

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI
PENAMBAHAN TRASS DAN LIMESTONE
TERHADAP KUAT TEKAN SEMEN**

THESIS

CAHYONO
0606150984



UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
SALEMBA
DESEMBER 2008

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI PENAMBAHAN
TRASS DAN LIMESTONE TERHADAP KUAT TEKAN SEMEN**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Bidang Ilmu Material

CAHYONO
0606150984



UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
SALEMBA
DESEMBER 2008

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Cahyono
NPM : 0606150984
Program Studi : Ilmu Material
Judul Tesis : Pengaruh Variasi Komposisi Penambahan Trass
Dan Limestone Terhadap Kuat Tekan Semen

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Ilmu Material pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Azwar Manaf, M.Met (.....)
Penguji I : Dr. Emil Budiyanto (.....)
Penguji II : Dr. Soehardjo Poertadji (.....)
Penguji III : Dr. Sotya Astutiningsih (.....)
Ketua Sidang : Dr. Bambang Soegiyono (.....)

Ditetapkan di : Salemba, Jakarta

Tanggal : 12 Desember 2008

PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Cahyono
NPM : 0606150984
Tanda tangan :
Tanggal : 07 Desember 2008



**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Cahyono
NPM : 0606150984
Program Studi : Ilmu Material
Departemen : Program Pascasarjana
Jenis Karya : Tesis

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

Pengaruh Variasi Komposisi Penambahan Trass dan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tesis saya tanpa meminta ijin dari saya, selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis / pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Salemba, Jakarta

Pada tanggal : 07 Desember 2008

Yang menyatakan

(Cahyono)

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji hanya bagi Alloh SWT, Tuhan semesta alam yang telah member kemudahan bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Shalawat dan salam semoga Alloh curahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga beliau, sahabat-sahabat, dan orang yang mengikuti dengan komitmen.

Penulisan tesis merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program Magister Ilmu Material di Universitas Indonesia. Untuk itu dengan kerendahan hati, penulis ucapkan terimakasih yang tak terhingga kepada :

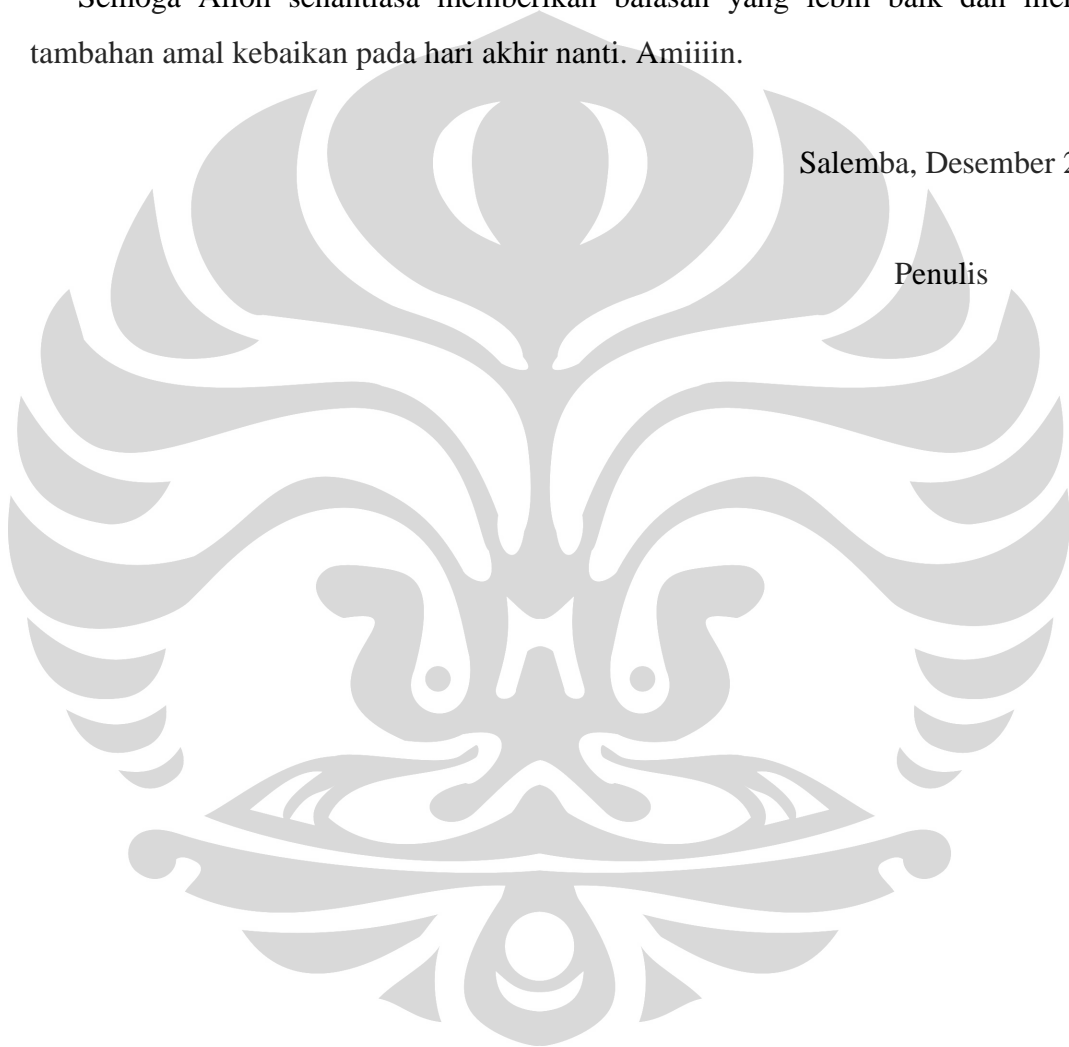
1. Dr. Azwar Manaf, M. Met., pembimbing utama yang telah bersedia meluangkan waktu memberikan pengarahan, bahan penulisan, diskusi, bimbingan dan persetujuan sehingga tesis ini dapat selesai tepat waktu
2. Dr. Bambang Soegiyono, yang telah banyak memberikan bimbingan, saran, masukan serta membantu pengambilan foto SEM untuk sampel uji .
3. Dr. Emil Budiyanto, penguji yang telah memberikan petunjuk, saran, dan kritik untuk perbaikan tesis ini
4. Dr. Soehardjo Poertadji, penguji yang telah memberikan petunjuk, saran, dan kritik untuk perbaikan tesis ini
5. Dr. Sotya Astuti Ningsih, penguji yang telah memberikan petunjuk, saran, dan kritik untuk perbaikan tesis ini
6. Bapak Irfan, yang telah membantu pengambilan foto SEM untuk sampel uji.
7. Ibu Vera Indrawati, yang telah memberikan saran, masukan, dan memberikan ijin untuk menggunakan peralatan uji di Indocement.
8. Bapak Indriadi, Bp Budi Hartono, Bp Zainudin, Bapak Rosi, Bapak Dwi Sutriarga, Bapak Didik Aryanto, yang telah banyak membantu penelitian dan berdiskusi tentang penelitian semen.
9. Teman-teman di Program Pascasarjana Ilmu Material yang telah bekerjasama dan saling memberikan dukungan.
10. Bapak Suroto, Mbak Lilik, Mbak Siti dan Mas Eko yang membantu urusan administrasi.

11. Bapak dan Ibu yang senantiasa mendoakan siang dan malam
12. Keluarga tercinta, istri dan anak-anak tersayang yang senantiasa memberi dukungan sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.
13. Semua pihak yang belum sempat tersebut dalam tulisan ini.

Semoga Allah senantiasa memberikan balasan yang lebih baik dan menjadi tambahan amal kebaikan pada hari akhir nanti. Amiiiiiin.

Salemba, Desember 2008

Penulis



ABSTRAK

Nama : Cahyono
Program Studi : Ilmu Material
Judul : Pengaruh Variasi Komposisi Penambahan Trass dan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen

Variasi komposisi penambahan Trass dan Limestone sebagai material suplemen *Ordinary Portland Cement* dilakukan pada penelitian ini dengan tujuan untuk menurunkan harga tanpa mengurangi sifat kuat tekan. Kuat tekan yang diharapkan dari variasi material pada penelitian ini bisa melebihi kuat tekan *Ordinary Portland Cement*. Trass dan limestone divariasi dengan jumlah total substitusi 21% berat, dan semen dipertahankan pada 79% berat. Hasil pencampuran trass, limestone dan semen dipertahankan pada kehalusan 5000 cm²/gram. Semen hasil variasi ini dipilih yang terbaik berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, kemudian dibandingkan dengan hasil kuat tekan semen yang tidak ditambahkan trass dan limestone. Perubahan mineralogi atau kristal akibat variasi komposisi material akan diamati dengan X-RD dan SEM. Kalsium Silikat Hidrat (CSH) sebagai produk utama yang memberikan kontribusi terhadap kuat tekan, diharapkan teridentifikasi pada pengamatan ini. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan dari variasi dengan komposisi trass 14% dan limestone 7% lebih tinggi dari variasi komposisi trass dan limestone yang lain, baik pada umur pengujian 3, 7 dan 28 hari. Kuat tekan variasi komposisi trass 14% dan limestone 7% berturut turut untuk umur 3, 7 dan 28 hari adalah 224 kgf/cm², 282 kgf/cm², dan 365 kgf/cm². Berturut-turut untuk umur 3, 7 dan 28 hari, kuat tekan semen tanpa penambahan trass dan limestone adalah 261 kgf/cm², 352 kgf/cm², dan 448 kgf/cm². Hasil diatas disebabkan pada semen tanpa penambahan trass dan limestone terbentuk kristal CSH jenis kristal Rosenhandrite yang cukup banyak daripada pada semen dengan tambahan trass dan limestone. Kristal Rosenhandrite ini mempunyai kontribusi terhadap kuat tekan lebih tinggi daripada CSH yang lain seperti C2SH alpha, C6S3H gamma delait, dan afwillite. Pengamatan SEM pada sampel semen tanpa trass dan limestone terlihat adanya kristal CSH yang berbentuk plat dengan bulu-bulu lembut yang dihubungkan jarum-jarum kecil (ettringite), sedang pada semen variasi trass dan limestone berbentuk plat tanpa bulu-bulu dan tanpa jarum-jarum kecil.

Kata Kunci : Trass, Limestone, XRD, SEM, Kuat Tekan, Kalsium Silikat Hidrat (CSH), Rosenhandrite

ABSTRACT

Name : Cahyono
Study Program : Material Science
Title : The Effect Composition Variation of Trass and Limestone
Addition on Compressive Strength of Cement

Composition Variation of Trass and Limestone addition as supplement material in Ordinary Portland Cement is done in the research with the goal to reduce cost without decreasing compressive strength. It is even expected that the compressive strength of cement added with suitable variation of trass and limestone will exceed that of Ordinary Portland Cement. Trass and limestone is varied with a total substitution of 21% wt, and cement is kept 79% wt. The fineness Trass, Limestone and Cement mixture is kept on 5000 cm²/gram. Optimum variation of Trass and Limestone addition is determined by compressive strength compared to OPC without additives, and the mineralogy and crystalline phase is like CSH as observed using XRD and SEM. The research results showed that compressive strength of composition variation of 14% Trass and 7% Limestone has compressive strength higher than others. The compressive Strength of optimum variation are 224 kgf/cm², 282 kgf/cm² and 365 kgf/cm² for samples tested at 3, 7, and 28 days respectively. The compressive strength of cement without additive are 261 kgf/cm², 352 kgf/cm² and 448 kgf/cm² for samples tested 3, 7, and 28 days respectively. The difference in compressive strength between cement with and without additive is attributed to the formation of Rosenhandrite, which is a crystalline CSH. Large quantity of Rosenhandrite is formed in cement without addition of trass and limestone. It is assumed that Rosenhandrite is the dominant phase that contribute to compressive strength relative to the other CSH phases as like C2SH Alpha, C6S3H Gamma Dellaite, and Afwillite. Under the SEM, CSH phases in cement without additive showed plate shape with smooth hairy which is connected with small needles (ettringite), while for cement with composition variation of Trass and Limestone showed plate shape without smooth hairy and small needle.

Key Words : *Trass, Limestone, XRD, SEM, Compressive Strength, Calcium Silicate Hydrate (CSH), Rosenhandrite.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4 Metodologi Penelitian	3
1.4 Hipotesa Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Proses Pembuatan Semen	5
2.2 Reaksi Pembentukan <i>Clinker</i>	6
2.3 <i>Clinker Phase</i>	8
2.4 Semen Portland Komposit	10
2.5 Sifat dan Pengerasan Pasta Semen	13
2.5.1 Mikrostruktur dari Pengerasan Pasta Semen	13

2.5.1.1 Hasil Hidrasi	13
2.5.1.2 Struktur Pori	14
2.5.1.3 Pori Larutan	17
2.5.1.4 Zona Transisi diantara Pasta Semen dan Agregat	18
2.5.2 Sifat dari Pasta Semen yang Mengeras	19
2.5.2.1 Kuat Tekan	19
2.5.2.2 Permeabilitas dari Pasta Semen	20
2.5.2.3 Humiditas dari Pasta Semen	21
2.6 Hidrasi Semen	21
2.6.1 Hidrasi dari <i>Phase Clinker</i>	21
2.6.1.1 Reaksi dari Silikat	22
2.6.1.2 Reaksi dari Aluminat tanpa Sulfat	23
2.6.1.3 Reaksi dari Aluminat dengan Sulfat	24
2.6.2 Tahapan Hidrasi Semen	25
2.6.3 Hidrasi Semen yang Mengandung Blast Furnace Slag	26
2.6.4 Kinetika dari Hidrasi Semen	27
2.6.5 <i>Phase CSH</i>	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	30
3.1 Sistematika Penelitian	30
3.1.1 Seleksi dan Persiapan Material	30
3.1.2 Perencanaan Design Komposit Material dan Pengujian...	31
3.1.3 Proses Pembuatan Sampel Uji	32
3.1.4 Proses Pengujian Sampel	34
3.1.5 Proses Pengolahan Data Hasil Pengujian	35
3.2 Diagram Alir Penelitian	37

BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Validasi Peralatan Uji	38
4.1.1 Validasi Alat Uji X-RF.....	38
4.1.2 Validasi Alat Uji X-RD	39
4.1.2.1 Validasi X-RD dengan <i>Clincher</i> Standar NIST	39
4.1.2.2 Validasi X-RD dengan <i>Calcite</i> Standar.....	39
4.1.2.3 Validasi X-RD Trass dengan TiO ₂ Anatase 30%	40
4.1.3 Validasi Alat mesin Kuat Tekan	41
4.2 Hasil Pengujian Sampel Uji Sebelum dibuat Pasta Semen	41
4.2.1 Hasil Pengujian dengan X-RF.....	41
4.2.2 Hasil Pengujian dengan X-RD.....	42
4.2.3 Hasil Pengujian dengan Alat Mastersizer.....	46
4.3 Hasil Pengujian Sampel Uji Setelah dibuat Pasta Semen	47
4.3.1 Hasil Pengujian dengan X-RD.....	47
4.3.2 Hasil Pengujian dengan SEM.....	54
4.3.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	66
4.4 Reaksi Hidrasi Sampel Uji Ditinjau dengan Pengamatan X-RD	67
4.5 Reaksi Hidrasi Sampel Uji Ditinjau dengan Pengamatan SEM	77
4.6 Pengaruh Variasi Trass dan Limestone Terhadap Kuat Tekan Dilihat dari Mineralogi Pasta Semen	79
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1 Kesimpulan	83
5.2 Saran.....	83
DAFTAR REFERENSI	84

