gerakan molekul. Selain itu energi yang dihasilkan oleh sinar IR harus sesuai dengan energi yang dibutuhkan oleh atom untuk bervibrasi. Senyawa seperti O_2 dan N_2 tidak memiliki perubahan momen dipole dalam vibrasinya sehingga tidak dapat mengadsorpsi sinar IR (Earnshaw, 1997).

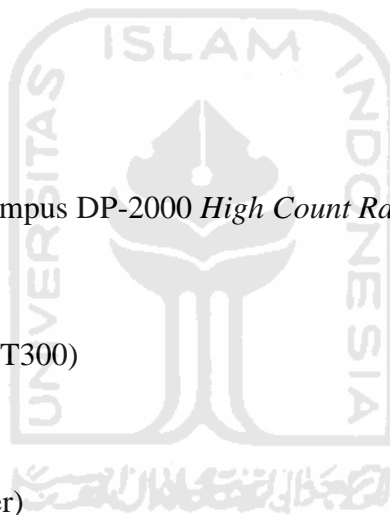


BAB IV

METODE PENELITIAN

1.1 Alat

- a. Gelas beker 50 mL, 100 mL, 500 mL (iwaki)
- b. Gelas ukur 50 mL, 100 mL (Pyrex)
- c. Batang pengaduk
- d. Pipet tetes
- e. Termometer
- f. Kaca arloji
- g. Oven (Memert)
- h. XRF Portabel (Olympus DP-2000 *High Count Rate*)
- i. XRD
- j. SEM (JEOL, JSM-T300)
- k. TGA (DTG 60)
- l. FTIR (Parkin Elmer)



1.2 Bahan

- a. SiO₂ (HK 125)
- b. LiOH (Merck)
- c. Asam sitrat (Merck)
- d. Akuades (Laboratorium Balai Konservasi Borobudur)

3.1 Cara Kerja

3.1.1 Persiapan sampel

Sampel disiapkan dengan cara memperkecil ukuran contoh uji berupa batuan andesit menjadi 4-5 cm, kemudian sampel dimasukkan kedalam mesin penghancur. Batuan andesit yang telah dihaluskan oleh mesin kemudian diayak dan komposisi mortar disesuaikan dengan komposisi Fuller Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran dan komposisi mortar

Ukuran (mm)	<0,063	0,063-0,125	0,125-0,25	0,25-0,5	1,5-1	1-2
Massa (g)	35,44	3,40	10,60	12,39	15,25	18,77

3.1.2 Sintesis litium lilikat

Litium silikat dibuat dengan metode sol-gel. Litium silikat disintesis dari $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, dilarutkan dengan 150 mL aquades. Larutan yang sudah homogenkemudian diatur pH hingga 8,5 dengan asam sitrat dan dijaga konsentrasi LiOH tetap 0,3 mol/L. SiO_2 dimasukkan dalam larutan dan dipanaskanhingga terbentuk gel transparan pada suhu 70°C . Gel transparan yang diperoleh dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 150°C dan dikalsinasi pada temperatur 675°C selama 4 jam. Litium silikat dibuat dalam beberapa perbandingan mol $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ dan SiO_2 yaitu 3,5:1, 4:1, 4,5:1 mol. Litium silikat kemudian dikarakterisasi dengan TGA, XRD dan FTIR (Wu, *et al.*, 2009).

3.1.2 Pembuatan mortar batu andesit

Sebanyak 10 gram serbuk batuan andesit yang telah dihancurkan dimasukkan kedalam gelas beker dan ditambahkan dengan 1,5 mL larutan litium silikat 10% b/v yang dihasilkan dari variasi rasio mol $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, dan SiO_2 yaitu;

3,5:1 mol, 4:1 mol, 4,5:1 mol. Campuran tersebut kemudian dimasukkan kedalam cetakan silinder dan balok kemudian dibiarkan mengeras selama 15 hari. Untuk membuat mortar dengan cetakan balok dibutuhkan 20 g serbuk batuan andesit dan 4 mL larutan litium silikat 10% b/v sedangkan cetakan silinder 11 g serbuk andesit dan 1,5 mL larutan litim silikat 10% b/v. Batuan yang sudah mengeras dilakukan kekerasan, kapilaritas, XRF dan SEM .



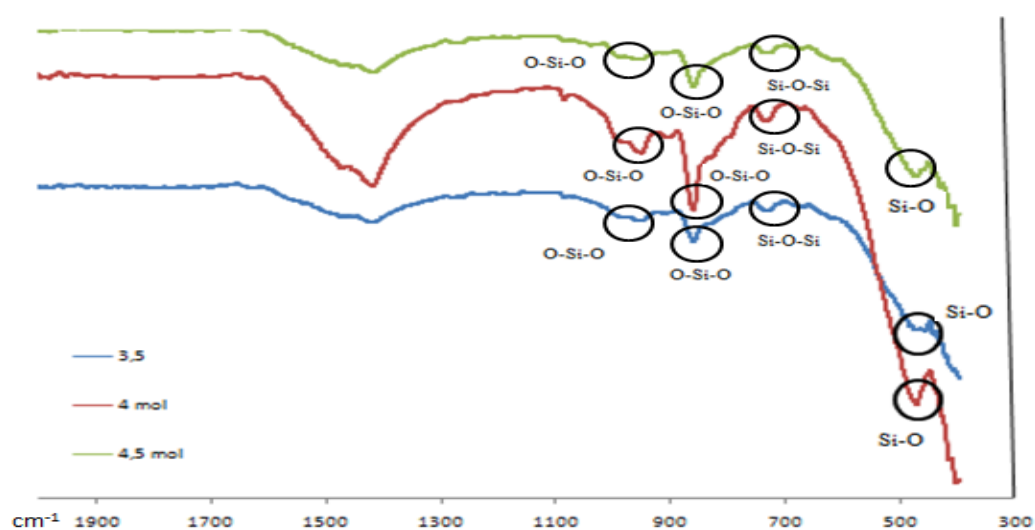
BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1 Hasil Karakterisasi sintesis litium silikat

Litium silikat disintesis dengan metode sol-gel menggunakan $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ dan *fume silica* ($\text{aerosil}/\text{SiO}_2$) sebagai prekursor serta asam sitrat sebagai agen khelat. Perbandingan rasio mol $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ dan SiO_2 pada sintesis litium silikat divariasikan pada 3,5:1 mol, 4:1 mol, 4,5:1 mol untuk melihat arah reaksi produk yang akan terbentuk. Hasil sintesis pada perbandingan 3,5:1 mol, 4:1 mol, 4,5:1 mol memberikan persen rendemen secara berturut-turut sebesar 79,65%, 71,3% dan 68,56%. Perbandingan 3,5:1 mol memiliki persen rendemen tertinggi.

Gel prekursor penyusun Li_4SiO_4 yang sudah dikeringkan pada temperatur 100°C dikarakterisasi dengan *Thermo Gravimetric Analyzer* (TGA). Serbuk yang sudah dikalsinasi pada temperatur 675°C dilakukan karakterisasi dengan XRD dan FTIR. Hasil karakterisasi dengan FTIR ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil analisis FTIR litium silikat yang disintesis pada masing-masing variasi mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 3,5:1 mol, 4:1 mol dan 4,5:1 mol

Hasil analisis FTIR litium silikat ditunjukkan pada Gambar 5 merupakan spektrum litium silikat perbandingan LiOH:SiO₂ 3,5:1 mol, 4:1 mol dan 4,5:1 mol, ketiga variasi tersebut memberikan spektrum yang tidak jauh berbedapada masing-masing bilangan gelombang. Tabel 3 menunjukkan bilangan gelombang yang muncul pada masing-masing variasi.

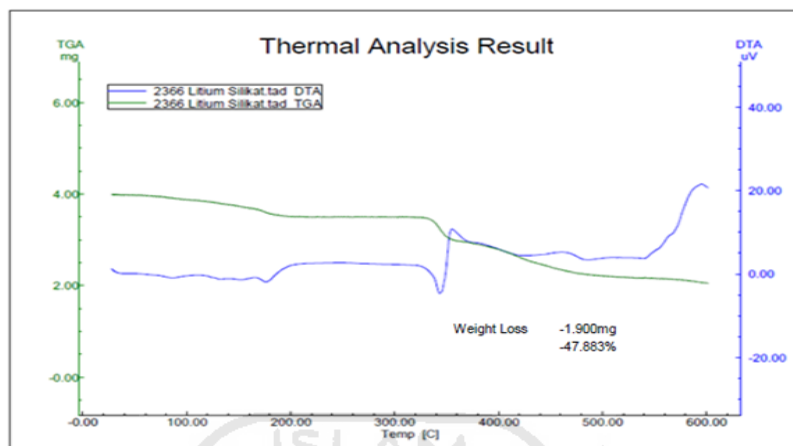
Tabel 3. Perbandingan spektrum litium silikat yang disintesis dengan variasi rasio mol LiOH:SiO₂ menggunakan FTIR

Bilangan gelombang (cm ⁻¹)				gugus fungsi
3,5:1 mol	4:1 mol	4,5:1 mol	Yang, <i>et al.</i> , (2012) dan Zhang, <i>et al.</i> , (2008)	
1422.12	1418.22	1416.32	1440	
956.61	952.38	955.87	945	O-Si-O
860.82	861.4	860.72	863	O-Si-O
736.85	736.78	737.8	736	Si-O-Si
-	-	-	523	Si-O-Li
469.57	473.45	475.17	470	Si-O
404.45	-	405.32	-	

Menurut Yang, *et al.*, (2012) dan Zhang, *et al.*, (2008) puncak pada bilangan gelombang sekitar 523 cm⁻¹ merupakan serapan dari Si-O-Li. Serapan gugus Si-O-Si muncul pada bilangan gelombang sekitar 1400 cm⁻¹ dan 700 cm⁻¹. O-Si-O memberikan serapan pada puncak serapan sekitar 945 cm⁻¹ dan 863 cm⁻¹. Spektrum dari analisis FTIR pada masing-masing variasi mol memberikan puncak yang sama satu dengan lainnya. Sehingga variasi rasio mol litium hidroksida dan *fume silica* (SiO₂) dalam sintesis litium silikat tidak mempengaruhi jenis produk yang dihasilkan.

Hasil sintesis pada masing-masing variasi mol menunjukkan jenis produk yang sama. Selanjutnya analisis TGA/DTA dan XRD hanya dilakukan pada

variasi 4:1 mol. Karakterisasi menggunakan TGA/DTA untuk mengetahui proses yang terjadi saat kalsinasi litium silikat yang ditunjukkan pada Gambar 6.