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tahapan Reaksi Hidrasi Phase C3S	28
Tabel 3.1	Komposisi Material dan Jumlah Pengujian	31
Tabel 4.1	Validasi X-RF dengan menggunakan standar NIST-1888 a tercantum dalam sertifikat.	38
Tabel 4.2	Validasi X-RD dengan menggunakan standar NIST-1888 a	39
Tabel 4.3	Validasi X-RD dengan menggunakan Limestone Standar	40
Tabel 4.4	Validasi X-RD dengan menggunakan Trass dan TiO ₂ standar	40
Tabel 4.5	Validasi mesin kuat tekan dengan <i>load cell</i>	41
Tabel 4.6	Komposisi kimia sampel uji sebelum dibuat pasta	42
Tabel 4.7	Mineralogi semen , Limestone dan Trass	43
Tabel 4.8	Mineralogi Sampel uji sebelum dicampur dengan air	44
Tabel 4.9	Mineralogi sampel uji sebelum dicampur dengan air	45
Tabel 4.10	Distribusi ukuran butiran sampel uji sebelum bercampur dengan air	46
Tabel 4.11	Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 3 hari	48
Tabel 4.12	Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 3 hari	49
Tabel 4.13	Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 7 hari	50
Tabel 4.14	Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 7 hari	51
Tabel 4.15	Mineralogi sampel pasta pengujian 28 hari	52
Tabel 4.16	Mineralogi sampel pasta pengujian 28 hari	53
Tabel 4.17	Hasil pengujian kuat tekan sampel uji mortar pada umur 3 hari	66
Tabel 4.18	Hasil pengujian kuat tekan sampel uji mortar pada umur 7 hari	66
Tabel 4.19	Hasil pengujian kuat tekan sampel uji mortar pada umur 28 hari	67

Tabel 4.20	Fraksi mineralogi C2S, C3S, dan C3A Pada Hidrasi 3 Hari	69
Tabel 4.21	Fraksi mineralogi C2S, C3S, dan C3A Pada Hidrasi 7 Hari	69
Tabel 4.22	Fraksi mineralogi C2S, C3S, dan C3A Pada Hidrasi 28 Hari	70
Tabel 4.23	Mineralogi hasil reaksi sampel uji semen dengan air pada umur 3 hari	74
Tabel 4.24	Mineralogi hasil reaksi sampel uji semen dengan air pada umur 7 hari	74
Tabel 4.25	Mineralogi hasil reaksi sampel uji semen dengan air umur 28 hari	75
Tabel 4.26	Mikrostruktur sampel uji umur pengujian 3 hari	77
Tabel 4.27	Mikrostruktur sampel uji umur pengujian 7 hari	77
Tabel 4.28	Mikrostruktur sampel uji umur pengujian 28 hari	77

DAFTAR GAMBAR

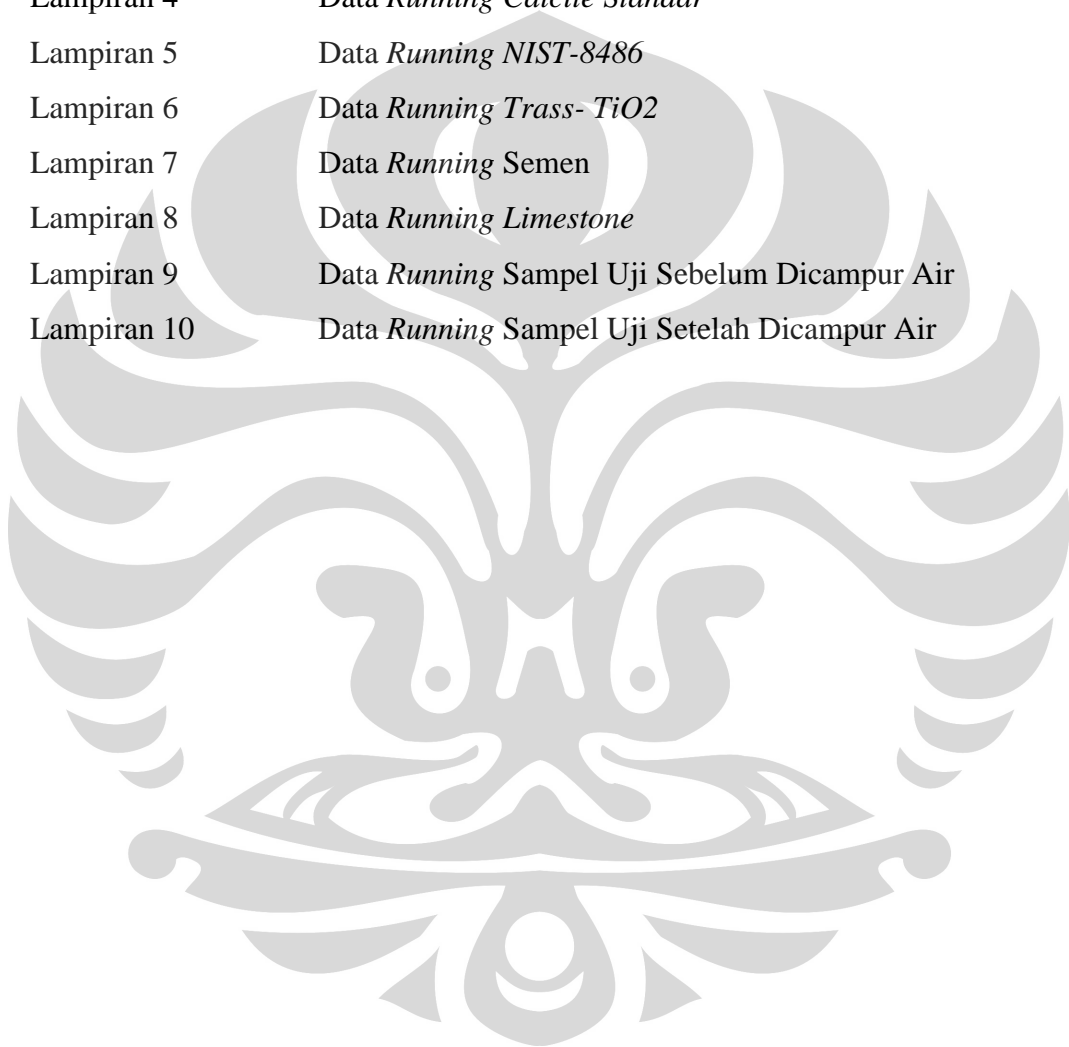
Gambar 2.1	Proses Pembuatan Semen	6
Gambar 2.2	Phase Reaksi dari <i>Raw Meal</i> menjadi <i>Clinker</i>	8
Gambar 2.3	Ukuran padatan dan pori-pori dari pasta semen	14
Gambar 2.4	Ukuran pori pada beton	15
Gambar 2.5	Perkembangan ideal porositas pada pasta semen ($w/c=0.60$)	16
Gambar 2.6	Pengaruh slag pada pori gel dan pori kapiler pasta ($w/c=0.5$)	17
Gambar 2.7	Komposisi dari larutan dalam pori pasta semen	17
Gambar 2.8	Zona Transisi antara pasta semen dan agregat	18
Gambar 2.9	Hubungan antara porositas kapiler dengan kuat tekan	19
Gambar 2.10	Hubungan w/c rasio, derajat hidrasi, & pori kapiler	20
Gambar 2.11	Hubungan w/c rasio dengan permeabilitas pasta	20
Gambar 2.12	Pengaruh humidity terhadap deformasi pasta semen	21
Gambar 2.13	Reaksi Hidrasi C_3S	22
Gambar 2.14	Reaksi Hidrasi dari C_2S	23
Gambar 2.15	Bentuk hasil hidrasi C_3A tanpa sulfat	24
Gambar 2.16	Reaksi hidrasi C_3A	24
Gambar 2.17	Konsentrasi produk hidrasi selama proses hidrasi	25
Gambar 2.18	Reaksi hidrasi blast furnace slag	27
Gambar 2.19	Struktur 1.4 nm tobermorite dan jennite dari phase CSH	29
Gambar 2.20	Gambar hidrasi C_3S dengan perbesaran yang berbeda	29
Gambar 2.21	Proses pengujian X-RF	34
Gambar 4.1	Distribusi ukuran butiran sampel uji	47
Gambar 4.2	Mikrostruktur sampel pasta semen blanko pada umur pengujian 3 hari	54
Gambar 4.3	Mikrostruktur sampel pasta semen blanko pada umur pengujian 7 hari	54

Gambar 4.4	Mikrostruktur sampel pasta semen blanko pada umur pengujian 28 hari	55
Gambar 4.5	Mikrostruktur sampel pasta semen 1 pada umur pengujian 3 hari	55
Gambar 4.6	Mikrostruktur sampel pasta semen 1 pada umur pengujian 7 hari	56
Gambar 4.7	Mikrostruktur sampel pasta semen 1 pada umur pengujian 28 hari	56
Gambar 4.8	Mikrostruktur sampel pasta semen 2 pada umur pengujian 3 hari	57
Gambar 4.9	Mikrostruktur sampel pasta semen 2 pada umur pengujian 7 hari	57
Gambar 4.10	Mikrostruktur sampel pasta semen 2 pada umur pengujian 28 hari	58
Gambar 4.11	Mikrostruktur sampel pasta semen 3 pada umur pengujian 3 hari	58
Gambar 4.12	Mikrostruktur sampel pasta semen 3 pada umur pengujian 7 hari	59
Gambar 4.13	Mikrostruktur sampel pasta semen 3 pada umur pengujian 28 hari	59
Gambar 4.14	Mikrostruktur sampel pasta semen 4 pada umur pengujian 3 hari	60
Gambar 4.15	Mikrostruktur sampel pasta semen 4 pada umur pengujian 7 hari	60
Gambar 4.16	Mikrostruktur sampel pasta semen 4 pada umur pengujian 28 hari	61
Gambar 4.17	Mikrostruktur sampel pasta semen 5 pada umur pengujian 3 hari	61
Gambar 4.18	Mikrostruktur sampel pasta semen 5 pada umur pengujian 7 hari	62

Gambar 4.19	Mikrostruktur sampel pasta semen 5 pada umur pengujian 28 hari	62
Gambar 4.20	Mikrostruktur sampel pasta semen 6 pada umur pengujian 3 hari	63
Gambar 4.21	Mikrostruktur sampel pasta semen 6 pada umur pengujian 7 hari	63
Gambar 4.22	Mikrostruktur sampel pasta semen 6 pada umur pengujian 28 hari	64
Gambar 4.23	Mikrostruktur sampel pasta semen 7 pada umur pengujian 3 hari	64
Gambar 4.24	Mikrostruktur sampel pasta semen 7 pada umur pengujian 7 hari	65
Gambar 4.25	Mikrostruktur sampel pasta semen 7 pada umur pengujian 28 hari	65
Gambar 4.26	Grafik hubungan variasi sampel dengan kuat tekan	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Foto Peralatan Alat Grinding
Lampiran 2	Foto Peralatan <i>Compressive Machine</i> dan X-RF
Lampiran 3	Foto Peralatan X-RD dan <i>Cube Mold</i>
Lampiran 4	Data <i>Running Calcite Standar</i>
Lampiran 5	Data <i>Running NIST-8486</i>
Lampiran 6	Data <i>Running Trass- TiO₂</i>
Lampiran 7	Data <i>Running Semen</i>
Lampiran 8	Data <i>Running Limestone</i>
Lampiran 9	Data <i>Running Sampel Uji Sebelum Dicampur Air</i>
Lampiran 10	Data <i>Running Sampel Uji Setelah Dicampur Air</i>



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Semen adalah suatu bahan yang mempunyai sifat *hydraulic binder*, yaitu sifat dimana bila bereaksi dengan air akan mengalami proses hidrasi membentuk senyawa baru yang bersifat sebagai perekat terhadap batuan. Senyawa baru tersebut sangat berpengaruh terhadap kekuatan mortar atau beton yaitu senyawa kalsium silikat hidrat yang merupakan hasil reaksi senyawa kalsium silikat dengan air.

Semen yang paling awal dan umum dibuat adalah jenis Semen Portland yang dihasilkan dari pembakaran bahan baku semen yang komponen utamanya adalah bahan yang memiliki kandungan kalsium karbonat dan bahan yang memiliki kandungan alumunium silikat. Kalsium karbonat ditemukan di alam sebagai *marble*, *chalk* dan *limestone* (Arnold, 1970). *Marble* memiliki kandungan kalsium karbonat bervariasi dari 40 – 75%, *chalk* memiliki kandungan 75 – 90% kalsium karbonat, sedangkan *limestone* memiliki kandungan 90 – 100% kalsium karbonat (Walter, 1985). Alumunium silikat dijumpai dalam bentuk kaolin group, montmorillonite group dan alkali bearing (Walter, 1985).

Seiring dengan aplikasi dalam lapangan yang makin berkembang, permintaan terhadap jenis semen yang sesuai dengan kondisi lingkungan meningkat pula. Hal ini mendorong dikembangkan jenis-jenis semen yang lain seperti semen tipe II untuk ketahanan sulfat sedang, semen tipe III untuk kuat tekan awal tinggi, semen tipe IV untuk panas hidrasi sedang, semen tipe V untuk ketahanan tinggi terhadap sulfat (ASTM C 150-04a, 2005). Berdasarkan bahan yang ditambahkan selain *clinker* dan *gypsum*, semen dapat dibagi menjadi CEM II (*Portland Composite Cement*), CEM III (*Blast Furnace cement*), CEM IV (*Pozzolanic Cement*) dan CEM V (*Composite Cement*) (DIN 1164-1, 1994).

Bahan yang ditambahkan pada *Portland Composite Cement* bisa berupa *Granulated Blast Furnace Slag* (GBFS), *Burnt Shale* (BS), *Pozzoland* baik *Natural* maupun *Natural Calcined*, *Limestone*, *Fly Ash*, dan *Silica Fume* (DIN 1164-1, 1994). Dasar pertimbangan material yang digunakan adalah pengaruhnya

terhadap mortar atau beton, seperti mempunyai kekuatan tekan yang cukup tinggi, kemudahan pengerjaan (*workability*) dan kekedapan (*durability*).

Pemakaian bahan tambahan sangat tergantung dari pengaruh posipit terhadap sifat semen dan ketersediaan bahan yang dekat dengan lokasi produksi. Beberapa penelitian lebih sering memakai *Fly Ash* (Wang & Victor, 2007), *Slag* (Yuksel & Genc, 2007), *Blast Furnace Slag* (Magallanes, Escalante & Gorokhovskiy, 2007; Hedge & Chelladurai, 2007; Deja, 2007). Penelitian yang berkembang senantiasa diarahkan hasil akhir kuat tekan, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor diantaranya jenis material yang ditambahkan, persentase penambahan material dan kecepatan reaksi hidrasi dari material. Penelitian yang berkaitan dengan Trass masih sangat terbuka karena masih relative jarang dilakukan (Vera, 2006), dan batasan persentase penambahan material sangat lebar yaitu antara 6 – 35% (DIN 1164-1, 1994).

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui mengenai pengaruh variasi penambahan Limestone dan Trass pada kehalusan 5000 cm²/gram terhadap kuat tekan semen. Disamping itu juga akan mempelajari perubahan mineralogi hasil reaksi antara semen dengan air terutama Kalsium Silikat Hidrat (*CSH*) akibat variasi penambahan Trass dan Limestone

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Untuk memfokuskan dalam penelitian ini, maka perlu pembatasan ruang lingkup penelitian, yang diatur sebagai berikut :

- a. Material yang dipakai untuk substitusi clinker hanya memakai Limestone dan Trass dengan persentase penambahan maksimum 21% (DIN1164-1, 1994).
- b. Kehalusan material Trass dan Limestone dibuat 5000 cm²/gram
- c. Pengujian kuat tekan sampel uji dilakukan pada umur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari
- d. Faktor air semen dibuat tetap (ASTM C 109/C109 M-02, 2005).

- e. Pengamatan secara mikroskopik senyawa CSH hanya dalam batasan kualitatif belum sampai tahap kuantitatif atau persentase senyawa CSH.

1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan untuk penelitian ini dengan menggunakan studi pustaka dan melakukan eksperimen. Pertimbangan menggunakan Trass dan Limestone sebagai bahan pengganti *clinker* adalah persediaan material yang melimpah dan dekat dengan lokasi pabrik, disamping komposisi material yang sesuai dengan komposisi semen.

Trass material yang mengandung unsur silika sejumlah 32,89% berat dan Limestone mengandung unsur kalsium sebesar 36,26% berat (Vera, 2006). Faktor lain yang menjadi pertimbangan adalah Trass termasuk material *pozzoland* yang dengan keberadaan air dan kapur akan terjadi rekasi hidrasi, sehingga terbentuk senyawa kalsium silikat hidrat (CSH).

Metode preparasi sampel dipilih metode penggilingan bersama-sama (*Co-Grinding*). Sampel Trass dan Limestone dengan persentase yang telah ditentukan digiling secara bersama-sama sampai mencapai kehalusan $5000 \text{ cm}^2/\text{gram}$, kemudian baru dicampur dengan semen OPC dengan variasi yang sudah ditentukan. Hasil yang diharapkan dari metode ini yaitu terjadinya homogenisasi yang lebih baik dari Trass dan Limestone sehingga reaktivitasnya meningkat. Nilai kehalusan sampel uji dicek dengan *blaine*.

Alat uji yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan XRF, XRD, dan SEM. XRF digunakan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur dalam material semen, Trass dan Limestone. Hasil Pengamatan X-RD diharapkan dapat mengamati struktur kristal pada masing masing material dan pada pasta semen pada masing-masing umur pengujian. Pengamatan dengan SEM diharapkan dapat melihat senyawa CSH pada umur pengujian tertentu.

1.5 Hipotesa Penelitian

Pada akhir dari penelitian ini , diharapkan atau diprediksi akan memperoleh hasil sebagai berikut :

- a. Variasi komposisi penambahan Trass dan Limestone mempunyai pengaruh pada kuat tekan semen.
- b. Terbentuknya mineral CSH ketika semen dengan variasi penambahan trass dan limestone bereaksi dengan air pada umur pengujian tertentu.



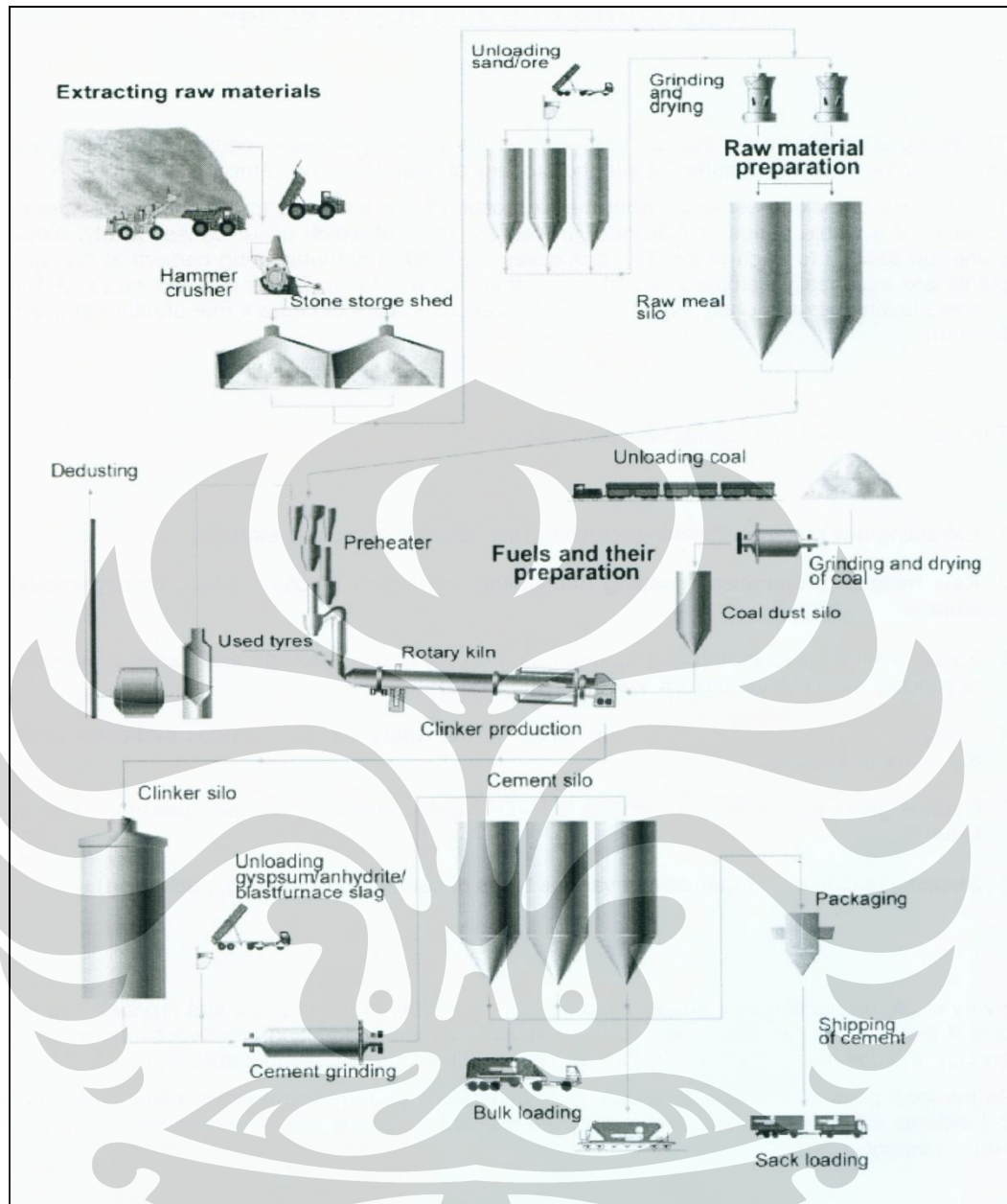
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pembuatan Semen

Proses pembuatan semen dimulai dari penambangan bahan atau material baku yaitu tanah liat (*clay*) dan batu kapur (*limestone*). Material ini kemudian dialirkan dengan alat transportasi *belt conveyor* ke tempat penyimpanan (*storage*). Setelah itu material tanah liat dan batu kapur mengalami proses penggilingan, pengeringan, dan pencampuran dengan proporsi tertentu menjadi *raw meal*. Pada proses pencampuran, kadang-kadang ditambahkan *iron ore*, *iron sand*, *iron slag* dengan tujuan untuk mencapai komposisi kimia *raw meal* yang diinginkan.

Proses selanjutnya *raw meal* mengalami proses pemanasan awal secara bertahap dari suhu 250 – 900⁰C. Pada suhu ini material batu kapur akan terurai menjadi CaO dan CO₂. Proses ini berlangsung pada *suspention preheater* sebelum mengalami proses pemanasan lebih lanjut pada tungku putar (*rotary kiln*). Material mengalami proses pemanasan secara bertahap dari suhu 900 – 1500⁰C sehingga sebagian material meleleh, dan terjadi reaksi unsur-unsur kalsium, besi, alumunium, dan silika. Setelah proses ini, material didinginkan secara mendadak sehingga menghasilkan terak yang dinamakan *clinker*. Proses selanjutnya *clinker* dialirkan ke tangki penyimpanan (*clinker Silo*).

Pada tahap proses akhir *clinker* dicampur dengan *gypsum* , kemudian mengalami proses penggilingan untuk menghasilkan *Ordinary Portland Cement* (OPC). Untuk menghasilkan semen komposit , pada tahap akhir ini, clinker ditambahkan dengan material substitusi seperti Trass dan Limestone disamping *gypsum*. Produk semen ini selanjutnya dialirkan ke silo semen, atau langsung dikemas di bagian pengepakan, dan dikirim ke konsumen dalam bentuk kantong atau curah. Diagram sederhana proses pembuatan semen dicantumkan di bawah ini (Dienemann, 2007).



Gambar 2.1 Proses Pembuatan Semen

2.2 Reaksi Pembentukan *Clinker*

Raw Meal (umpan baku) yang masuk dalam kiln berisi kalsium karbonat, sedikit magnesium karbonat, tanah liat, dan air. Reaksi yang terjadi selama proses pembakaran ini kalau disederhanakan sebagai berikut (Arnold, 1970):

- a. Penguapan air bebas
- b. Pelepasan air terikat pada tanah liat
- c. Peruraian magnesium karbonat

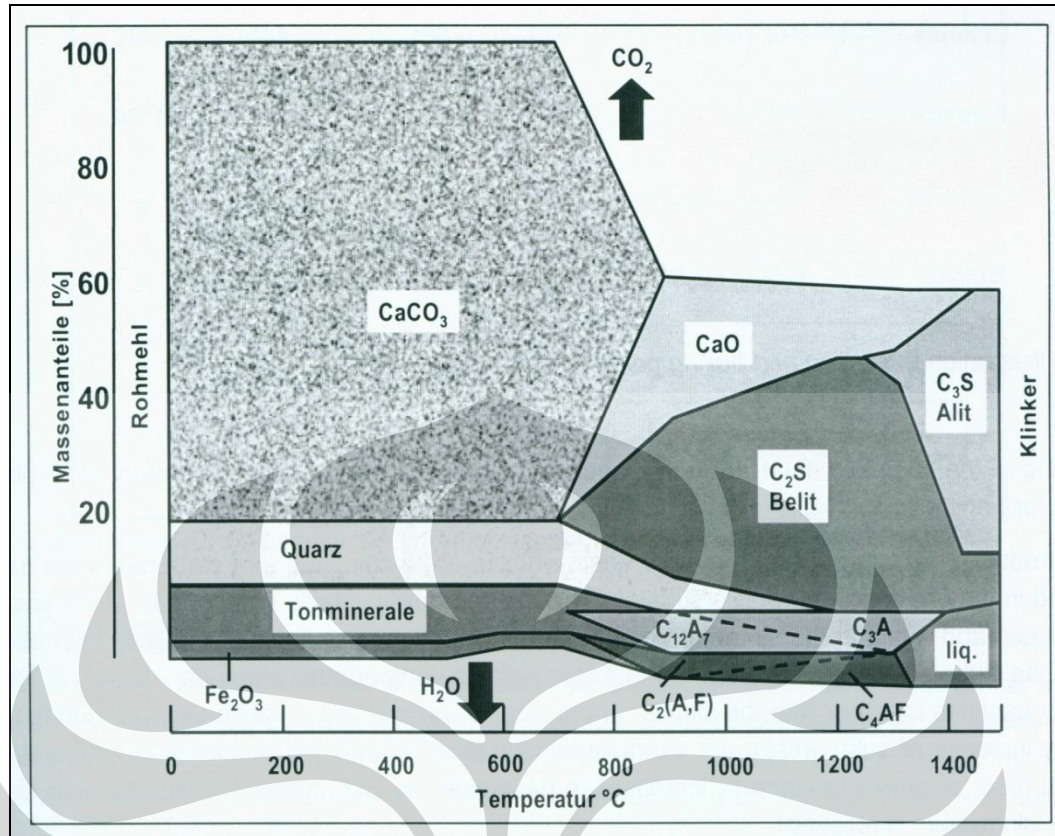
d. Peruraian kalsium karbonat

e. Reaksi kombinasi dari unsur-unsur yang ada di tanah liat dan batu kapur.

Penguapan air bebas terjadi pada suhu 100°C , tetapi pelepasan air terikat dari tanah liat terjadi di atas 500°C dimana reaksinya berlangsung secara endotermis. Tanah liat tersusun dari air terikat yang menyatu dengan senyawa silika dan senyawa aluminium yang bervariasi dengan perbandingan rasio $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ bergerak dari 2 : 1 sampai 4-5 : 1

Magnesium karbonat akan terurai pada suhu $600-700^{\circ}\text{C}$ tetapi bisa bervariasi dari sumber material yang digunakan. Peruraian kalsium karbonat ketika dipanaskan sendiri terjadi pada suhu 894°C . Reaksi pada tahap ini berlangsung secara endotermis.

Reaksi selanjutnya yaitu reaksi antara senyawa-senyawa oksida yang ada dalam unsur dalam tanah liat dan dalam batu kapur. Tahap reaksi ini dimulai dari pembentukan $\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$, dan $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$. Reaksi selanjutnya $12\text{CaO}.7\text{Al}_2\text{O}_3$ pada suhu $800 - 900^{\circ}\text{C}$. Pada suhu $900 - 1100^{\circ}\text{C}$ terjadi pembentukan senyawa $2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ yang sebagian terurai lagi. Pembentukan $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ mulai pada suhu ini, dan seluruh CaCO_3 akan terurai sehingga CaO bebas mencapai maksimum. Sebagian besar $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ terjadi pada suhu antara $1100 - 1200^{\circ}\text{C}$. Kandungan $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ mencapai kondisi maksimum. Suhu 1260°C mulai awal terbentuknya fase cair. Reaksi selanjutnya yaitu pada suhu $1200 - 1450^{\circ}\text{C}$ terjadilah pembentukan $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ yang secara cepat yang ditandai penurunan CaO bebas.



Gambar 2.2 Phase Reaksi dari *Raw Meal* menjadi *Clinker*

2.3 *Clinker Phase*

Clinker Semen Portland yang dihasilkan dari pembakaran batu kapur, alumina, bijih besi, silika material pada temperatur 1450⁰C. Secara umum ada 4 phase utama *clinker* sebagaimana yang terurai di bawah ini (Dieneman, 2007; Donald, 1986; Bye, 1983) :

- *Alite* (*Tricalcium silicate*, C_3S)
- *Belite* (*Dicalcium silicate*, C_2S)
- *Aluminate* (*Tricalcium aluminate*, C_3A)
- *Ferrite* (*Brownmillerite*, C_4AF)

Disamping itu ada *phase* sekunder *clinker* yang terbentuk karena adanya reaksi yang kurang sempurna dalam kiln yaitu *free lime* (CaO bebas), *Periclase* (MgO), dan alkali sulphat. Persentase keberadaan fase C_3S dalam *clinker* antara 50-70%, C_2S antara 4-25%, C_3A antara 1-13%, dan C_4AF antara 1-16%

a. *Alite* (C_3S – Density 3150 kg/m^3)

Alite biasanya tidak dalam bentuk senyawa murni, karena adanya penyisipan atau bergabungnya unsur-unsur lain yang berasal dari *raw meal* dan bahan bakar seperti Mg, Al, S atau Fe. Penyisipan unsur-unsur di atas mempunyai pengaruh terhadap kestabilan susunan kristal. Suhu pembentukan *alite* yaitu sekitar 1250°C . Jika pendinginan setelah phase ini terbentuk terlalu lambat, maka akan terurai menjadi C_2S dan CaO yang mana ion Fe^{2+} akan bergabung dalam susunan kristal. Struktur kristal *alite* dijumpai dalam bentuk *trigonal*, *monoclinic*, dan *triclinic*. Substitusi magnesium atau aluminium pada *alite* akan mengubah struktur kristal dari *triclinic pseudotrigonal* menjadi *monoclinic pseudotrigonal*.

b. *Belite* (C_2S – Density 3280 kg/m^3)

Belite (C_2S) dibentuk sebagai bentuk awal dari *alite* pada waktu proses pembakaran. Struktur mikroskopik dari *belite* menunjukkan kondisi yang dialami *clinker* ketika pembakaran dan pendinginan. Distribusi *belite* pada *clinker* sering menunjukkan kehalusan dan homogenitas dari *raw meal*. C_2S mempunyai 4 bentuk yang mana bentuk satu akan menjadi bentuk lainnya ketika proses pendinginan lambat. Bentuk itu bergerak dari α menjadi $\acute{\alpha}$ menjadi β menjadi γ . $\acute{\alpha}$ – *belite* terbentuk jika pendinginan berlangsung cepat. Struktur kristal *belite* dijumpai dalam bentuk bervariasi yaitu *trigonal*, *orthorombik*, dan *monolitik*.

c. *Aluminate* (Density 3030 kg/m^3) dan *Ferrite* (Density 3770 kg/m^3)

Phase *aluminate* dalam *clinker* mempunyai sifat sangat reaktif dan memiliki panas hidrasi yang terbesar. Kandungan *aluminate* sangat menentukan waktu pengikatan semen. Struktur kristal dari *aluminate* ini sering berbentuk kubik atau *orthorombik* dan sedikit dijumpai dalam bentuk *monoclinic*. Sifat lain dari *aluminate* ini yaitu tidak tahan terhadap serangan sulfat. Penyisipan unsur-unsur alkali pada matrik C_3A akan berpengaruh terhadap kereaktifan *aluminate*. Makin besar kandungan alkali dalam *aluminate* akan makin besar kereaktifannya. Senyawa *ferrite* dalam *clinker* berbentuk C_4AF – C_2AF . Penyisipan MgO akan merubah warna coklat menjadi abu-abu hijau. Keberadaan phase *ferrite* dalam *clinker* akan

mendorong pembentukan *alite* pada suhu yang lebih rendah. C_4AF sangat tidak reaktif dan daya dukung terhadap kuat tekan lemah.

d. *Free lime*

Free lime terbentuk dari pembakaran tidak sempurna pada *clinker*. Penyebab utama dari *free lime* yang tinggi karena preparasi yang kurang *raw meal* dan suhu pembakaran pada kiln yang kurang tinggi. *Free lime* mempunyai sifat sangat *hygroskopik*.

e. *Periclase*

Keberadaan *periclase* dalam *clinker* kelihatan jika kandungan MgO lebih besar 2% dari massa *clinker*. Kandungan MgO yang tinggi di *raw meal* karena penggunaan *dolomite lime* atau *clay* dapat meningkatkan pembentukan *periclase* dalam *clinker*.

f. *Sulphate Alkaly*

Sulphate alkaly yang berbentuk K_2SO_4 , Na_2SO_4 , atau $(CaSO_4)_2K_2SO_4$ dibentuk dari reaksi *volatile alkali* dari *raw meal* dengan sulfur dari bahan bakar (batubara atau gas). Pada area *kiln* yang paling rendah suhunya, *sulphate* akan berbentuk cair dan bergabung dengan *raw meal* yang dibakar.