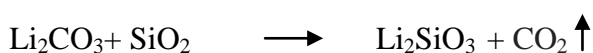


Gambar 6. Hasil termogram litium silikat yang disintesis dengan perbandingan 4:1 (LiOH:SiO₂) menggunakan alat TGA dan DTA

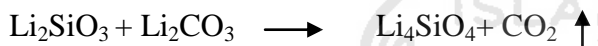
Gambar 6 menunjukkan pada termogram litium silikat yang di sintesis dengan perbandingan 4:1 mol (LiOH:SiO₂) terdapat puncak dengan reaksi eksotermis pada suhu 368°C. Menurut Wu, *et al.*, (2009) puncak eksotermis pada suhu 368°C merupakan dekomposisi dari sitrat logam menghasilkan Li₂CO₃. Wu (2009) juga mengatakan bahwa puncak difraksi Li₂CO₃ juga terdeteksi pada pola XRD dari gel prekursor yang dikalsinasi pada temperatur 368°C, reaksi yang terjadi sebagai berikut:



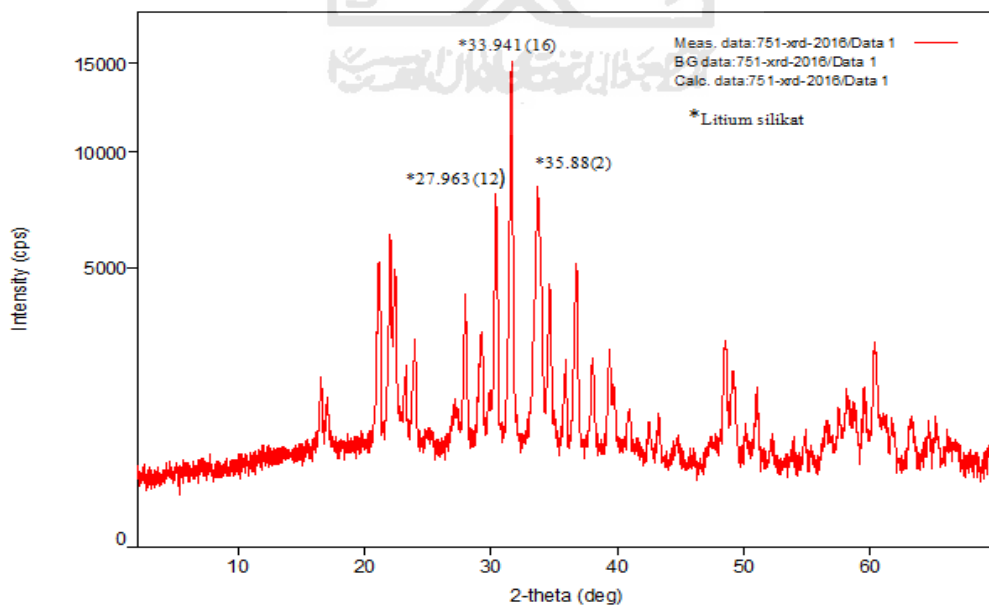
Pada suhu 500°C terdapat puncak dengan reaksi eksotermis. Dimana pada suhu 500°C telah terbentuk fase baru, yaitu Li₂SiO₃ (Wu, *et al.*, 2009). Oleh karena itu, puncak eksotermik signifikan pada 500°C di kurva TGA dapat dikaitkan dengan pembentukan Li₂SiO₃ Berikut ini reaksi kimia pada proses ini:



Menurut Wu, *et al.*, (2009) disekitar puncak pada 600°C terdapat puncak difraksi yang tajam dikaitkan dengan difraktogram gel yang dikalsinasi pada suhu 600°C telah terbentuk Li_4SiO_4 namun masih terdapat Li_2CO_3 dengan intensitas puncak menjadi sangat lemah, puncak luas pada suhu 650°C di kurva DTA dapat dijelaskan sebagai efek eksotermik pembentukan Li_4SiO_4 karena setelah suhu 650°C Li_2CO_3 mulai menghilang dan hanya puncak difraksi tajam Li_4SiO_4 . Selama proses analisis TGA/DTA ini massa yang hilang sebesar 47,883%. Adapun reaksi kimia yang terjadi ialah:



Hasil sintesis selanjutnya di karakterisasi dengan XRD untuk mengetahui jenis produk dan kesesuaiannya dengan hasil karakterisasi menggunakan TGA/DTA. Hasil karakterisasi menggunakan XRD ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Difraktogram Litium silikat dari perbandingan 4:1 ($\text{LiOH}:\text{SiO}_2$)

Gambar 7 merupakan difraktogram litium silikat yang disintesis dari perbandingan 4:1 mol ($\text{LiOH}:\text{SiO}_2$), dari difraktogram tersebut menunjukkan bahwa puncak 2θ yang intensitasnya tinggi berada di sekitar 33,941, 38,016 dan 23,263. Untuk memastikan jenis produk yang dihasilkan, puncak 2θ hasil penelitian kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian Subha, *et al.*, 2014, Wu, *et al.*, 2009, Chang, *et al.*, 2001 yang ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan puncak 2θ hasil penelitian sintesis litium silikat pada variasi rasio mol 4:1 dan referensi

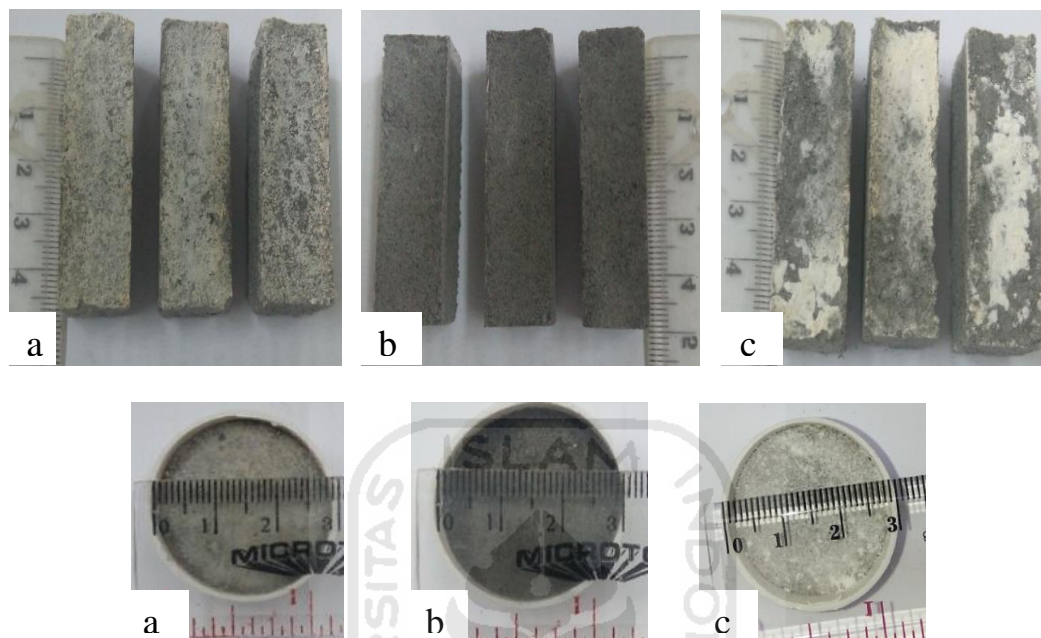
Puncak 2 tetha			
Subha, <i>et al.</i> , (2014)	Wu, <i>et al.</i> , (2009)	Chang, <i>et al.</i> , (2001)	Hasil penelitian
16	16	16	16
17	17	17	17,01
-	22	-	22,057
23	23	-	23,263
28	28	28	27,963
34	34	34	33,941
35	-	36	35,88
38	38	38	38,016
-	41	-	40,92
48	48	48	48,47
50	50	-	49,12
60	60	60	60,285

Tabel 4 menunjukkan bahwa puncak 2θ hasil penelitian sesuai dengan puncak 2θ menurut referensi. Kristal litium silikat memberikan puncak 2θ yang khas pada area sekitar 28, 33 dan 35, dari hasil tersebut maka litium ortosilikat berhasil disintesis dengan kalsinasi pada suhu 675°C .

1.2 Hasil konsolidasi batu andesit dengan litium silikat

Hasil sintesis litium silikat kemudian diujikan untuk konsolidasi batuan andesit melalui uji pembuatan mortar. Litium silikat sebagai konsolidan dibuat

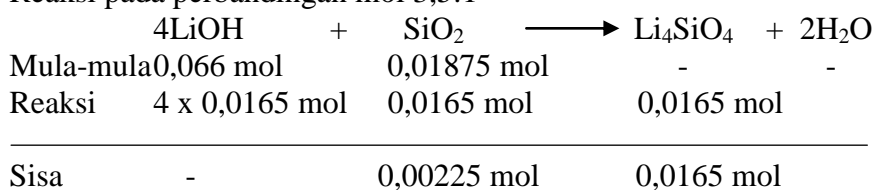
dengan konsentrasi 10% b/v. Pendiaman sampel mortar dilakukan selama 15 hari dan didapat hasil seperti Gambar 8.