2.4 Semen Portland Komposit

Semen Portland Komposit termasuk semen campuran, yang merupakan semen Portland yang sudah ditambahkan material yang lain. Penambahan material yang lain ini untuk memberikan sifat atau karakteristik tertentu yang tidak seperti semen Portland biasa. Material yang boleh ditambahkan pada semen Portland yaitu *granulated blast furnace slag*, *silika fume*, *pozzoland natural*, *pozzoland natural calcined*, *fly ash*, *burnt shale* dan *limestone*. Persentase penambahan material pada semen komposit untuk *portland composite cement* untuk tipe CEM II/A-M antara 6-20% dan untuk tipe CEM II/B-M antara 21-35% (Bertolini, Elsener, Pedferri, & Polder, 2004). Sifat dari material substitusi *clinker* adalah sebagai berikut :

a. *Blast Furnace Slag*

Granulated blast furnace slag adalah *Latent hydraulic material*. Material ini menunjukkan sifat pengikat setelah bercampur dengan air dalam waktu

yang panjang. Sifat pengerasan dari material ini bisa diperbaiki dengan cara aktivasi kalsium hidroksida atau sulfat. *Granulated blast furnace slag* dibuat dengan bijih besi di dalam *blast furnace*. Minimal dua per tiga dari *glassy slag* memiliki sifat *pozzolan* yaitu terjadi proses hidrasi ketika ditambahkan air.

a. *Silica Fume*

Silica fume adalah limbah dari proses pembuatan campuran *ferro-silicon*. Material ini terdiri dari butiran-butiran sangat halus dari silica amorphous. Rata-rata diameter butiran 100 kali lebih kecil daripada portland semen dan mempunyai luas spesifik 13000 – 30000 m²/kg dibanding 300- 400 m²/kg untuk Semen Portland. *Silica fume* menunjukkan sifat aktivitas *pozzolan* yang tinggi dan juga sangat efektif sebagai filler. Penambahan *silica fume* pada semen portland akan menurunkan porositas, *permeabilitas* dan meningkatkan kuat tekan. Dalam praktek sering ditambahkan material lain dalam rangka untuk mengatur *workability* dari mortar atau beton baru.

b. *Natural Pozzolan*

Natural pozzolan adalah material sedimentasi dari gunung berapi yang merupakan lapisan terpisah atau menyatu dengan komposisi kimia dan *mineralogy* yang sama dengan *pozzolan* pada umumnya. Aktivitas *pozzolan* material ini berhubungan dengan kandungan silika dan kehalusannya.

c. *Natural Calcined Pozzolan*

Natural calcined pozzolan merupakan material dari gunung berapi, *clay*, *shale* atau hasil sedimentasi bebatuan.

d. *Fly Ash*

Fly ash diperoleh dengan pemisahan debu secara elektrostatis atau mekanik dari residu hasil pembakaran batubara. Di dalam *fly ash* dijumpai sebagai *siliceous* dan *calcareous*. Dalam pemakaian *fly ash* yang dipakai tidak boleh memiliki *Loss on Ignition* (LOI) lebih dari 5%. *Fly ash* dengan LOI 5%-7% masih dapat diterima, asal partikelnya memenuhi *durability* terutama terhadap pembekuan dan sesuai dengan sebagaimana yang dipersyaratkan dalam regulasi mortar atau beton.

Siliceous fly ash berupa serbuk halus dan memiliki sifat *pozzolan*. Material ini terdiri dari silika oksida reaktif dan aluminium oksida. Proporsi dari kalsium oksida tidak kurang dari 10% berat, dan kandungan kalsium oksida bebas tidak boleh lebih dari 1% berat (EN 451-1). *Fly ash* yang mengandung CaO antara 1 – 2.5% berat masih diperkenankan dipakai dengan syarat hasil pengujian ekspansi tidak lebih dari 10 mm menurut EN 196-3, yang diperoleh dari campuran 30% *fly ash* dan 70% semen portland.

Calcareous fly ash berbentuk serbuk halus yang memiliki yang memiliki sifat hidraulik dan atau *pozzolanik*. Senyawa penyusun material ini terdiri dari kalsium oksida reaktif, silika oksida reaktif, dan aluminium oksida. Proporsi kalsium oksida reaktif tidak boleh kurang dari 10,0% berat. *Calcareous fly ash* mengandung 10-15% kalsium oksida reaktif dan tidak kurang 25% berat silika oksida reaktif.

e. *Burnt Shale*

Burnt shale dihasilkan melalui proses pembakaran dalam tanur pada suhu sekitar 800⁰C. Komponen penyusun utama material ini dikalsium silikat dan kalsium aluminat. Proporsi lain yang cukup besar adalah silika dioksida aktif, dan juga dijumpai dalam persentase yang kecil kalsium oksida bebas dan kalsium sulfat. *Burnt shale* dalam bentuk halus bersifat hidrolis seperti Semen Portland dan bersifat *pozzolan*. Kuat tekan yang dihasilkan pada umur 28 hari minimal 25,0 MPA ketika diuji dengan standar EN 196-1. Ekspansi *burnt shale* tidak boleh lebih dari 10 mm ketika diuji dengan standar EN 196-3 dengan menggunakan proporsi campuran 30% *burnt shale* dan 70% semen portland.

f. *Limestone*

Limestone yang dipakai sebagai material semen komposit harus memenuhi ketentuan : Kandungan CaCO₃ ≥ 75%, kandungan *clay* ≤ 1,20 gram/ 100 gram sampel ketika diuji dengan tes *methylene blue*, dan kandungan material organik ketika dites dengan EN 136-9 tidak boleh lebih 0.20%.

2.5 Sifat dari Pengerasan Pasta Semen

Bentuk struktur pengerasan semen dari hasil hidrasi umumnya dinyatakan sebagai pengerasan pasta semen. Sifat pengerasan pasta semen diuraikan di bawah ini.

2.5.1 Mikrostruktur dari Pengerasan Pasta Semen

Pengerasan pasta semen adalah bentuk campuran semen dan air yang mengeras yang bebas agregat. Pasta semen yang mengeras yang ditambahkan dengan agregat dibagi menjadi 2 kelompok yaitu mortar jika agregat yang ditambahkan berukuran < 4 mm, dan disebut beton jika ukuran agregat yang ditambahkan > 4 mm Struktur dari pasta semen yang mengeras secara prinsip dasar dapat dikelompokkan menjadi beberapa fase :

- Produk hidrasi yang meningkat karena reaksi kimia
- Rongga di antara phase-phase padat contohnya pori-pori diantara hasil hidrasi.
- Cairan yang seluruhnya atau sebagian mengisi struktur pori yang bisa pori-pori air atau larutan.
- Zona transisi yang terletak diantara pasta semen yang mengeras dan butiran agregat.

2.5.1.1 Hasil Hidrasi

Hasil utama hidrasi semen dari semen portland yang memiliki ukuran nano adalah kalsium silikat hidrat. Karena variasi komposisi yang sangat beragam kalsium silikat hidrat ini dikenal sebagai phase CSH. Segera setelah reaksi dimulai, kristal yang sangat halus ini membentuk jaringan secara simultan mengisi pori-pori yang ada. Proses ini menentukan kuat tekan dan permeabilitas dari pasta semen yang mengeras.

Hasil lain yang dihasilkan dari reaksi air dengan semen adalah kalsium aluminat hidrat, kalsium sulfoaluminat hidrat yang secara umum kurang berpengaruh terhadap kualitas pasta semen akhir, tetapi memberi pengaruh terhadap pembentukan *ettringite*. *Ettringite* ini memiliki peran pada proses *workability* dan *setting time* pada pasta semen.

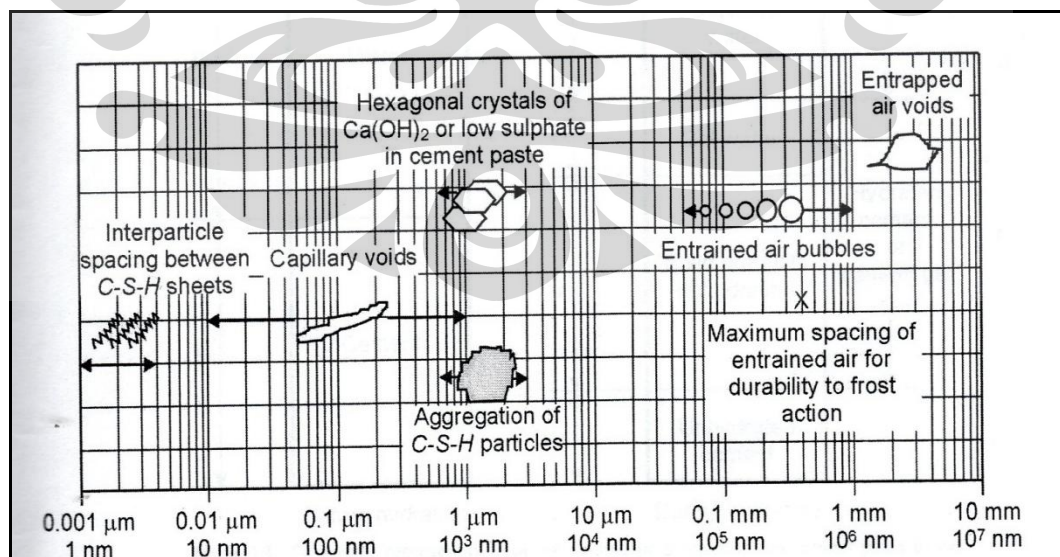
Selain produk CSH, reaksi semen dengan air juga menghasilkan produk kalsium hidroksida Ca(OH)_2 yang biasanya memiliki kristal berbentuk

heksagonal yang dikenal dengan *phase portlandite*. Walaupun *portlandite* tidak memberi dukungan terhadap perbaikan kuat tekan, tetapi memiliki peran yang sangat penting terhadap serangan korosi karena akan menaikkan PH alkalin sampai 13,5 dalam pori-pori phase cair.

Satu nilai penting yang menentukan kualitas mortar atau beton adalah rasio molekul CaO/SiO₂. Jika nilai rasio ini turun akan berpengaruh pada luas permukaan spesifik dari phase CSH yang meningkat. Hasil ini akan meningkatkan kapasitas CSH untuk menyerab difusi ion-ion sehingga meningkatkan proses hidrasi, Tetapi disisi yang lain akan berpengaruh terhadap durabilitas dari mortar atau beton yang menurun. Nilai CaO/SiO₂ memiliki batas antara 0,5 sampai 2.0 tergantung komposisi semen, water/semen rasio, derajat hidrasi, sumber material, dan metode pengukuran yang digunakan (Dienemann, 2007).

2.5.1.2 Struktur Pori

Adukan semen yang terbentuk dari reaksi-reaksi hidrasi selalu mengandung pori pori dengan ukuran yang berbeda. Ukuran pori tersebut bisa beragam dari 10⁻⁹m sampai 0,2 mm. Rentang ukuran unsur padat dan pori-pori pada pasta semen tercantum dalam gambar di bawah ini (Bertolini, Elsener, Pedefferri & Polder, 2004):

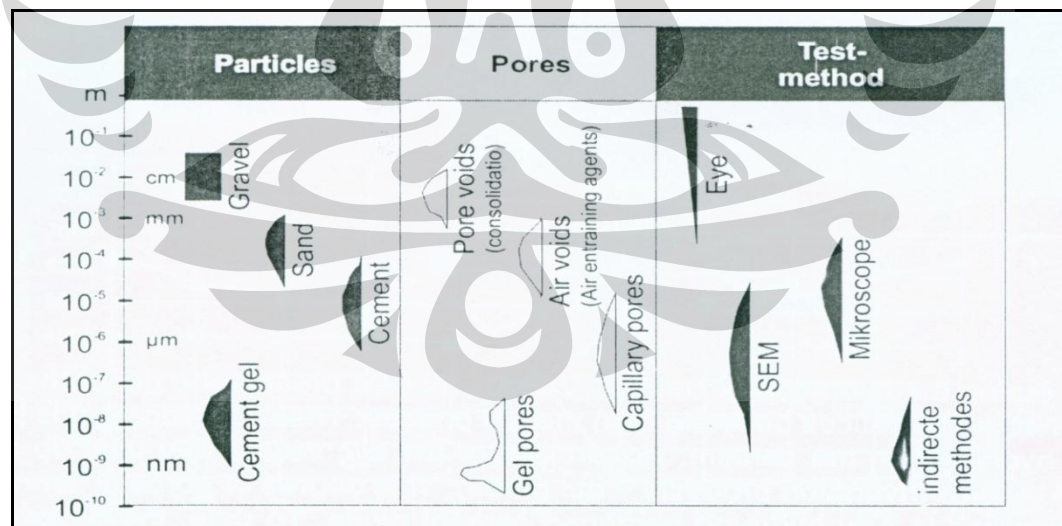


Gambar 2.3 Ukuran padatan dan pori-pori dari pasta semen

Secara umum jenis –jenis pori berdasarkan penyebabnya dapat dibagi :

- *Gel pores*
Pori terkecil yang secara otomatis terbentuk diantara hasil hidrasi semen atau lapisan diantara phase hidrasi semen. Proporsi pori ini akan meningkat sebanding dengan derajat hidrasi semen.
- *Capillary pores*
Ruang sisa yang ditinggalkan oleh air dan tidak terisi oleh hasil hidrasi
- *Compacting pores*
Pori yang dihasilkan dari proses pemadatan yang kurang sempurna
- *Cemical Shrinkage*
Hasil hidrasi perlu ruang yang lebih sedikit daripada volume yang ditempati air dan semen. Setelah reaksi hidrasi ada ruang kosong tersisa (*Shrinkage pores*). Bagian pori ini di beton proportional dengan derajat hidrasi. Tidak diketahui secara pasti berapa ukuran *Shrinkage pores*. *Shrinkage pores* sering dikelompokkan sebagai *capillary pores*, dan sering juga dikelompokkan sebagai *gel pores*.

Ukuran jenis-jenis pori yang ditemukan dibeton diuraikan gambar di bawah ini (Dienemann, 2007).



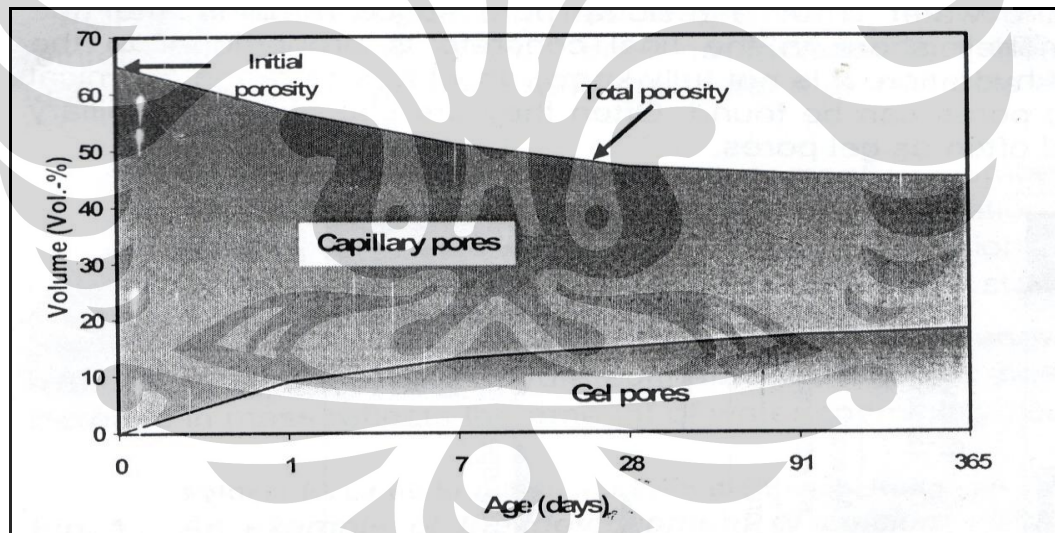
Gambar 2.4 Ukuran pori pada beton

Pada tahap atau phase awal semua ruang diisi oleh air , dan dinyatakan sebagai porositas awal . Volume air ini bisa menempati 65% dari volume total semen - air. Untuk *water/cement rasio* 0,38 – 0.40 pada mortar atau beton ,

secara teori tidak akan ada pori kapiler karena setelah reaksi hidrasi lengkap seluruh air akan terikat secara kimia di dalam hidrat. Tetapi alam prakteknya beton sering memakai *water/ cement rasio* lebih tinggi, yang secara otomatis akan menaikkan pori kapiler. Tujuan pemakaian ini untuk durabilitas yang lebih baik dan kelanjutan dari sistim kapiler.

Pori gel akan meningkat selama proses hidrasi semen. Variasi model pori gel menyatakan berukuran nano yang terletak diantara phase-phase gel. Dengan tanpa mempertimbangkan nilai *w/c*, volume pori gel diperkirakan mencapai 28% dari volume gel total (volume pori gel + volume hasil hidrasi). Porositas ini tidak dapat dicegah dan akan berlanjut sampai proses hidrasi pasta semen lengkap. Sampai saat ini, tidak ada pernyataan yang pasti berapa diameter dari pori gel, tetapi kebanyakan hasil penelitian menyatakan berukuran 5 – 30 nm.

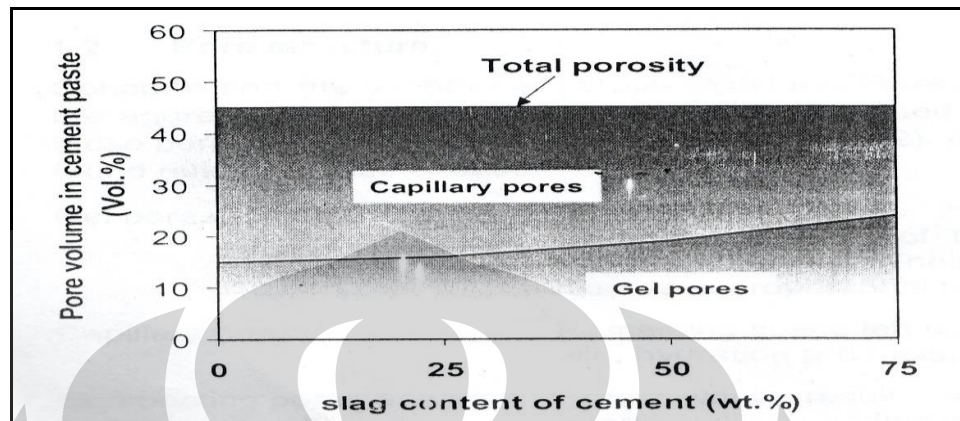
Bagaimanapun, komposisi dari *clinker* semen mempunyai pengaruh yang menentukan terhadap struktur dari sistim pori. Pertumbuhan pori sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.5 tergantung pada derajat hidrasi semen.



Gambar 2.5 Perkembangan ideal porositas pada pasta semen (*w/c* = 0.60)

Faktor lain yang sangat penting adalah tipe dari semen. Semen yang berisi *slag* atau *pozzolan* lebih besar penurunan pori kapiler dibanding dengan semen portland. Penyebabnya adalah terbentuknya phase CSH dan secara simultan mengurangi Ca(OH)_2 . Jumlah dari pori gel akan meningkat sebagaimana digambarkan dalam gambar 2.6. Hal ini tergantung curing yang cukup,

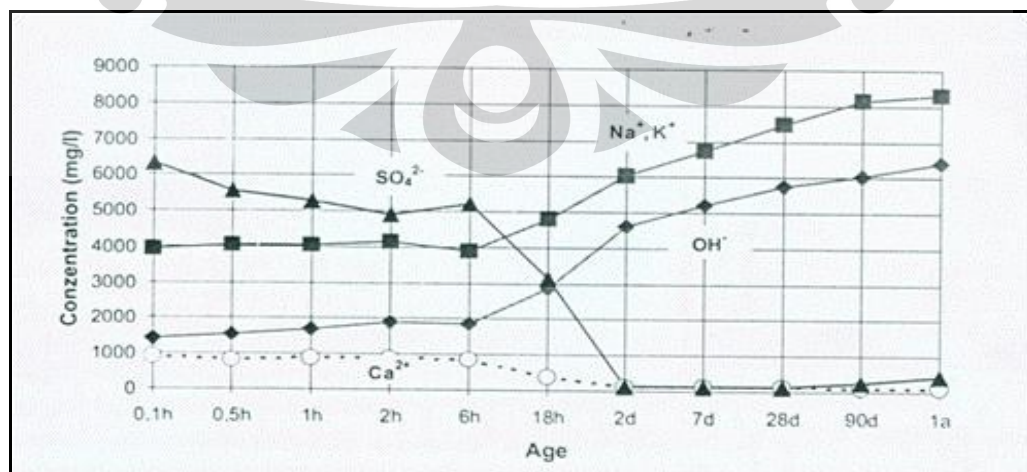
sebagaimana reaksi cuma terjadi ketika beton mencapai umur akhir, dan jika kondisi kelembaban tercapai.



Gambar 2.6 Pengaruh slag pada pori gel dan pori kapiler pasta (w/c = 0.5)

2.5.1.3 Pori Larutan

Larutan yang ditemukan dalam pori selama proses pengerasan pasta semen menyatakan kondisi tetap larutan, yang merupakan hasil phase padat yang berasal dari semen yang tidak bereaksi sebelumnya dan hasil hidrasi baru. Komposisi larutan mempunyai pengaruh yang besar pada reaksi (sebagai agent reaksi, sebagai zat terlarut, atau sebagai media untuk perjalanan sejumlah reaksi). Larutan ini juga mempunyai pengaruh pada sifat pengerasan pada beton. Pada awalnya phase cair ini terdiri dari larutan kalsium hidroksida dan sulphat. Konsentrasi larutan cuma mengalami sedikit perubahan pada 6 jam awal (gambar 2.7), dengan PH berkisar antara 12.7 – 12.9.

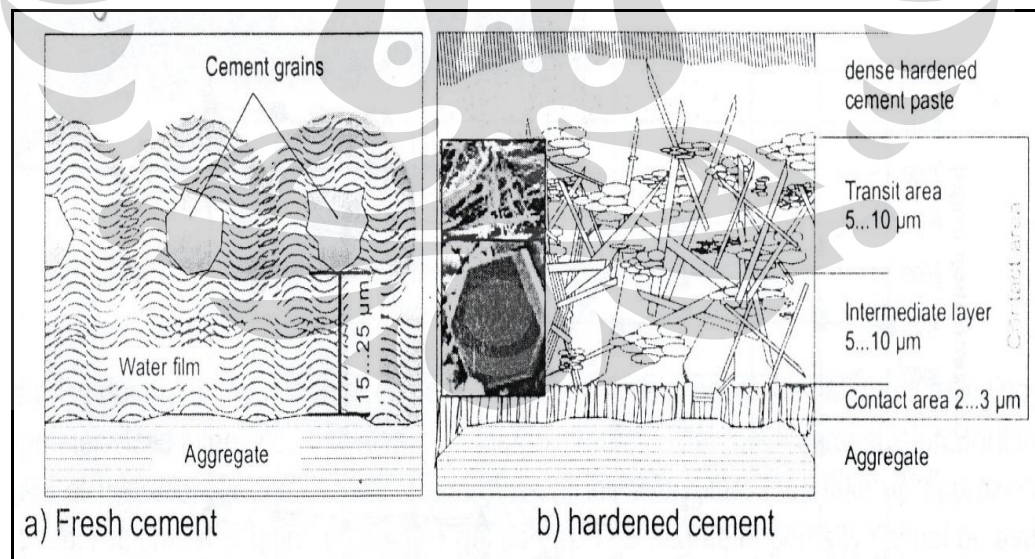


Gambar 2.7 Komposisi dari larutan dalam pori pasta semen

Pada tahap selanjutnya (6 jam-2 hari), ion sulphat dan kalsium akan tidak tampak, karena terikat pada reaksi hidrasi sebagai beton yang mengeras, cuma sebagian kecil saja yang tinggal. Kebalikannya ion alkali tetap berada dalam larutan sebagai hidroksida sehingga menaikkan PH larutan sampai diatas 13.

2.5.1.4 Zona Transisi diantara Pasta Semen dan Agregat

Ketika mencampur semen dengan air, partikel agregat diselimuti dengan lapisan air (gambar 2.8). Partikel semen akan didorong dari permukaan agregat ke luar. Ketebalan lapisan air ini diperkirakan 10 – 15 μm . Produk hasil hidrasi akan mengisi ruang diantara partikel semen yang terdekat dengan agregat. Ruang yang ditempati dua kali lebih besar dari jarak antara partikel semen. Disebabkan perbedaan konsentrasi selama proses pengerasan, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terlarut akan berpindah ke permukaan, kemudian menjadi padat dan keluar (muncul) dari larutan. Lapisan kontak yang rapat dengan ukuran 2-3 μm terbentuk langsung pada permukaan agregat yaitu Kristal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang tersusun secara vertical pada permukaan agregat. Padahal lapisan padat dari bentuk hasil hidrasi sekitar partikel semen, lapisan air yang menutupi partikel agregat menjadi berkisi-kisi dengan ukuran yang lebih besar.



Gambar 2.8 Zona Transisi antara pasta semen dan agregat

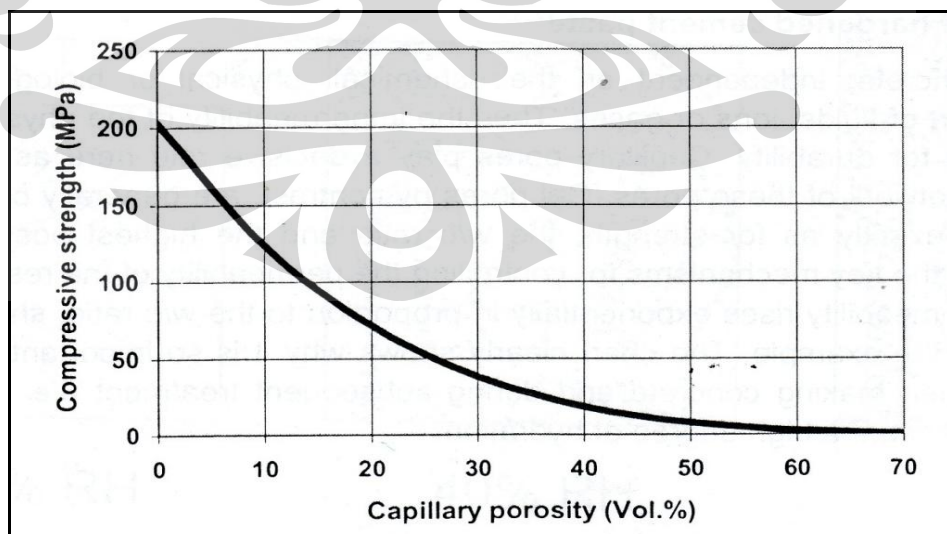
Bagaimanapun ruang yang ditinggalkan berukuran 5-10 μm , yang bergabung juga memiliki ketebalan lapisan yang serupa. Nilai penting dari zona

transisi di dalam beton untuk tujuan konstruksi diantara fungsinya adalah pengikat agregat dan pasta semen yang mengeras. Sebagai tambahan, porositas yang lebih tinggi pada zona ini akan membuat transport material lebih sesuai untuk cairan atau gas yang mana dapat mengurangi ketahanan beton. Pengalaman di lapangan menunjukkan penggunaan *slag* atau *pozzolan* dapat meningkatkan kedekatan dari zona kontak ini. *Silika fume* sebagian berpikir dapat meningkatkan kuat tekan secara *significant*, khususnya beton kuat tekan tinggi, dengan cara merubah sebagian besar kristal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam zona ini menjadi phase CSH tambahan.

2.5.2 Sifat dari Pasta Semen yang Mengeras

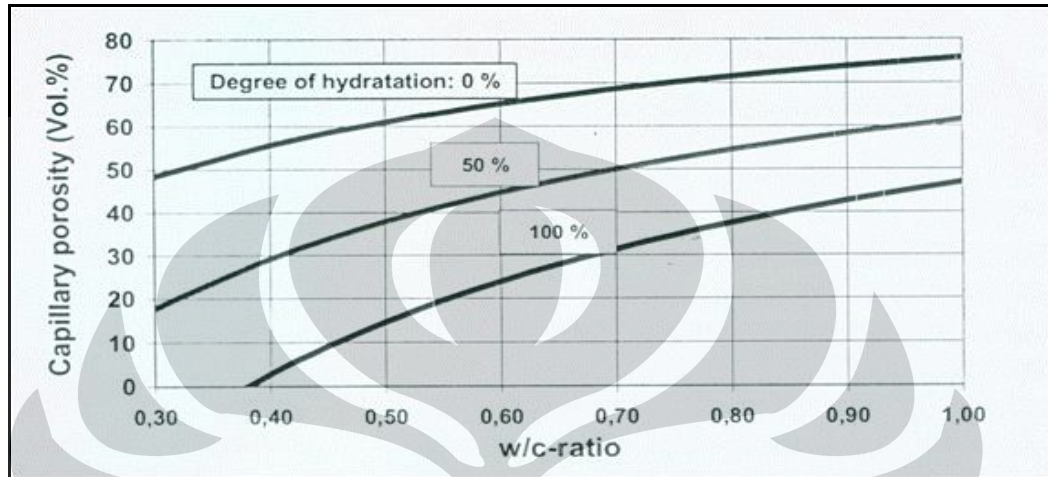
2.5.2.1 Kuat Tekan

Kuat tekan dari pasta semen adalah produk dari hasil jaringan phase hidrat yang mengisi ruang kosong. Makin banyak perkembangan jaringan ini, atau makin besar derajat hidrasi sehingga pori-pori terisi dengan hasil hidrasi, maka akan makin besar kekuatan dari pasta semen. Sebaliknya untuk memperkecil pori gel, pori kapiler berperan menentukan sebagai yang bertanggungjawab terhadap sifat mudah patah dari beton . Gambar 2.9 menunjukkan hubungan antara kuat tekan dan porositas kapiler.