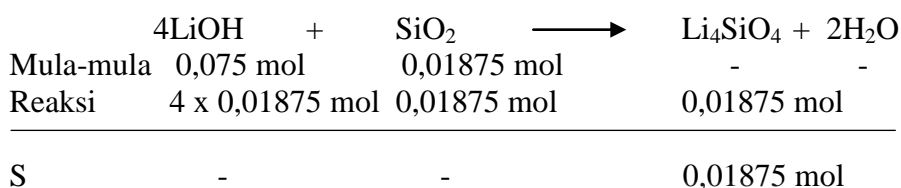
Gambar 8. Hasil mortar dengan litium silikat yang disintesis dengan variasi mol LiOH:SiO₂ (a) 3,5:1 mol, (b) 4:1 mol, (c) 4,5:1 mol, dengan bentuk balok dan silinder

Sampel mortar dibuat dalam dua bentuk, 1) bentuk balok digunakan untuk uji kapilarisasi dan 2) bentuk silinder digunakan untuk uji XRF, SEM dan kekerasan. Masing-masing variasi mol sintesis litium silikat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap hasil konsolidasi mortar. Gambar 8 (a) merupakan mortar yang dibuat menggunakan litium silikat hasil sintesis pada perbandingan 3,5:1 mol dan Gambar 8 (c) 4,5:1 mol menunjukkan adanya endapan dipermukaan mortar. Terbentuknya endapan disebabkan oleh sisa reaktan yang tidak bereaksi secara sempurna karena pada perbandingan 3,5:1 mol dan 4,5:1 mol reaksi pada saat sintesis tidak stoikiometri. Berikut reaksi yang terjadi pada masing-masing variasi:

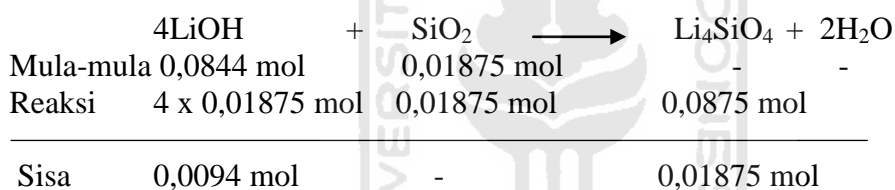
Reaksi pada perbandingan mol 3,5:1



Reaksi pada perbandingan mol 4:1



Reaksi pada perbandingan mol 4,5:1



Terbentuknya endapan dipermukaan mortar terjadi karena reaksi saat proses sintesis pada 3,5:1 mol dan 4,5:1 mol tidak stoikiometri (hubungan kuantitatif dari reaktan dan produk dalam reaksi kimia) sehingga pada variasi 3,5:1mol masih terdapat sisa SiO_2 0,00225 mol dan 4,5:1 mol terdapat sisa LiOH 0,01875 mol yang menyebabkan terbentuknya endapan di permukaan mortar. Variasi 4:1 mol menghasilkan produk litium silikat murni sehingga tidak ada sisa reaktan yang menyebabkan perubahan warna.

Tabel 5. Hasil kekerasan mortar andesit dengan konsolidan litium silikat yang disintesis dengan variasi mol LiOH:SiO₂ dianalisis dengan skala mohs

Variasi mol bahan konsolidan mortar andesit	Kekerasan (mohs)
3,5:1 mol	2-3
4:1 mol	3-4
4,5:1 mol	2-3

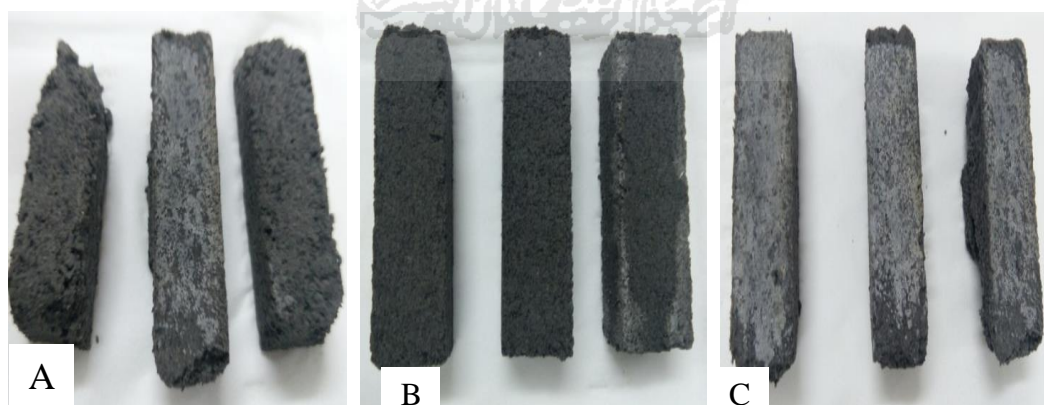
Variasi mol litium silikat mempengaruhi hasil kekerasan terhadap mortar yang dihasilkan. Litium silikat yang disintesis pada variasi 4:1 mol memberikan hasil kekerasan yang terbaik diantara lainnya yaitu 3-4 skala mohs, diikuti litium silikat 4,5:1 mol dan 3,5:1 mol 2-3 skala mohs. Menurut Haldoko, dkk., (2014) kekerasan mortar dipengaruhi oleh komposisi kimia batuan, terutama kandungan SiO₂. Semakin tinggi kandungan SiO₂ dalam mortar maka tingkat kekerasannya akan semakin tinggi. Kekerasan batu andesit sekitar 4-6 skala mohs, dimana nilai kekerasan 6 skala mohs didapat pada batuan yang teksturnya halus, sedangkan nilai kekerasan 4 skala mohs didapat dari andesit yang permukaannya kasar. Mortar dengan konsolidan litium silikat 3,5:1 mol dan 4,5:1 mol berada dibawah rentang kekerasan batu andesit, sedangkan mortar dengan konsolidan litium silikat 4:1 mol memiliki nilai kekerasan mendekati kekerasan batu andesit.

Tabel 6. Kandungan SiO₂ pada masing-masing variasi mol litium silikat berdasarkan analisis menggunakan XRF

Sampel	3,5:1 mol	4:1 mol	4,5:1 mol	Batu andesit
1	40,69	45,57	40,13	35,789
2	38,86	40,68	39,46	39,478
3	39,96	44,76	40,74	40,646
4	37,8	43,29	40,16	37,737
Rata-rata	39,3275	43,575	40,1225	38,4125

Analisis komposisi mortar hasil konsolidasi menggunakan XRF menunjukkan kandungan SiO_2 merupakan kandungan utama dalam sampel mortar. Kandungan SiO_2 pada perbandingan 4:1 mol lebih tinggi dibandingkan dengan sampel andesit dan mortar dengan variasi mol lainnya. Peningkatan SiO_2 setelah dikonsolidasi membuktikan bahwa litium silikat sebagai konsolidan berhasil menambah jumlah SiO_2 . Hal ini selaras dengan hasil uji kekerasan pada mortar bahwa semakin tinggi kandungan SiO_2 pada batu maka semakin tinggi pula nilai kekerasan batu tersebut.

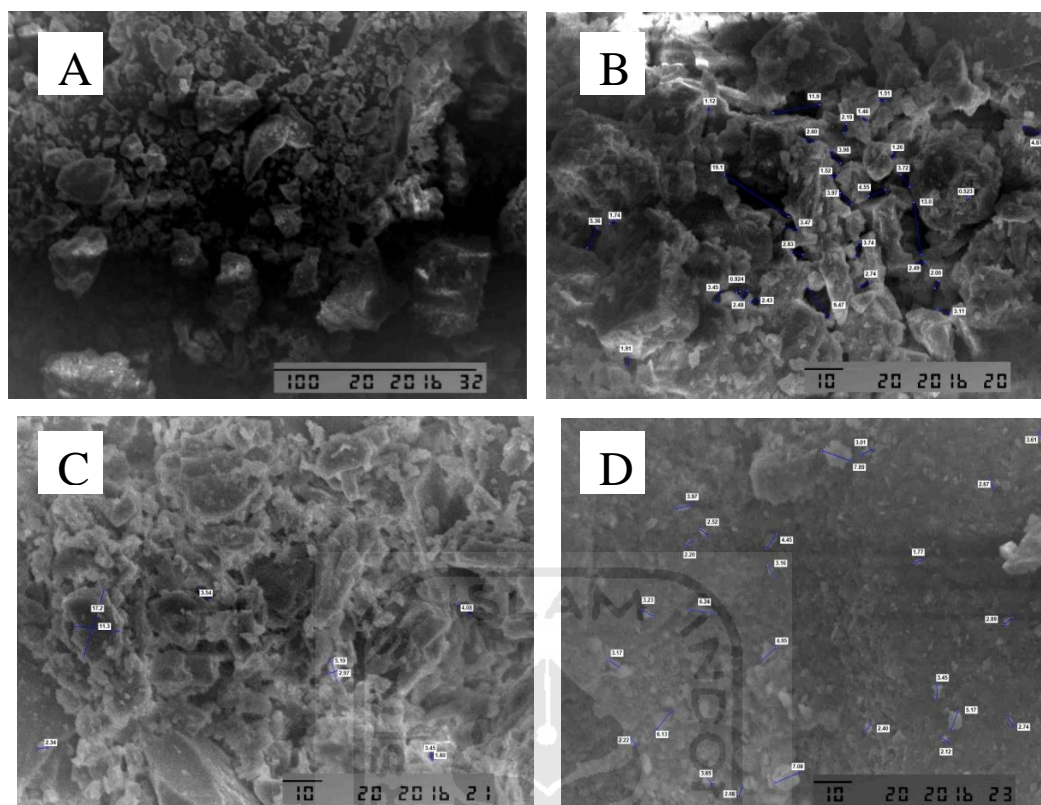
Mortar yang dihasilkan pada penelitian diharapkan tidak bersifat kedap air untuk memastikan bahwa konsolidan tidak menyebabkan perubahan sifat fisika batu secara drastis. Pengujian dilakukan dengan uji kecepatan/cepat rambat air naik secara vertikal pada permukaan mortar. Mortar yang baik memiliki kemampuan untuk dilewati oleh air.



Gambar 11. Menunjukkan kondisi mortar dengan konsolidan litium silikat yang disintesis dengan variasi mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ (A) 3,5:1 mol, (B) 4:1 mol, (C) 4,5:1 mol setelah uji kapilarisasi pada waktu 3 hari.

Dalam pengujian ini massa mortar ditimbang pada setiap variasi waktu. Mortar yang dibuat menggunakan konsolidan litium silikat dengan perbandingan 3,5:1 mol dan 4,5:1 mol tidak dapat dilakukan uji kapilaritas karena pada waktu perendaman 3 hari mortar hancur. Uji kapilaritas pada 4:1 mol memiliki pori total dalam mortar 11,69% dengan volume mortar $11,025 \text{ cm}^3$. Pori total dalam mortar merupakan rongga yang bisa ditempati oleh air/udara. Adapun volume air yang dapat ditampung mortar sebesar $0,226 \text{ g/cm}^3$ dengan kecepatan menyerap air sebesar $1,403 \text{ cm/menit}$. Mortar yang dihasilkan pada penelitian ini mendekati sifat fisik batu andesit yaitu memiliki kemampuan untuk dilewati air, sehingga air yang berada didalam batu maupun dari permukaan dapat mengalir. Air yang menggenang pada permukaan batu atau yang tertahan didalam batu merupakan salah satu penyebab kerusakan pada batu karena air dapat melautkan mineral pada batu yang menyebabkan pelapukan (Siregar, 2011).

Mortar yang dihasilkan diharapkan memiliki pori-pori. Hal ini penting karena pori pada mortar merupakan rongga yang dapat dilewati air atau udara. Mortar yang tidak dapat dilewati oleh air dapat menyebabkan kerusakan karena air yang ada didalam maupun dipermukaan terakumulasi dan mengakibatkan kerapuan. Untuk memastikan hal tersebut maka dilakukan analisis menggunakan SEM untuk melihat struktur komponen dalam mortar yang dihasilkan. Hasil analisis SEM ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil SEM pada serbuk batu andesit (A) dan mortar dengan konsolidan menggunakan litium silikat perbandingan 3,5:1 mol (B) 4:1 mol (C) dan 4,5 mol (D).

Hasil SEM pada Gambar 9 menunjukkan bahwa partikel serbuk andesit telah terdistribusi dengan baik karena rongga antara partikel berukuran besar dapat diisi oleh butiran andesit dengan ukuran partikel yang kecil. Hasil SEM untuk serbuk batu andesit menunjukkan tidak ada jembatan penghubung antar partikel dan mortar yang menggunakan konsolidan litium silikat yang disintesis dari perbandingan 3,5:1 mol dan 4,5 mol terdapat banyak butiran andesit yang tidak memiliki jembatan penghubung antar butiran, hal ini yang menyebabkan kerapuhan pada mortar tersebut sehingga mortar mengalami kerusakan ketika direndam air pada uji kapilaritas. Mortar dari litium silikat perbandingan 4:1 mol

terlihat memiliki pori-pori diantara partikel-partikel yang saling berikatan. Beberapa ukuran pori yang dapat dibaca dari hasil SEM ialah 4,08 μm dan 3,54 μm . Ukuran pori tersebut merupakan salah satu indikasi keberhasilan pembuatan mortar. Mortar yang baik masih memiliki pori yang dapat dilalui air atau udara.

Beberapa karakterisasi yang dilakukan pada hasil konsolidasi melalui pembuatan mortar andesit menunjukkan hasil yang optimum pada mortar yang dibuat dengan konsolidan litium silikat yang disintesis pada variasi rasio mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 4:1 mol. Sintesis litium silikat pada variasi 4:1 mol tidak menimbulkan sisa reaktan yang dapat mempengaruhi perubahan warna saat diaplikasikan ke mortar. Adapun hasil karakterisasi pada mortar secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Analisis mortar batu andesit menggunakan konsolidan litium silikat yang disintesis dengan variasi rasio mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ 3,5:1 mol, 4:1 mol dan 4,5:1 mol.

Analisis	Variasi mol		
	3,5:1 mol	4:1 mol	4,5:1 mol
Kekerasan (Mohs)	2-3	3-4	2-3
kandungan SiO_2 (%)	39.3275	43.575	40.1225
Porositas (%)	*	11, 69	*
kecepatan rambat (cm/menit)	*	0.226	*
Massa air total (g/cm ³)	*	1.403	*
SEM	distribusi pori baik	distribusi pori baik	distribusi pori baik

*tidak terukur karena mortar hancur saat proses analisis

dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa mortar yang dibuat dengan konsolidan litium silikat pada perbandingan 4:1mol memberikan nilai kekerasan, kandungan SiO_2 yang tertinggi diantara variasi lainnya serta mendekati sifat fisik baru andesit yaitu memiliki kemampuan untuk dialiri air.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

1. Hasil sintesis litium silikat dengan perbandingan $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ 3,5:1 mol, 4:1 mol, 4,5:1 mol memberikan persen rendemen secara berturut-turut sebesar 79,65%, 71,3% dan 68,56%, karakterisasi menggunakan FTIR menghasilkan spektrum yang tidak jauh berbeda pada setiap variasi, sehingga variasi rasio mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ tidak mempengaruhi jenis produk yang dihasilkan. Karakterisasi dengan FTIR, TGA/DTA dan XRD menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan pada kalsinasi 675°C ialah litium ortosilikat.
2. Litium ortosilikat sebagai bahan konsolidan yang di sintesis pada perbandingan 4:1 mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ memberikan hasil mortar terbaik dengan angka kekerasan 3-4mohs, kandungan SiO_2 43,575% dan hasil SEM menunjukkan distribusi partikel serta pori-pori yang baik. Mortar yang dihasilkan mendekati sifat fisik batu andesit yaitudapat dilewati ole air yang dibuktikan dengan memilikiporositas 11,69% dengan kecepatan rambat air 0,226 cm/menit dan massa air total $1,403 \text{ g/cm}^3$

6.2. Saran

Telah diketahui keefektifan litium silikat sebagai bahan konsolidan melalui pembuatan mortar baru andesit. Litium silikat yang di sintesis pada perbandingan 4:1mol $\text{LiOH}:\text{SiO}_2$ memberikan hasil mortar yang baik, untuk itu perlu dilakukan

penelitian lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana kemampuan konsolidasi litium silikat terhadap batu yang sudah lapuk. Sehingga kedepannya litium silikat dapat digunakan sebagai bahan konsolidan alternatif pada konsolidasi batu Candi Borobudur.



Daftar Pustaka

- Anonim, 2009, X-Ray Fluorescence Spectrometry, (Online), <http://www.panalytical.com/index.cfm?pid=130>, diakses tanggal 15 Agustus 2016.
- Anonim, 2014, Hasil Kajian Balai Konservasi Borobudur Balai Konservasi Borobudur, Magelang.
- Ariyanto, Y.B., 1993, *Laporan Studi Konservasi Tentang Penanganan Pengelupasan Batuan Candi Borobudur*. Balai Studi dan Konservasi Borobudur, Magelang.
- Candeias, A.E., Nogueira, P., Mirao, J., Silva, A.S., Viega, R., Casal, M.G., Ribeiro, I., and Seruya, A.I., 2004, *Characterization of Ancient Present Methodology and Future Prospective, Workshop on Chemistry in the Conservation of Cultural Heritage, Chairmen of the European Research Councils*, Portugal.
- Chang, C.C., Wang, C.C., and Kumta, P.N., 2001, Chemical synthesis and characterization of lithium ortho silikat Li_4SiO_4 . *Journal of Materials and Design*, **1**, 617-623.
- Choi, J., Park, S., Won, J., Choi, Y., Kang, Y., and Lee, M., 2012, *Effect Of Pretreatment For Teos Based Stone Consolidants, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone Columbia University*, New York.
- Croci and Giorgio, 1998, *The conservation and structural restoration of architectural heritage*, computational mechanics publication southampton, UK and Boston, USA.
- Day, R.A dan Underwood, A.L. 2002, *Analisis Kimia Kuantitatif*, Erlangga, Jakarta.
- Dixit, R.M., and Deshpande S.S., 1985, *X-Ray Florescence Detrmination of Pr, Nd, Gd, Tb, Dy and Y In High Purity Europium Oxide*, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay India.
- Earnshaw, A., 1997, *Chemistry of The Element 2nd Edition*, Elsevier, New York.
- Eugene, B.P., 1978, *Introduction to X-Ray Spectrometry Analysis*, Plenum Press, New York.

- Grant, N.M., and Suryanayana, C., 1998, *X-Ray Diffraction: A Partical Approach*, Plennum Press, New York.
- Gupta, S.P., 2011, Chemical Conservation of Chamunda Devi With Ethyl Silicates Stone Consolidant, *Int. J. Chem. Sci.*, **9**, 4, 1987-1992,
- Haldoko, L.A., Muhammad, R., dan Purwoko, W., 2014, Karakteristik Batu Penyusun Candi Borobudur, *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, **8**, 1, 38-47.
- Leisen, H., and Leisen E.V.P., 2012, *Technical Mission to Borobudur World Heritage Site in Indonesia*, Cologne University, Germany.
- Matteini, M., 2013, Inorganic treatments for the consolidation and protection of stone artefacts and mural paintings. *Conservation Science in Cultural Heritage*, **8**, 13-27
- Mosquera, M.J., Santos, D.M.D.L., Rivas, T., Sanmartín, P., and Silva, B., 2009, *New Nanomaterials for Protecting and Consolidating Stone*, Research gate, **8**, 1-12.
- Munandar, A., 2000, *Studi Pengaruh Kapilaritas Air Pada Bangunan Bata*, Balai Konservasi Borobudur, Magelang
- Nelson, S.A., 2008, minera chemistry. Diakses 15 februari 2016. <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/mineralchemistry.html>.
- Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., and Fortes, C., 2006, *Characterization and Durability*, New Tendencies for Research, Eduardo Torroja Institute, Madrid.
- Pinto, A.P.F., and Rodrigues, J.D., 2008, Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage*, **1**, 38-53
- Robertson, A.D., West A.R. and Ritchie, A.G., 1997, Solid State Ionics 104.
- Rodrigues, D., 2001, *Consolidation of decayed stones. A delicate problem with few practical solutions*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal
- Sampurno, 1969, Penelitian Tanah Dasar Candi Borobudur. *Pelita Borobudur Seri B No. 1*. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

- Siregar, I.M., 2011, Identifikasi Kerusakan dan Pelapukan Batuan. *Makalah: disajikan dalam Pelatihan Tenaga Teknis Konservasi Tingkat Menengah. Balai Konservasi Borobudur*, Magelang, 25 Juli - 13 Agustus 2011.
- Siswosuwarno, M., 1996, *Scanning Electron Microscope Sebagai Salah Satu Teknik Pemeriksaan Material. Seminar On in current knowledge. Proceedings of Metal 2004 National Musseum of Australia Canberra ACT (4-8 October)*, 294-306
- Shackley, M.S., 2009, X-ray Fluorescence spectrometry. Dipetik 15 februaris 2016. <http://www.swxrflab.net/xrfinstrumen.html>.
- Siddique, R., 2011, Review, Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling* **55**, 923 – 932.
- Silverstein, 2002, Identification of Organic Compound, 3rd Edition, John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Subha, P.V., Balagopa, N.N., Hareesh, P., Peer A.M., Yamaguchi, T., Warriar, K. G.K., and Hareesh, 2014, Enhanced CO₂ absorption kinetics lithium silicate platelets synthesized by a sol-gel approach. *Journal of materials chemistry A*, 00, 1-3, 3.
- Sugiharto, H., dan Tjong, W.H., 2004, *Rancang Bangun Alat Uji Permeabilitas Beton*, jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Suharyadi, 1984, *Geohidrologi*, Jurusan Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Swastikawati, A., Gunawan, A., dan Atmaja, Y., 2014, Kajian Konservasi Tinggalan Megalitik di Lore, Sulawesi Tengah, *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, Balai Konservasi Borobudur, **8**, 1, 17-37.
- Taqiyah, R., 2012, *Perbandingan Struktur Kristal dan Morfologi Lapisan Tipis Barium Titanat (BT) dan Barium Zirkonium Titanat (BZT) yang ditumbuhkan dengan Sol-Gel*, Skripsi, Fisika FMIPA Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Thokchom, S., Dutta, D., and Ghosh, S., 2011, Effect of Incorporating Silica Fume in Fly Ash Geopolymers, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **60**.
- Thorn, A., 2011, *The Consolidation and Bonding of Water-Saturated Siliceous Stone With Lithium Silicate*, Columbia University, New York.