Gambar 2.9 Hubungan antara porositas kapiler dengan kuat tekan

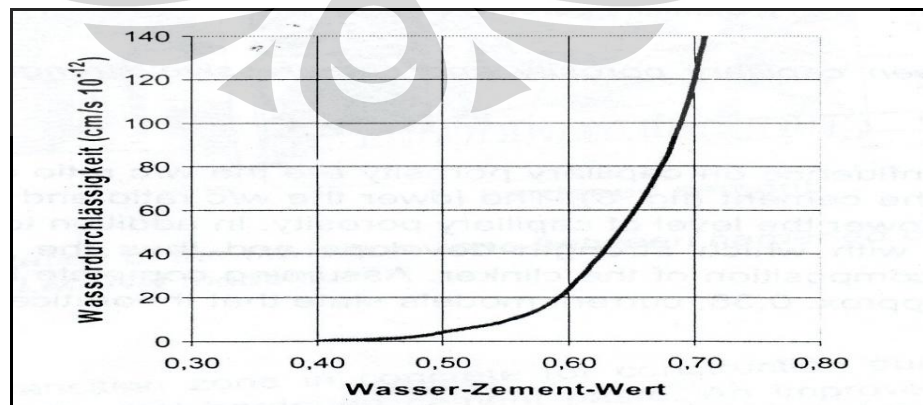
Faktor utama yang mempunyai pengaruh terhadap porositas adalah *W/C ratio* dari beton, derajat hidrasi dari semen (gambar 2.9). Makin rendah *w/c* rasio, dan makin lanjut tahapan hidrasi semen, makin rendah porositas kapiler. Sebagai tambahan untuk derajat kehalusan semen, kecepatan perkembangan kuat tekan, dan derajat hidrasi ditentukan komposisi mineral *clinker*.



Gambar 2.10 Hubungan *w/c* rasio, derajat hidrasi, & pori kapiler

2.5.2.2 Permeabilitas dari Pasta Semen

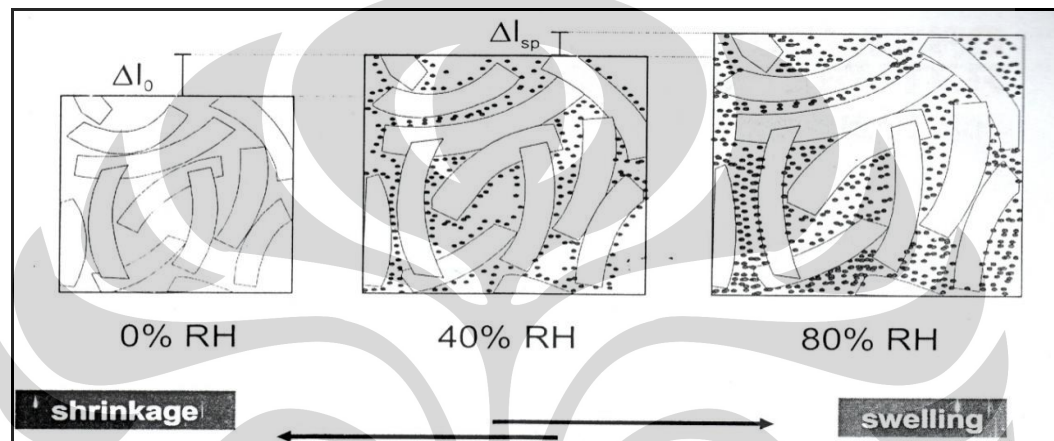
Permeabilitas dari struktur fisik adalah hal yang kritis dan penting untuk ketahanan beton. Pori kapiler memainkan peranan sebagai sarana transportasi utama melalui jaringan dari pori-pori ini. Sebaliknya gel pori dianggap berlaku kedap. Untuk kuat tekan, *w/c* rasio dan derajat hidrasi yang tinggi adalah mekanisme kunci untuk mengontrol permeabilitas dari hasil beton.



Gambar 2.11 Hubungan *w/c* rasio dengan permeabilitas pasta

2.5.2.3 Humiditas dari Pasta Semen

Kenaikan humiditas pada pasta semen akan menyebabkan air terserap pada permukaan partikel. Tegangan permukaan akan menjadi jenuh dan selanjutnya melemah karena lapisan air yang mengelilingi partikel menjadi lebih tebal. Sebagai konsekuensinya phase gel akan mengembang tetapi tanpa merubah komposisi pasta. Kejadian semacam ini dinamakan *swelling*. Kejadian sebaliknya pasta semen terlalu kering sehingga phase gel akan lebih mengumpul yang mengakibatkan pasta semen mengkerut.



Gambar 2.12 : Pengaruh *humidity* terhadap deformasi pasta semen

2.6 Hidrasi Semen

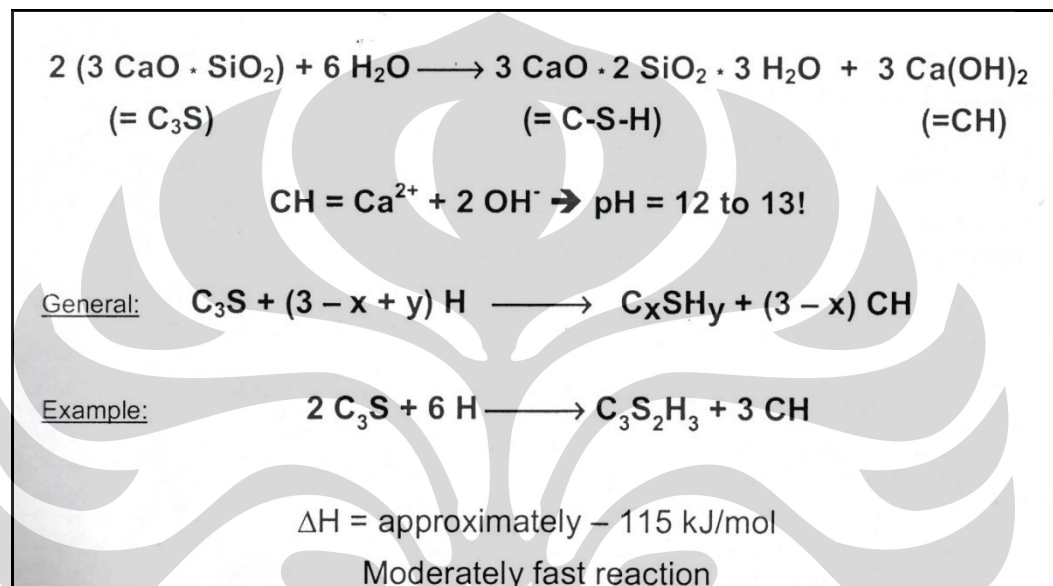
Sebelum melangkah ke proses hidrasi *phase clinker* dan semen, harus dipahami dulu proses saat semen kontak dengan air, untuk membantu membedakan proses yang hasilnya setting dari semen dan proses yang menyebabkan semen menjadi keras. Waktu setting dipahami sebagai dimana pasta semen, mortar atau beton kehilangan sifat kekenyalannya (*plastis*). Pada saat ini material belum menampakkan kekuatannya, atau tenaga atau energi yang diperlukan untuk merusak matrik masih minim. Setelah itu, proses setting berlanjut, kekuatan dan daya tahan material akan meningkat. Pengaruh perbedaan di atas sangat berkaitan erat dengan sifat kereaktifan jenis *phase clinker*.

2.6.1 Hidrasi dari *Phase Clinker*

Proses fisika dan kimia pada reaksi *phase clinker* dengan air, berkaitan dengan hidrasi, kecepatan dan pengembangan panasnya.

2.6.1.1 Reaksi dari Silikat

Reaksi dari kalsium silikat membentuk produk hidrasi yang berbeda yang berisi CaO, SiO₂, dan H₂O. Struktur stokiometri dapat berbeda-beda tergantung dari kondisi reaksi. Secara umum notasi phase CSH digunakan untuk produk hidrasi dari kalsium silikat. Formula ini bermaksud untuk menekankan bahwa hal tersebut bukan stokiometri senyawa. Persamaan umum dari C₃S dan satu contoh khusus dijabarkan pada gambar di bawah ini.

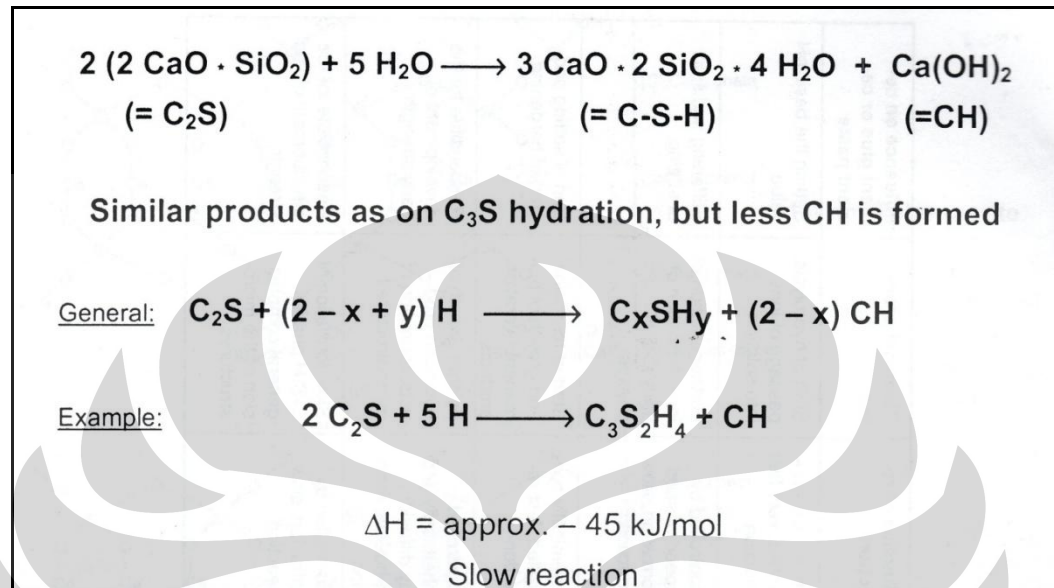


Gambar 2.13 : Reaksi Hidrasi C₃S

Produk lain reaksi ini, yang bertanggungjawab terhadap sifat semen adalah kalsium hidroksida Ca(OH)₂, yang dikenal dengan portlandite. Sebagian Ca(OH)₂ akan terurai menjadi Ca²⁺ dan OH⁻. Ion OH⁻ akan mengurangi konsentrasi ion H⁺ dalam campuran air, sehingga menaikkan PH dari larutan. Nilai PH yang tinggi ini, mendukung ketahanan baja dalam beton terhadap serangan korosi. PH yang tinggi dan keberadaan Ca(OH)₂ juga menjadi prasyarat penting untuk reaksi material *hidraulik* laten seperti *blast furnace slag*, dan *pozzolan* (*fly ash*, *trass*).

Reaksi yang diuraikan digambar, adalah merupakan reaksi *exothermis*. Dibandingkan dengan mineral *clinker* yang lain, kecepatan hidrasi C₃S tidak terlalu cepat, walaupun masih lebih cepat dibandingkan reaksi C₂S dengan air.

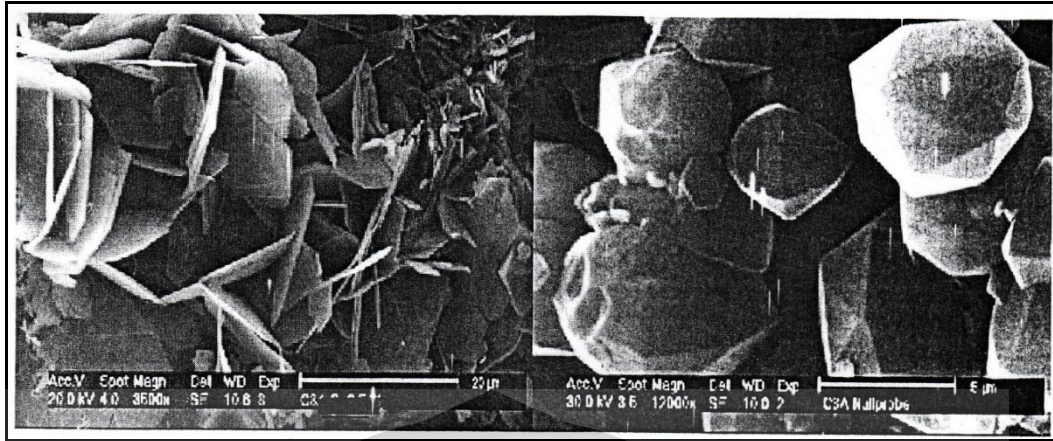
Reaksi dari C_2S dengan air diuraikan di dalam gambar 2.14. Reaksi C_2S ini sangat serupa dengan reaksi C_3S di atas. Produk utama hidrasi yaitu Phase CSH dan $Ca(OH)_2$. Bagaimanapun produk hidrasi ($Ca(OH)_2$) lebih sedikit karena C_2S mengandung CaO lebih sedikit daripada C_3S .



Gambar 2.14 : Reaksi Hidrasi dari C_2S

2.6.1.2 Reaksi dari Aluminat (C_3A) tanpa Sulphat

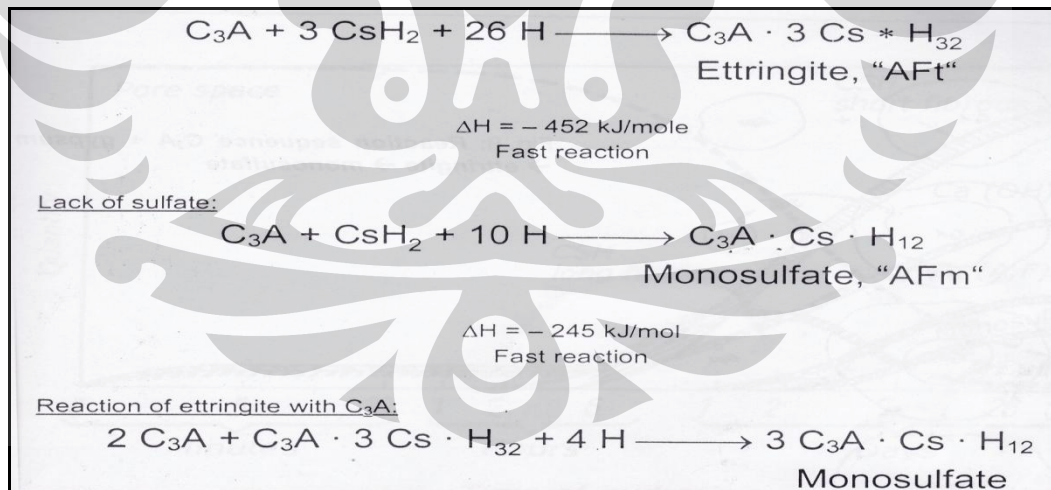
Reaksi ini merupakan reaksi cepat dengan air yang merupakan gambaran sifat dari trikalsium aluminat. Jika C_3A murni dicampur dengan air, secara spontan akan terjadi reaksi yang C_3A menjadi C_3AH_6 (lihat gambar 2.15). Phase hidrat C_4AH_{13} dan C_2AH_8 akan bisa diamati sebagai tahap sementara dari reaksi ini. Dengan bentuknya seperti plat tipis, phase ini sangat cepat untuk menggandeng air mengisi ruang kosong dengan bentuk yang serupa. Reaksi ini demikian cepat dikarenakan tanpa pengatur *setting* (*gypsum*), sehingga menyebabkan *setting* yang segera pada pasta semen. Dengan keberadaan kalsium hidroksida, phase kalsium aluminat hidrat (kaya kalsium) akan terbentuk.