- Thorn, A., 2012, *litium silicate consolidation of wet stone and plaster*, Colombia University, New York.
- Tognonvi, M.T., Julien Soro., and Sylvie Rossignol., 2011, Physical-chemistry of silica/alkaline silicate interactions during consolidation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **1**, 81-87.
- Trewin, N., 1988. *Use of the Scanning Electron Microscope in Sedimentology*. Techniques in sedimentology. Blackwell Science Publications, Oxford
- Vercoef, 1992, *Geologi untuk teknik Sipil*, Universitas Indonesia, Jakarta
- Vilklund, A., 2008. *Teknik pemeriksaan material menggunakan XRF, XRD, dan SEM-EDS*, <http://labinfo.wordpress.com/>, diakses tanggal 3 Agustus 2016.
- Wheeler, G.E., 2005, *Alkoxysilanes and the consolidation of stone*, Getty Publications, Los Angeles.
- Widyawati, N., 2012, *Analisa Pengaruh Heating Rate terhadap tingkat Kristal dan Ukuran Butir Lapisan BZT yang Ditumbuhkan dengan Metode Sol-Gel*, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Winarno, 2001, *peranan laboratorium dalam konservasi benda cagar budaya*, makalah disampaikan dalam penataran tenaga teknis kepurbakalaan tingkat dasar di Bogor, 4-18.
- Wu,S., Wen. Z., Xu. X., and Liu.Y., 2009, Synthesis and characterization of Li_4SiO_4 nano-powders by a water-based sol-gel process. *Journal of Nuclear Materials* ,**1**, 222-226.
- Wu, X., Wen, Z., Xu, X., and Liu, Y., 2010, Fabrication of Li_4SiO_4 pebbles by a sol-gel technique, *journal of Fusion Engineering and Design* 200050, PR China.
- Yang, A., Wang, H., Li, W., and Shi, J., 2012, Synthesis of litium metasilicate powders at low temperature via mechanical milling, *J.Am, Ceram, Soc.* **95**, 1818-1821
- Zhang, B., Nieuwoudt, M., and Easteal, A.J., Synthesis of litium metasilicate powders at low temperature via mechanical milling, *J.Am, Ceram, Soc.* **91**, 1927-1932

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan massa LiOH dan SiO₂ pada masing-masing variasi mol

a. Perbandingan mol 3,5:1

$$\begin{aligned} \text{mol LiOH} &= 0,3 \text{ mol/L} \times 0,25 \text{ L} \\ &= 0,075 \text{ mol} \\ &= 0,075 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3,5 \text{ mol LiOH} &= 3,5 \times 0,01875 \text{ mol} \\ &= 0,066 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gram LiOH} &= 0,066 \text{ mol} \times 41,941 \text{ g/mol} \\ &= 2,76 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gram SiO}_2 &= \frac{1}{4} 0,075 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} \\ &= 1,1125 \text{ g} \end{aligned}$$

b. Perbandingan mol 4:1

$$\begin{aligned} \text{mol LiOH} &= 0,3 \text{ mol/L} \times 0,25 \text{ L} \\ &= 0,075 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gram LiOH} &= 0,075 \text{ mol} \times 41,941 \text{ g/mol} \\ &= 3,1456 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gram SiO}_2 &= \frac{1}{4} 0,075 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} \\ &= 1,1125 \text{ g} \end{aligned}$$

c. Perbandingan mol 4,5:1

$$\begin{aligned} \text{mol LiOH} &= 0,3 \text{ mol/L} \times 0,25 \text{ L} \\ &= 0,075 \text{ mol} \end{aligned}$$

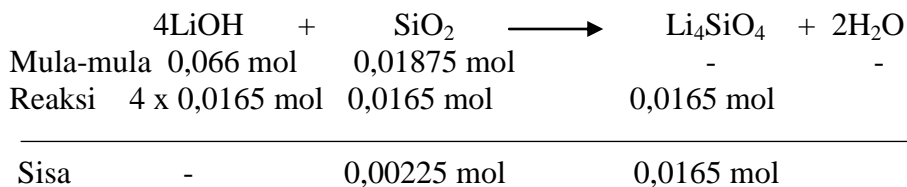
$$\begin{aligned} 4,5 \text{ mol LiOH} &= 4,5 \times 0,01875 \text{ mol} \\ &= 0,0844 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gram LiOH} &= 0,0844 \text{ mol} \times 41,941 \text{ g/mol} \\ &= 3,5389 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gram SiO}_2 &= \frac{1}{4} 0,075 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} \\ &= 1,1125 \text{ g} \end{aligned}$$

Lampiran 2. Massa hasil litium silikat secara teoritis

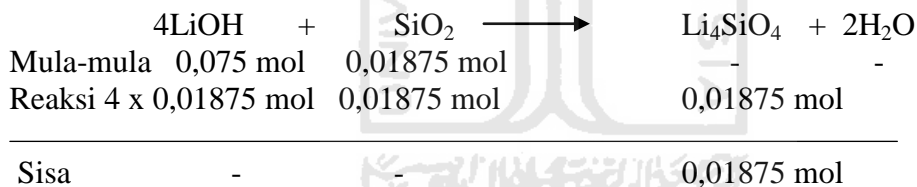
a. Perbandingan mol 3,5:1



$$\begin{aligned} \text{Gram Litium silikat} &= \text{mol} \times \text{Mr} \\ &= 0,0165 \text{ mol} \times 119,84 \text{ g/mol} \\ &= 1,977 \text{ g} \end{aligned}$$

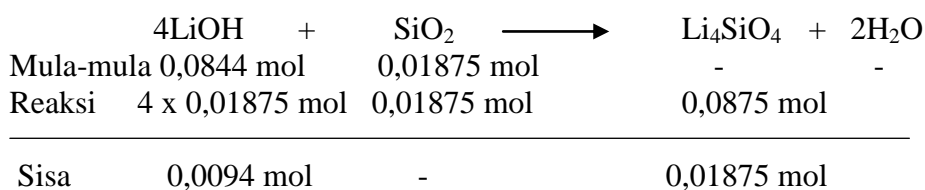
$$\begin{aligned} \text{Gram SiO}_2 \text{ sisa} &= \text{mol} \times \text{Mr} \\ &= 0,0022 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} \\ &= 0,135 \text{ g} \end{aligned}$$

b. Perbandingan mol 4:1



$$\begin{aligned} \text{Gram Litium silikat} &= \text{mol} \times \text{Mr} \\ &= 0,01875 \text{ mol} \times 119,84 \text{ g/mol} \\ &= 2,247 \text{ g} \end{aligned}$$

c. Perbandingan mol 4,5:1



$$\begin{aligned} \text{Gram Litium silikat} &= \text{mol} \times \text{Mr} \\ &= 0,01875 \text{ mol} \times 119,84 \text{ g/mol} \\ &= 2,247 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gram SiO}_2 \text{ sisa} &= \text{mol} \times \text{Mr} \\
 &= 0,0094 \text{ mol} \times 41,941 \text{ g/mol} \\
 &= 0,39\text{g}
 \end{aligned}$$

Lampiran 3. Perhitungan persen rendemen hasil sintesis litium silikat

a. Perbandingan 3,5:1 mol

$$\begin{aligned}
 \% \text{Rendemen} &= \frac{\text{gram hasil}}{\text{gram teori}} \times 100\% \\
 &= \frac{1,6823}{2,112} \times 100\% \\
 &= 79,65\%
 \end{aligned}$$

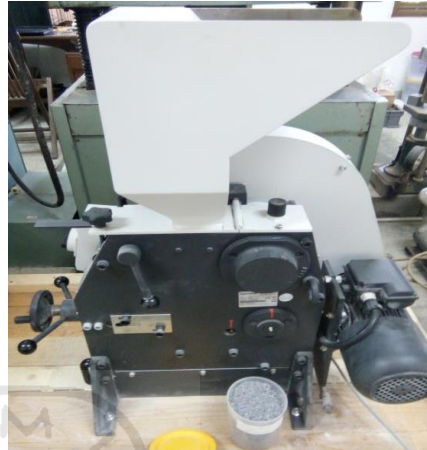
b. Perbandingan 4:1 mol

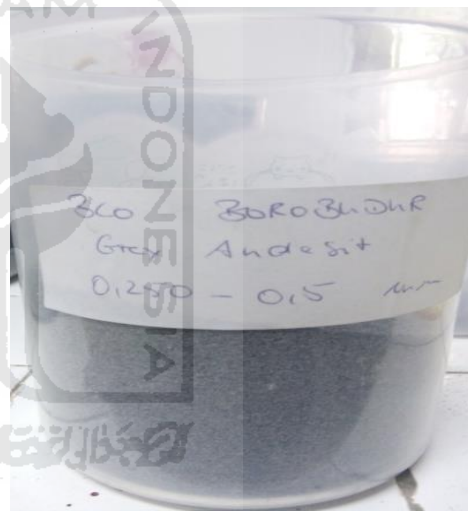
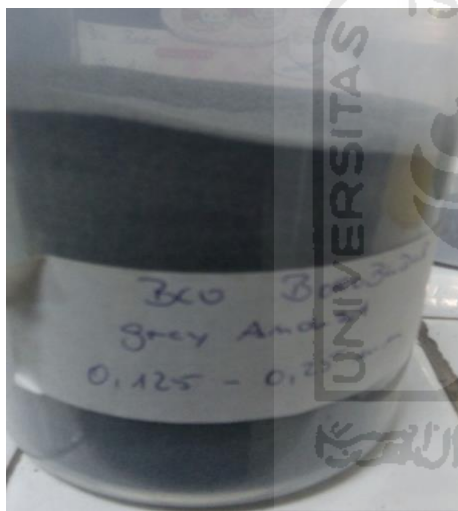
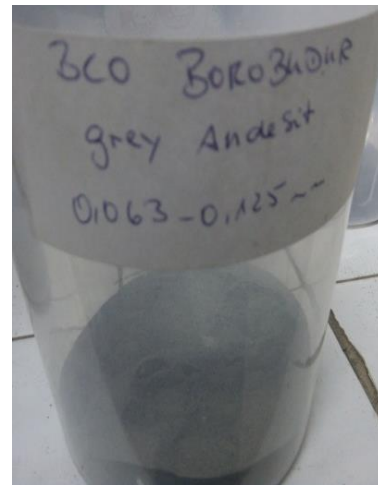
$$\begin{aligned}
 \% \text{Rendemen} &= \frac{\text{gram hasil}}{\text{gram teori}} \times 100\% \\
 &= \frac{1,6012}{2,2456} \times 100\% \\
 &= 71,3\%
 \end{aligned}$$

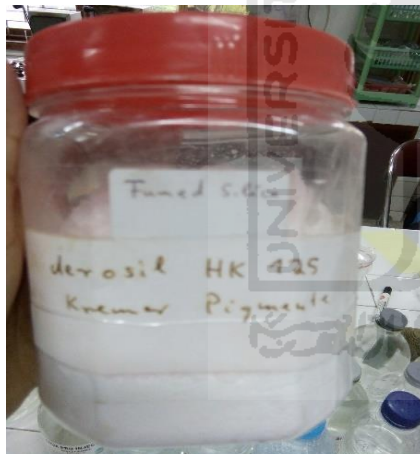
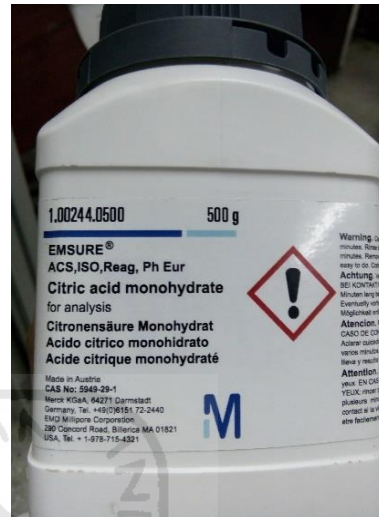
c. Perbandingan 4,5:1mol

$$\begin{aligned}
 \% \text{Rendemen} &= \frac{\text{gram hasil}}{\text{gram teori}} \times 100\% \\
 &= \frac{1,8082}{2,6376} \times 100\% \\
 &= 68,56\%
 \end{aligned}$$

Lampiran 4. Proses persiapan sampel batu andesit



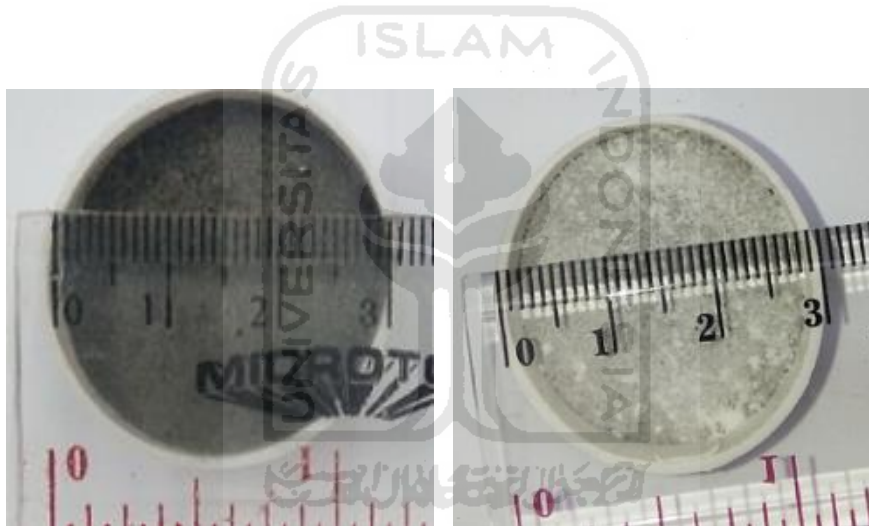


Lampiran 5. Proses sintesis litium silikat



Lampiran 6. Hasil mortar andesit





Lampiran 7. Alat sintesis dan analisis yang digunakan





Lampiran 8. Hasil karakterisasi

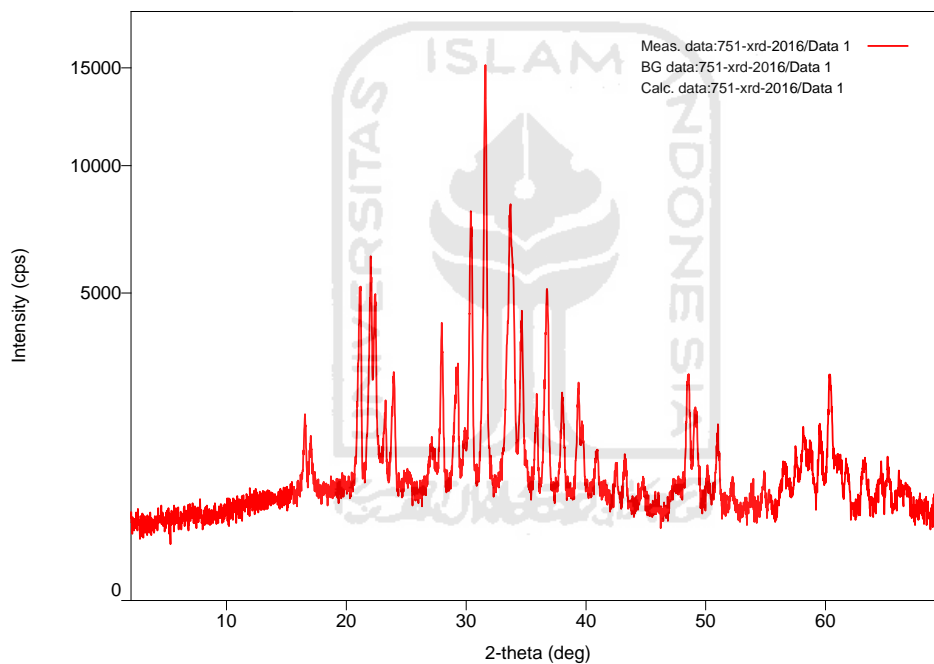
Hasil XRD

Peak List

General information

Analysis date	2016/11/10 09:17:43	Measurement date	2016/11/10 09:08:11
Sample name	4 : 1 XRD	Operator	administrator
File name	751-xrd-2016.ras		
Comment			

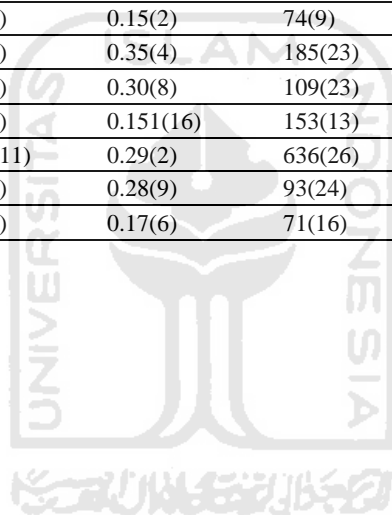
Measurement profile



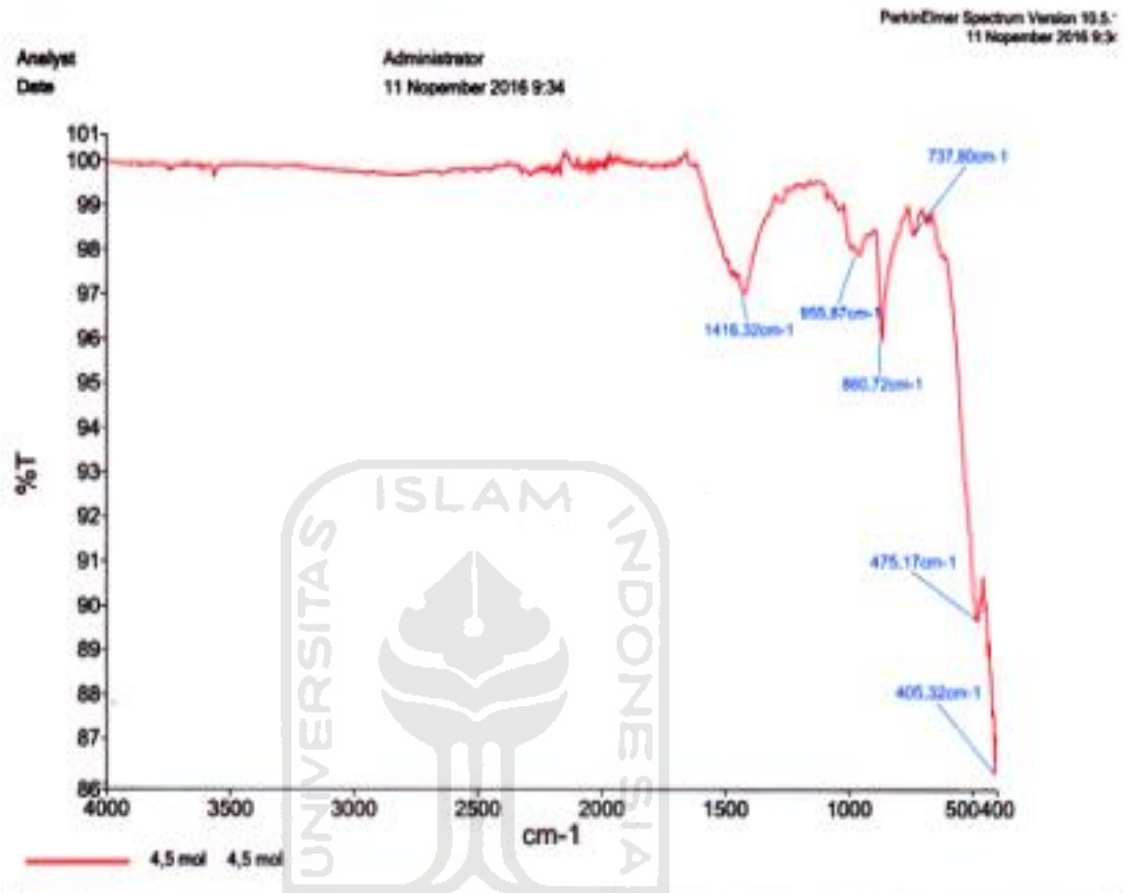
Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	16.547(15)	5.353(5)	771(80)	0.196(19)	214(13)	0.28(5)	1.6(5)
2	17.01(2)	5.210(7)	484(63)	0.27(3)	177(11)	0.37(7)	0.9(3)
3	21.175(8)	4.1923(15)	2880(155)	0.262(6)	815(18)	0.28(2)	4.0(7)
4	22.057(9)	4.0267(16)	3309(166)	0.239(9)	1050(35)	0.32(3)	2.9(6)
5	22.395(10)	3.9667(17)	2922(156)	0.204(13)	819(33)	0.28(3)	1.6(3)
6	23.263(18)	3.821(3)	685(76)	0.255(18)	215(10)	0.31(5)	3.5(13)
7	23.957(12)	3.7115(19)	1337(106)	0.262(10)	421(14)	0.31(4)	1.8(4)
8	27.02(6)	3.297(7)	323(52)	0.54(6)	186(17)	0.58(15)	0.4(2)
9	27.963(12)	3.1882(14)	2020(130)	0.222(9)	478(17)	0.24(2)	1.5(3)
10	29.286(5)	3.0471(5)	1363(107)	0.314(13)	463(21)	0.34(4)	5(2)
11	30.391(11)	2.9388(10)	4925(203)	0.230(9)	1422(32)	0.289(18)	1.2(2)