Gambar 2.15 : Bentuk hasil hidrasi C₃A tanpa sulfat.

2.6.1.3 Reaksi dari Aluminat (C₃A) dengan Sulphat

Secara senyawa kalsium sulfat dinotasikan CaSO₄.n H₂O sebagai contoh gypsum (CaSO₄2H₂O). Dengan jumlah gypsum yang cukup, C₃A akan bereaksi dengan air dan *gypsum* untuk membentuk senyawa yang secara umum dinamakan *ettringite* (gambar : 2.16). Tiga *mole gypsum* diikat dengan 1 *mole ettringite*. Di dalam acuan senyawa *ettringite* sering dinyatakan sebagai *trisulfate* atau dalam literatur Inggris dinyatakan sebagai phase *Aft* (*aluminat ferrite trisulfate*).



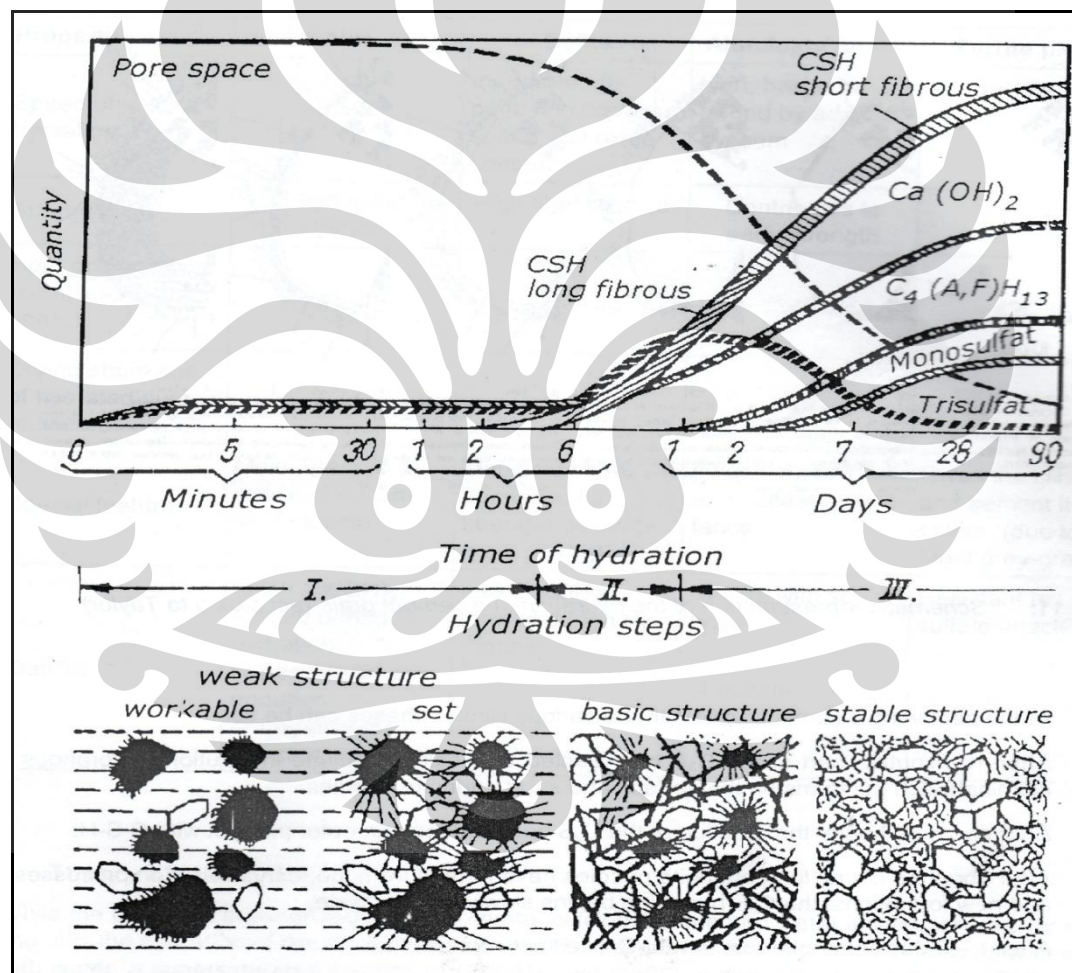
Gambar 2.16 : Reaksi hidrasi C₃A

Hasil reaksi utama akan membuat *passive* dengan cara membungkus butiran-butiran semen, sehingga memperpanjang periode setting yang menyebabkan material masih mudah dibentuk (*workable*). Passivasi ini tidak permanen dan permukaan akan ditembus oleh air dan ion sulfat dengan cara

difusi. Hasil reaksi ettringite dengan C_3A akan membentuk akan membentuk monosulfate atau AFm.

2.6.2 Tahapan Hidrasi Semen

Segera setelah bercampur dengan sejumlah kecil dari kalsium hidroksida dan ettringite dapat diamati sebagai hasil dari reaksi utama kalsium silikat dan phase aluminat (gambar 2.17) . Setelah sekitar satu sampai dua jam, phase CSH akan dapat diamati, kemudian phase ini akan meningkat secara kontinu. Sejalan dengan ini, konsentrasi kalsium hidroksida akan naik dan pori-pori akan berkurang.



Gambar 2.17 Konsentrasi produk hidrasi selama proses hidrasi

Konsentrasi *ettringite* akan mencapai puncak setelah beberapa jam, setelah itu konsentrasi akan menurun dan kuantitas dari monosulfat yang terbentuk akan naik. Hidrasi dari phase *ferrit* mulai terjadi dengan sangat lambat.

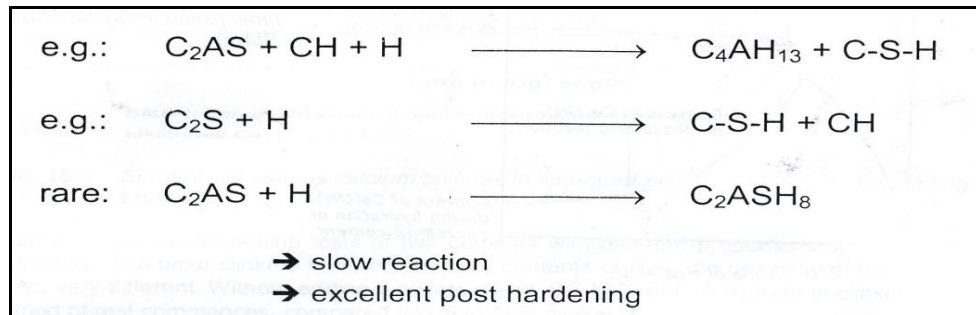
Perkembangan dari matrik dapat dijelaskan sebagaimana gambar 2.15. Pada awalnya butiran-butiran semen akan bebas bergerak. Ketika ukuran kristal hasil reaksi meningkat, material akan mengeras, dan pada akhirnya tercapai setting (material mulai tidak elastis). Uraian kejadian proses hidrasi semen adalah sebagai berikut :

- Pada awal pencampuran air dengan semen, butiran-butiran semen masih terlihat.
- Setelah 10 menit, sebagian C_3A telah bereaksi dengan kalsium sulfat dalam larutan. Bentuk gel kaya aluminat pada permukaan dan *ettringite* berbentuk jarum pendek mulai terlihat.
- Setelah 10 jam reaksi C_3S telah menghasilkan produk CSH
- Setelah 18 jam, jarum *ettringite* yang panjang telah terbentuk, dan hidrasi CSH mulai terjadi, yang dimulai dari sisi dalam.
- Setelah 1 – 3 hari , *ettringite* bereaksi dengan C_3A untuk membentuk monosulfat.
- Setelah sekitar 2 minggu, CSH sudah terbentuk cukup banyak pada sisi dalam butiran.

2.6.3 Hidrasi Semen yang Mengandung *Blast Furnace Slag*

Blast furnace slag mempunyai rasio CaO/SiO_2 yang lebih rendah dari *clinker* semen Portland. Idealnya komposisi dari *blast furnace slag* tidak dinyatakan dalam bentuk kristalin tetapi dalam bentuk amorphous. Strukturnya seperti kaca (*glassy*) yang diperoleh dengan pendinginan yang sangat cepat dari leburan *slag* ketika mengekstrak besi.

Dengan tambahan material yang sesuai , reaksi *hidraulik* dari *glassy blast furnace slag* dapat diaktifkan sehingga terbentuk phase hidrat yang mendukung kuat tekan. Material dapat memicu reaksi *hidraulik* dari *blast furnace slag* yaitu alkalin atau sulfat.



Gambar 2.18 : Reaksi hidrasi blast furnace slag

Reaksi awal dari kalsium silikat dari *clinker* akan menghasilkan $Ca(OH)_2$ yang kemudian terurai sehingga menghasilkan PH yang tinggi pada larutan. Ion Pottasium dan Sodium yang bercampur dalam larutan, akan menyebabkan Ph pada pori –pori larutan akan meningkat sampai di atas 13 dalam waktu yang relative singkat, Larutan yang basa ini akan bertindak sebagai katalis reaksi hidraulik yang akan menyerang struktur *glassy* dari butiran slag dan melarutkan material dari permukaan butiran. Komponen *glassy* yang terpisahkan (kalsium silikat dan kalsium aluminat) yang diperoleh akan bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ dari hidrasi *clinker* atau CaO.

Produk hidrasi yang dihasilkan sama sebagaimana hidrasi mineral *clinker* semen Portland. Kandungan CaO dalam semen yang diperkaya dengan *slag* akan dikurangi sebagai campuran SiO_2 dan Al_2O_3 . Lebih lanjut $Ca(OH)_2$ yang dilepaskan dari *slag* selama hidrasi kalsium silikat sebagian akan terikat kembali selama pembentukan produk hidrasi.

Kandungan $Ca(OH)_2$ yang rendah dalam hidrasi semen *blast furnace slag* dan kalsium silikat hidrat yang lebih rendah CaO , akan membuat beton lebih tahan terhadap serangan kimia daripada semen portland. Peningkatan proporsi slag akan mengurangi panas hidrasi, dan meningkatkan ketahanan terhadap sulfat. Bagaimanapun reaksi hidrasi dari slag sangat lambat, sehingga peningkatan kuat tekan secara umum lebih rendah daripada semen Portland.

2.6.4 Kinetika dari Hidrasi Semen

Phase utama *clinker* adalah C_3S , oleh karena itu hidrasi C_3S menjadi sangat penting. Gambar 2. Menunjukkan perubahan panas dari C_3S sepanjang

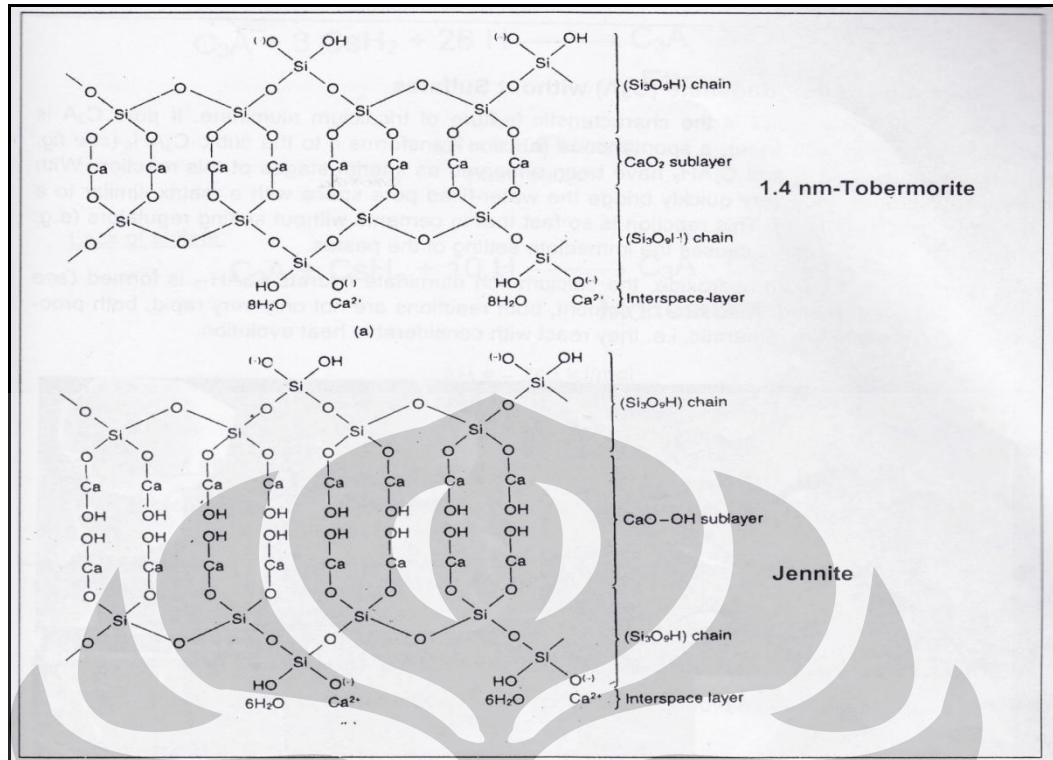
proses hidrasi semen. Dari perubahan panas, proses hidrasi dapat dibagi menjadi lima tahap. Tabel 1 menunjukkan perjalanan masing-masing tahap, serta mengandung informasi penting berkaitan dengan kinetika reaksi, proses kimia, serta pengaruhnya terhadap cairan semen atau pasta semen.

Tabel 2.1 Tahapan reaksi hidrasi phase C_3S

Period	Stadium	German term	Anglo-saxon term	Kinetics of reaction	Chemical process	Influence on cement glue or cement paste
Early	I	Start hydrolysis	Pre-induction period	chemically controlled, very fast reaction	Start of hydrolysis, passage of ions into solution	Setting the basic pH value
	II	Dormant Periode	Induction (dormant) period	controlled by speed of seed formation, slow reaction	Further solution of ions, formation of early C-S-H phases	Stiffening and start of setting
Middle	III	Accelerationsperiode	Acceleration (post-induction) period	chemically controlled, fast reaction	Start of formation and growth of permanent hydration products	End of setting and start of hardening
	IV	Decelerationsperiode	Deceleration period	controlled chemically and by diffusion, moderate reaction	Further growth of hydration products, formation of microstructures	Responsible for the development of early strength
Late	V	Steady period	Diffusion (steady state) period	controlled by diffusion, slow reaction	Slow formation of C-S-H phases, general compression of the microstructures	Responsible for the development of final strength

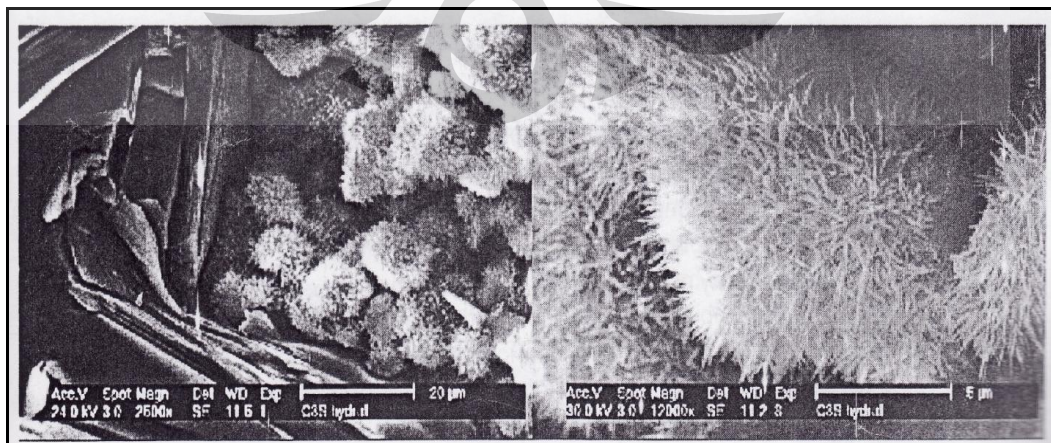
2.6.5 Phase CSH

Sebagaimana telah dijelaskan, hasil hidrasi tidak didefinisikan sebagai senyawa kimia, tetapi lebih kearah phase yang mana komposisi kimia bisa berfluktuasi dalam batas-batas tertentu. Mineral 1.4 nm tobermorite ($C_5S_6H_9$) dan jennite ($C_9S_6H_{11}$) dapat terlihat mengikuti batasan ini. Tergantung dari jumlah air yang terikat, jarak antar lapisan dari *tobermorite* adalah 1,4, 1.1 atau 0.9 nm. Struktur 1.4 nm *tobermorite* dan *jennite* dinyatakan dalam gambar 2. . Pada *tobermorite* dengan kandungan kalsium rendah, dua lapisan SiO_4 tetrahedron dihubungkan satu dengan yang lainnya dengan penghubung kalsium. *Jennite* mempunyai kandungan kalsium lebih tinggi, lapisan SiO_4 tetrahedron dipisahkan satu dengan yang lainnya dengan kelompok CaOH.