12	31.609(7)	2.8282(6)	9171(276)	0.243(5)	2571(39)	0.280(13)	2.1(3)
13	33.704(11)	2.6571(9)	3572(173)	0.379(15)	1583(117)	0.44(5)	5.0(16)
14	33.941(16)	2.6391(12)	2966(157)	0.31(9)	1096(108)	0.37(6)	3.6(12)
15	34.648(10)	2.5868(8)	2332(139)	0.239(13)	691(20)	0.30(3)	2.6(7)
16	35.88(2)	2.5010(13)	937(88)	0.209(15)	209(14)	0.22(4)	2.1(9)
17	36.754(5)	2.4433(3)	3003(158)	0.295(6)	962(17)	0.32(2)	2.19(14)
18	38.016(17)	2.3650(10)	1062(94)	0.269(12)	317(14)	0.30(4)	1.2(3)
19	39.352(15)	2.2878(9)	1164(98)	0.22(2)	273(45)	0.23(6)	1.8(7)
20	39.71(4)	2.268(2)	612(71)	0.30(8)	200(43)	0.33(11)	2.3(17)
21	40.92(6)	2.204(3)	419(59)	0.25(5)	122(18)	0.29(8)	2(2)
22	43.232(15)	2.0910(7)	395(57)	0.20(5)	91(16)	0.23(7)	1.1(13)
23	48.470(10)	1.8766(4)	1604(116)	0.187(16)	424(36)	0.26(4)	0.55(11)
24	49.12(3)	1.8532(11)	900(87)	0.39(5)	558(49)	0.62(11)	1.2(4)
25	50.126(19)	1.8184(6)	325(52)	0.11(3)	50(9)	0.15(5)	0.6(4)
26	50.99(2)	1.7894(8)	762(80)	0.22(2)	202(13)	0.27(4)	1.7(7)
27	56.53(11)	1.627(3)	234(44)	0.36(9)	100(18)	0.43(16)	1.1(15)
28	57.51(2)	1.6011(5)	459(62)	0.15(2)	74(9)	0.16(4)	1.0(5)
29	58.17(5)	1.5846(12)	498(64)	0.35(4)	185(23)	0.37(9)	1.3(8)
30	58.787(13)	1.5694(3)	347(54)	0.30(8)	109(23)	0.32(12)	4(3)
31	59.501(13)	1.5523(3)	812(82)	0.151(16)	153(13)	0.19(4)	1.2(4)
32	60.285(18)	1.5340(4)	1489(111)	0.29(2)	636(26)	0.43(5)	0.58(13)
33	63.18(11)	1.471(2)	313(51)	0.28(9)	93(24)	0.30(12)	1.0(14)
34	65.20(2)	1.4297(5)	299(50)	0.17(6)	71(16)	0.24(9)	1(2)

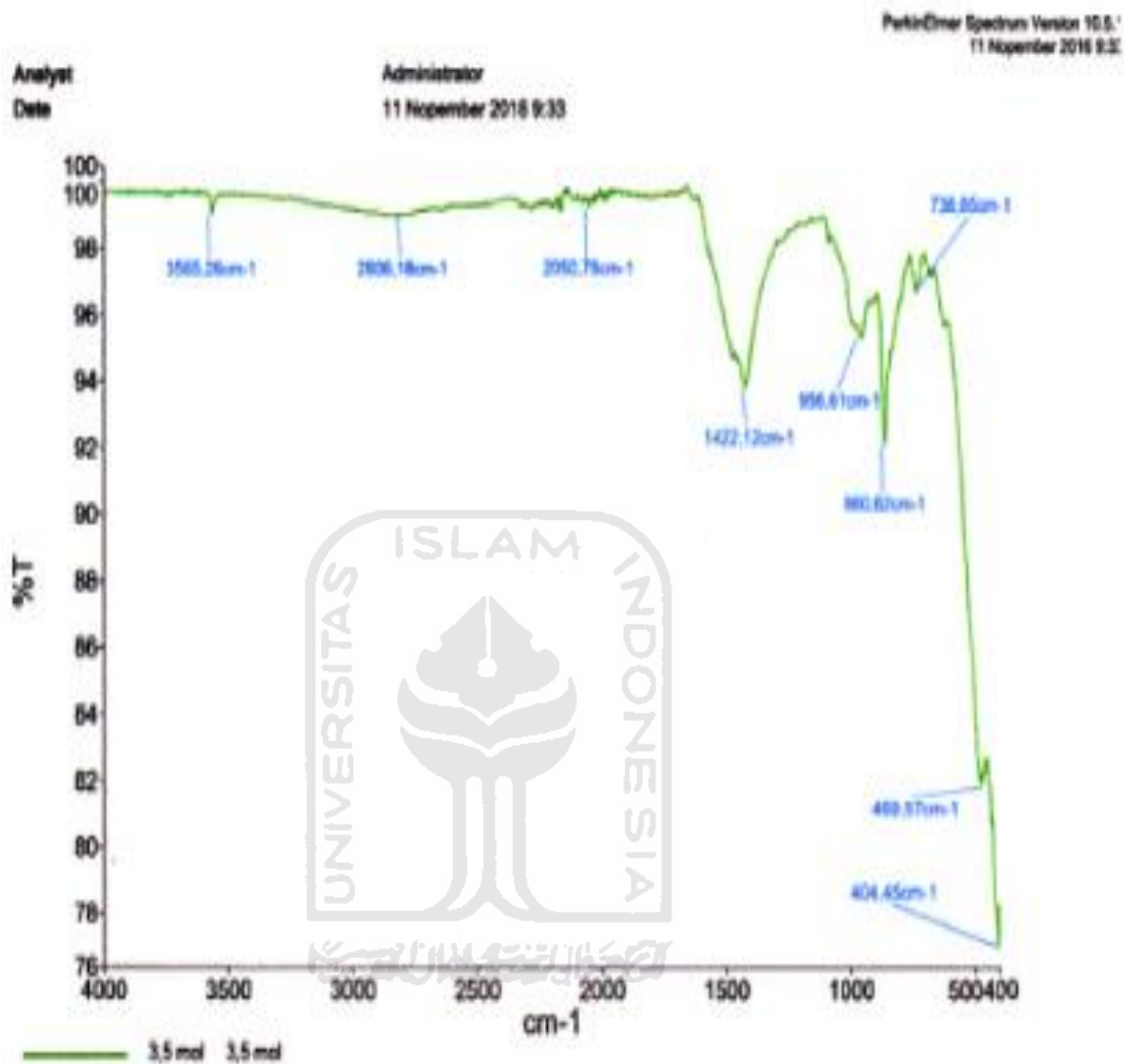


Hasil FTIR



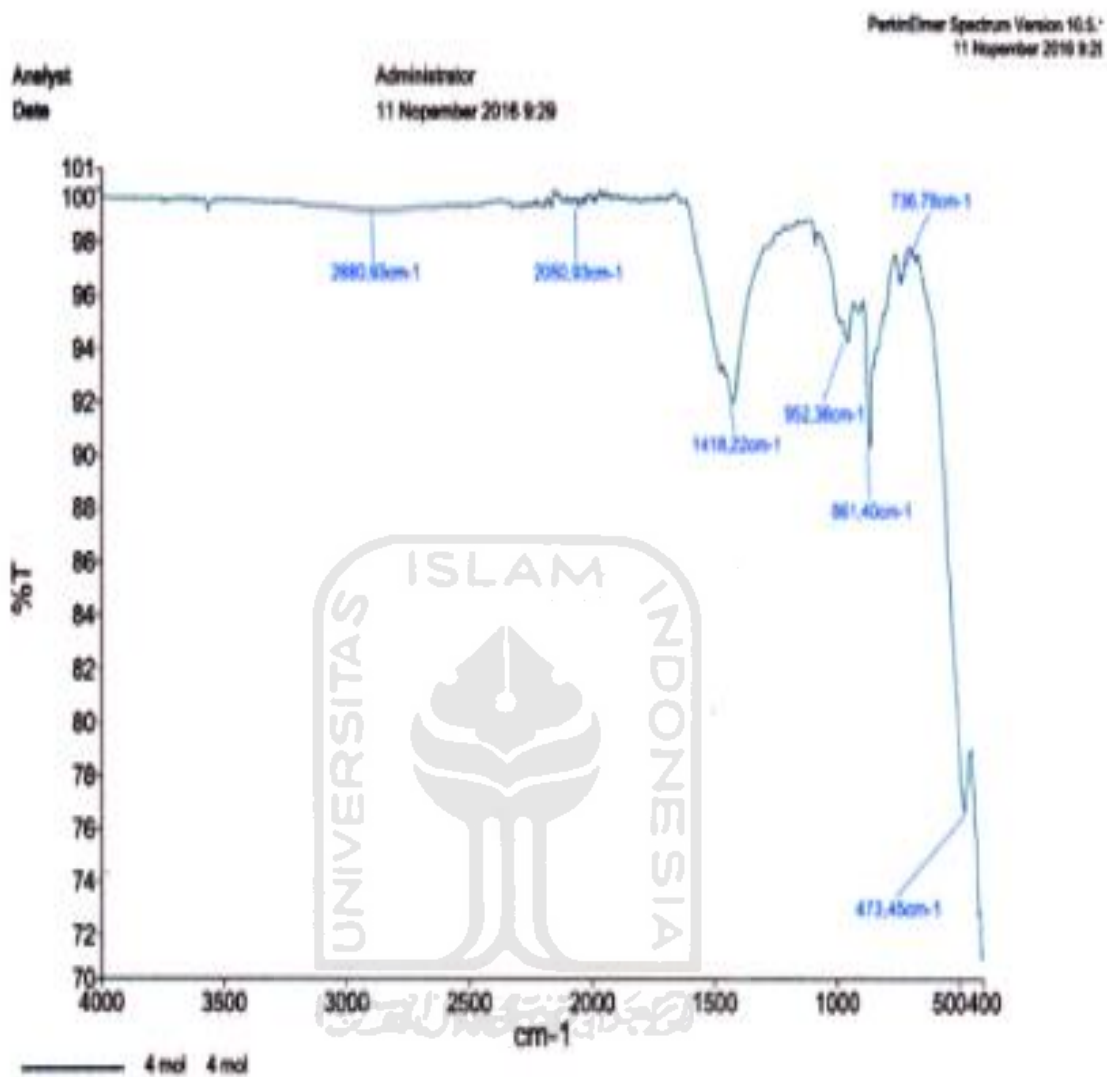
Source Spectra Results	
Spectrum Name	Number Of Peaks
4,5 mol	6

List of Peak Area/Height	
Peak Number	X (cm-1) (cm-1)
1	1416,32
2	955,87
3	860,72
4	737,8
5	475,17
6	405,32



Source Spectra Results	
Spectrum Name	Number Of Peaks
3,5 mol	9

List of Peak Area/Height	
Peak Number	X (cm-1) (cm-1)
1	3565,26
2	2806,18
3	2050,78
4	1422,12
5	956,61
6	800,62
7	736,85
8	469,57
9	404,45



Source Spectra Results	
Spectrum Name	Number Of Peaks
4 mol	7

List of Peak Area/Height	
Peak Number	X (cm-1) (cm-1)
1	2880,93
2	2050,93
3	1418,22
4	952,38
5	861,4
6	736,78
7	473,45

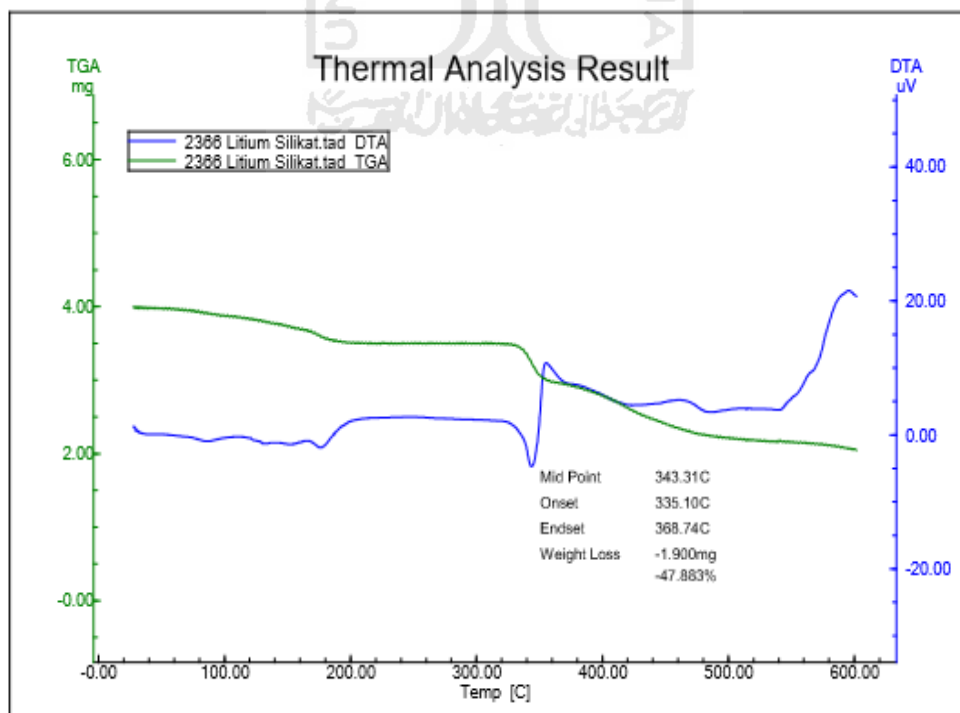
LAMPIRAN HASIL ANALISIS

1. Litium Silikat

[File Information]		[Temp Program]	
File Name:	2366 Litium Silikat.tad	Start Temp [°C]	30
Sample Name:	Litium Silikat	Temp Rate [°C/min]	10
Lot No:	2366	Hold Temp [°C]	600
Acquisition Date	16/11/2009	Hold Time [min]	0
Acquisition Time	08:20:16(+0700)	Gas	Nitrogen
Detector:	DTG-60		
Serial No:	C30565100652TK		
Operator:	Heri		
Atmosphere:	Nitrogen		
Flow Rate:	15[ml/min]		
Cell:	AL crimping		
Sample Weight:	3.968[mg]		
Molecular Weight:	0.00		

[Analysis Result]

TGA [Weight Loss]	1
Mid Point	
[°C]	343.31
Onset	
[°C]	335.10
Endset	
[°C]	368.74
Weight Loss	
mg	-1.900
%	-47.883



HASIL SINTESIS Litium Silikat

NO	Variasi mol		
	3,5:1mol	4:1 mol	4,5:1mol
1	1,6914 g	1,5923 g	1,8125 g
2	1,6732 g	1,6108 g	1,8039 g
Rata-rata	1,6823 g	1,6012 g	1,8082 g

HASIL UJI KAPILARISASI

Waktu	4:1 mol					
	massa (g)	tinggi air (cm)	massa (g)	tinggi air (cm)	massa (g)	tinggi air (cm)
0 menit	21,26	0	21,33	0	21,38	0
30 s	22,37	2,75	22,27	2,55	22,5	2,3
1 menit	22,74	3,38	22,64	3,2	22,8	3,5
2 menit	23,14	4,35	23,08	4	23,22	4,5
5menit	23,54	4,9	23,62	4,9	23,7	4,9
10 menit	23,59	4,9	23,83	4,9	23,72	4,9
15 menit	23,6	4,9	22,85	4,9	23,73	4,9
30 menit	23,61	4,9	22,85	4,9	23,73	4,9
1 jam	23,65	4,9	22,87	4,9	23,77	4,9
72 jam	23,66	4,9	23,89	4,9	23,9	4,9

HASIL UJI XRF

sampel	SiO ₂	Si	Al	Fe	P	Cd	Sn
sampel andesit	37,363	14,91	6,518	6,070	0,0019	0,0278	0,0106
	39,478	15,72	6,518	5,596	0,091	0,0253	0,0100
	37,737	15,31	6,389	5,780	0,078	0,0279	0,0103
	40,646	16,79	6,641	5,798	0,078	0,0265	0,0099
3,5:1 mol	40.69	19.02	7.04	5.6174	0.0718	0.0262	0.0103
	30.86	14.43	5.5	5.3752	ND	0.0267	0.0098
	29.96	13.96	5.39	5.2875	ND	0.0268	0.0096
	41.8	19.54	7.21	5.5108	0.0845	0.0263	0.0095
4:1 mol	46.57	20.27	7.48	5.5965	0.1111	0.0264	0.01
	45.68	19.02	6.71	5.4398	0.0704	0.0261	0.0088
	44.76	18.59	6.78	5.8685	0.0906	0.0259	0.01
	45.29	19.37	6.48	5.7793	0.0912	0.0274	0.0101
4,5:1 mol	40.13	18.76	6.94	5.2636	0.0718	0.0254	0.0093
	39.46	18.45	6.76	5.2757	0.07	0.026	0.0094
	39.74	18.58	6.78	5.5368	0.0791	0.0275	0.0105
	40.16	18.77	7.02	5.4178	0.0741	0.0269	0.0099

sampel	Sb	Pb	K	Ca	Ti	Cr	Mn
sampel andesit	0,0144	0,0019	1,417	4,570	0,446	0,061	0,165
	0,0137	0,0022	1,564	4,920	0,466	0,056	0,156
	0,0147	0,0021	1,504	4,712	0,436	0,064	0,153
	0,0146	0,0019	1,593	5,109	0,476	0,070	0,155
3,5:1 mol	0.0144	0.0023	1.2523	5.7605	0.4598	0.0325	0.1591
	0.0141	0.0019	0.8195	3.8926	0.4379	0.0316	0.1533
	0.0148	0.002	0.7168	3.563	0.4254	0.0413	0.1349
	0.0138	0.002	1.2789	5.9573	0.4451	0.0358	0.1492
4:1 mol	0.0134	0.0021	1.4694	7.1914	0.4774	0.0294	0.1559
	0.0141	0.002	1.215	5.8682	0.4449	0.0417	0.1481
	0.0148	0.0029	1.5071	5.1703	0.4601	0.0415	0.153
	0.0132	0.0022	1.4567	5.0797	0.4816	0.0385	0.1584
4,5:1 mol	0.0129	0.0029	1.2018	6.1128	0.4308	0.0271	0.1538
	0.0128	0.0021	1.1889	5.8944	0.4253	0.0386	0.1496
	0.0141	0.0027	1.2691	5.7959	0.4666	0.0458	0.1455

	0.0132	0.0026	1.2583	5.789	0.426	0.0364	0.1465
--	--------	--------	--------	-------	-------	--------	--------

sampel	Ni	Cu	Zn	Zr	Ag	LE
sampel andesit	0,014	0,0089	0,0115	0,0205	0,0196	56,21
	0,013	0,0913	0,118	0,0210	0,0170	60,36
	0,0086	0,0094	0,0106	0,0197	0,0120	57,89
	0,011	0,0085	0,0119	0,0202	0,0182	58,41
3,5:1 mol	0.007	0.0092	0.0104	0.0198	0.0191	60.39
	0.0056	0.0101	0.0088	0.02	0.0187	69.19
	0.007	0.0103	0.0094	0.0206	0.0196	70.29
	0.0057	0.0086	0.0098	0.0205	0.0188	59.6
4:1 mol	0.0061	0.011	0.0111	0.0202	0.0183	55.54
	0.0044	0.0109	0.0111	0.0192	0.0177	60.88
	0.0087	0.0097	0.0105	0.0201	0.0192	61.14
	0.0071	0.0091	0.0104	0.0197	0.0176	61.88
4,5:1 mol	0.0037	0.0106	0.0091	0.0196	0.0172	60.86
	0.0064	0.0098	0.0097	0.0201	0.0172	61.58
	0.0073	0.0078	0.0109	0.0197	0.0183	61.12
	0.0058	0.009	0.0092	0.0195	0.0183	60.88

HASIL UJI KEKERASAN (Mohs)

Variasi mol	Kekerasan (Mohs)
3,5:1 mol	2-3
4:1 mol	3-4
4,5:1 mol	2-3