Gambar 2.19 Struktur 1.4 nm tobermorite dan jennite dari phase CSH

Kristal *Tobermorite* mempunyai bentuk seperti lempengan plat, dan *jennite* mempunyai bentuk seperti plat yang digulung dan dinyatakan sebagai bundelan fiber. Dua struktur yang berkembang ini tergantung pada suhu, jumlah air dan rasio dari CaO/SiO_2 . Jika rasio dibawah 1.5 CSH akan mengarah ke *tobermorite*, dan sebaliknya jika rasio diatas 1.5 akan mengarah ke *jennite*. Pembentukan *jennite* juga akan kelihatan ketika didukung oleh rasio w/c yang rendah dan suhu yang lebih tinggi.



Gambar 2.20 Gambar hidrasi C_3S dengan perbesaran yang berbeda

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sistematika Penelitian

Penelitian dilakukan di laboratorium ilmu material UI maupun di laboratorium QARD, PT Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk dengan menggunakan peralatan utama pengujian seperti : X-RF, X-RD, SEM, dan alat uji tekan (*Compressive Strength Machine*). Pada pengujian kuat tekan, mengacu pada standar internasional yaitu ASTM dan EN, Adapun alat bantu yang digunakan untuk mendukung penelitian ini diantaranya : Alat penggiling *ball mill*, alat penghalus butiran, alat pemadat atau pengepres untuk analisa X-RF atau X-RD, alat uji penyebaran butiran (*mastersizer machine*), cetakan kuat tekan, ayakan 16 mesh, oven, alat uji kehalusan semen (*blaine apparatus*). Tahapan-tahapan penelitian yang akan dilakukan dijabarkan sebagai berikut :

- a. Seleksi dan persiapan material
- b. Perencanaan design komposisi material dan pengujian
- c. Proses pembuatan sampel
- d. Proses pengujian sampel
- e. Proses pengolahan data hasil pengujian

3.1.1 Seleksi dan Persiapan Material

Pada tahap ini dilakukan proses pemilihan material yang terdiri dari semen OPC, Trass dan Limestone. Setelah proses tersebut , material, Trass, dan Limestone dipanaskan pada suhu 105⁰C dengan tujuan untuk menghilangkan kandungan air bebas. Sedangkan untuk semen OPC dipanaskan pada suhu 30⁰C – 40⁰C , untuk menghilangkan kandungan air permukaan. Perlakuan selanjutnya, masing-masing material ditempatkan pada plastik besar, kemudian disegel untuk menghindari penyerapan air lebih lanjut.

3.1.2 Perencanaan design komposisi material dan pengujian

Perencanaan komposisi material dibuat dengan sampel blanko dan sampel yang dibuat dengan variasi penambahan *Limestone* dan Trass. Tujuan perencanaan ini untuk melihat pengaruh variasi Trass dan *Limestone* jika dibandingkan dengan sampel blanko. Disamping itu, ingin melihat pengaruh penambahan *Limestone* terhadap reaksi hidrasi dari Trass sebagai material *pozzolan* pada kehalusan sampel semen tertentu. Fungsi *Limestone* disini untuk mempercepat reaksi Trass dengan air. Perancangan komposisi material dan pengujian disajikan tabel berikut :

Tabel 3.1 Komposisi material dan jumlah pengujian

No	Nama sampel	Komposisi material (%)			Jumlah pengujian			
		Semen OPC	Trass	Limestone	X-RF	X-RD	SEM	Kuat Tekan
1	Sampel OPC	100	0	0	3	8	3	15
2	Pasta – 1	79	21	0	0	8	3	15
3	Pasta – 2	79	17,5	3,5	0	8	3	15
4	Pasta – 3	79	14	7	0	8	3	15
5	Pasta – 4	79	10,5	10,5	0	8	3	15
6	Pasta – 5	79	7	14	0	8	3	15
7	Pasta – 6	79	3,5	17,5	0	8	3	15
8	Pasta – 7	79	0	21	0	8	3	15

Keterangan :

1. Jumlah pengujian X-RF untuk sampel blanko = 3 , diperoleh dari pengujian masing-masing material sebanyak 1 kali
2. Jumlah pengujian X-RD untuk sampel blanko = 8 , diperoleh dari pengujian sampel komposit sebelum dibuat pasta = 2 kali dan sampel blanko setelah menjadi pasta untuk umur pengujian 3 Hari, 7 hari, dan 28 hari masing-masing 2 kali
3. Jumlah pengujian SEM baik sampel blanko atau pasta = 3 , diperoleh dari pengujian 3 hari, 7 hari, dan 28 hari.
4. Jumlah pengujian kuat tekan baik sampel blanko atau pasta = 15 , diperoleh dari pengujian 3 hari, 7 hari, dan 28 hari yang masing-masing dilakukan 5 buah (kubus)

3.1.3 Proses Pembuatan Sampel Uji

a. Proses Penyiapan Sampel Uji

Tentukan berat trass dan limestone dengan komposisi seperti tabel, sehingga setelah digabung / dikomposit dengan semen OPC mempunyai berat total = 2.5 kg. Masukkan Trass dan Limestone dalam mesin grinding, atur waktu penggrindingan dengan waktu yang tertentu misal 2 menit. Ambil contoh sampel untuk dicek kehalusan dengan alat *blaine*. Jika kehalusan material komposit belum tercapai, lanjutkan penggrindingan dengan waktu yang tertentu sampai kehalusan tercapai. Langkah terakhir yaitu mencampur dan homogenisasi sampel Limestone, Trass dan semen OPC.

b. Proses Pembuatan Sampel Uji X-RF

Proses pembuatan sampel uji X-RF, dilakukan dengan menimbang sampel uji yang telah mengalami proses penyiapan sampel uji (proses a), kemudian dimasukkan dalam cetakan tertentu. Setelah itu sampel dipress dengan tekanan tertentu sehingga sampel menjadi padat dan rata.

c. Proses Pembuatan Sampel Uji X-RD

Sampel uji X-RD ini berbentuk pasta, kecuali sampel awal blanko yang belum dibuat pasta. Proses pembuatan pasta secara ringkas dilakukan sebagai berikut. Air ditimbang dengan berat tertentu kemudian dimasukkan kedalam mangkok yang sudah dipasang pada *mixer*. Kemudian *mixer* diputar dengan kecepatan dan waktu tertentu sesuai ketentuan ASTM (ASTM C305, 2005). Bersamaan dengan itu semen yang sudah ditimbang dengan berat 500 gram atau 650 gram dimasukkan ke dalam *mixer*. Setelah proses pengadukan sebagaimana ketentuan ASTM ini selesai, maka sampel perlu dicek konsistensi normalnya. Pasta dianggap telah memenuhi persyaratan konsistensi normal jika jarum berukuran diameter 1 cm mampu menembus pasta pada jarak 9-11 dengan waktu 30 detik (ASTM C187-04, 2005). Sampel yang sudah berbentuk pasta semen, kemudian dimasukkan dalam cetakan yang berbentuk ring.

Sampel uji dibiarkan pada cetakan dalam ruang lembab selama 1 hari,

kemudian cetakan dibuka dan sampel uji dikeluarkan dari cetakan, kemudian direndam dalam air yang mengandung kapur sampai umur pengujian yang diinginkan. Pada umur yang ditentukan, sampel uji diangkat dari bak perendaman, Langkah selanjutnya sampel uji direndam dalam aseton selama 24 jam. Tahap akhir, sampel uji dibersihkan dan dikeringkan, maka pasta semen ini siap untuk dianalisa dengan X-RD.

d. Proses Pembuatan Sampel Uji SEM

Sampel pasta yang sudah dicetak, direndam dalam acetone selama 24 jam, kemudian dibersihkan dan dikeringkan. Sampel ini kemudian diimpregnasi dalam resin, kemudian permukaannya dihaluskan dengan bubuk silikon karbida. Kemudian sampel dilapisi dengan diamond dan terakhir dilakukan etsa pada permukaan yang halus dengan reagen HF. Sampel ini selanjutnya dilakukan *coating* permukaannya dengan emas (Au) agar bersifat konduktor. Fungsi konduktor ini yaitu untuk mencegah terjadinya efek *charging* (electron yang keluar menumpuk pada spesimen tertentu sehingga menyebabkan warna yang sangat terang dan silau pada permukaan sampel).

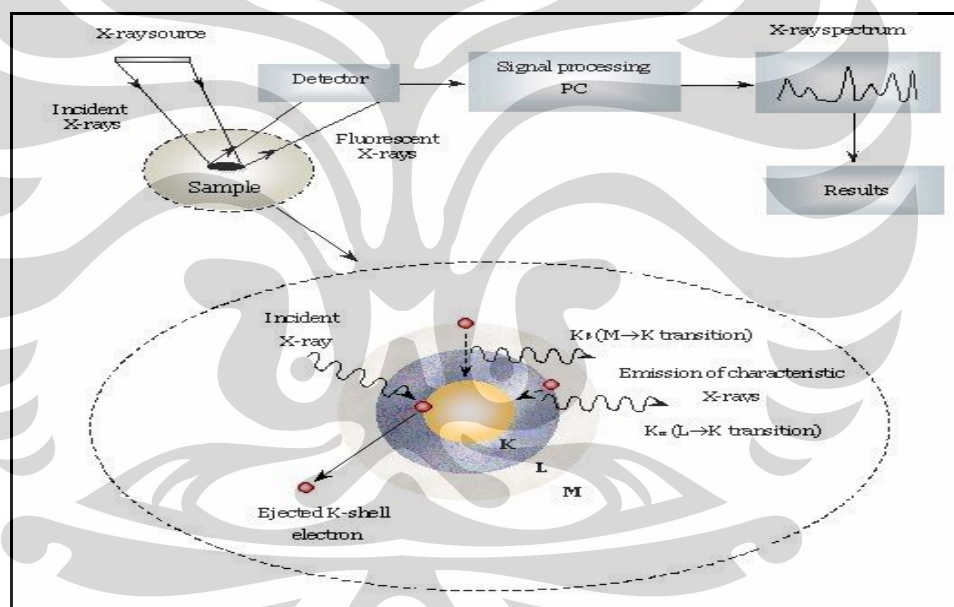
e. Proses Pembuatan Sampel Uji Kuat Tekan

Sampel uji untuk pengujian kuat tekan terdiri dari 1 bagian semen, 2,75 bagian berat pasir, dan 0,485 bagian air untuk jenis semen portland. Untuk semen portland komposit, biasanya air yang ditambahkan perlu dicek ulang setelah menjadi adonan mortar dengan *flow table*. Prinsip *flow table* adalah adonan mortar ditaruh dalam meja yang bisa digerakan keatas dan kebawah sebagai ketukan sebanyak 60 ketukan selama 30 menit. Penyebaran adonan mortar ini harus memenuhi ketentuan ASTM yaitu 110 ± 5 cm. Jika tidak memenuhi ketentuan ini, pembuatan sampel harus diulang sampai memenuhi ketentuan di atas. Setelah itu sampel dimasukkan dalam cetakan kubus berukuran 2" x 2" x 2", dengan 2 kali tahap pemasangan. Tiap tahap pemasangan sampel ditumbuk dengan alat tamper 32 tumbukan. Selesai tahap ini, sampel diratakan permukaannya dengan spatula, kemudian dimasukkan dalam ruang lembab selama 1 hari. Setelah satu hari sampel dibuka dari cetakan, kemudian direndam sampai umur pengujian tertentu (3 hari, 7 hari, 28 hari).

3.1.4 Proses Pengujian Sampel

a. Proses Pengujian Sampel dengan Alat X-RF

Sampel uji X-RF ditempatkan pada tempat sampel peralatan X-RF. Kemudian sampel ditembak dengan sinar X-Ray (sinar yang memiliki energi yang sangat besar yang dibangkitkan dari tabung X-Ray). Sinar yang dipendarkan dari contoh sampel uji kemudian ditangkap oleh detektor dan dinyatakan dalam bentuk intensitas. Intensitas ini kemudian dikonversikan dalam bentuk konsentrasi unsur atau atom. Nilai konsentrasi dari masing unsur dari sampel uji ini secara otomatis sudah ditampilkan pada layar monitor peralatan X-RF. Gambaran proses diatas bisa dilihat gambar di bawah ini.



Gambar 3.1 : proses pengujian X-RF

b. Proses Pengujian Sampel dengan Alat X-RD

Sampel uji X-RD ditempatkan pada tempat sampel peralatan X-RD, kemudian ditembak dengan sinar X-Ray. Intensitas sinar yang dipantulkan oleh sampel uji akan ditangkap oleh detektor yang bergerak mengitari sampel. Karena tiap kristal yang terkandung pada sampel uji memiliki pola difraksi sinar yang tertentu, maka jenis kristal atau phase

pada sampel uji tersebut dapat ditentukan. Nilai kuantitatif dari masing-masing phase diperoleh dengan membandingkan besar nilai intensitas dari masing-masing phase.

c. Proses Pengujian Sampel dengan SEM

Pengamatan sampel dengan mikroskop elektron membutuhkan beberapa persyaratan yang berkaitan dengan interaksi elektron dan materi agar dapat diperoleh informasi yang diinginkan. Persyaratan utama agar sampel dapat diamati adalah harus konduktif, sehingga sampel yang non konduktif atau konduktivitasnya rendah harus dibuat konduktif dengan cara melapis permukaan sampel dengan logam-logam berat atau karbon. Sampel uji diletakkan di atas *holder* dan dimasukkan dalam *chamber* yang dibuat vakum. Mikrostruktur pada sampel uji diamati dalam kondisi vakum. Gambar diambil pada perbesaran 1000 kali sampai 2000 kali.

3.1.5 Proses Pengolahan Data Hasil Pengujian

a. Proses Pengolahan Data Pengujian dengan X-RF

Data hasil pengujian X-RF bisa ditampilkan dengan ketepatan yang baik jika X-RF sudah dikalibrasi dengan material standar. Material standar ini bisa didapatkan dari pembelian yang berskala internasional seperti NIST, Australian Standar, BS, ASTM. Material standar juga bisa dibuat sendiri dengan cara homogenisasi yang baik, kemudian nilai masing-masing unsur ditentukan dengan analisa *gravimetri* atau *volumetric (wet method)*. Material yang sudah diketahui nilai konsentrasi dari masing-masing unsur ini kemudian dicek nilai intensitasnya dengan alat X-RF. Hasil nilai konsentrasi dan material standar ini, kemudian dibuat grafik kurva standar yang digunakan mengecek sampel uji semen.

b. Proses Pengolahan Data Pengujian dengan X-RD

Metode Kuantitatif yang dipakai pada penelitian kali ini menggunakan metode Topaz 2.0. Keuntungan dari pemakaian metoda ini, karena memang dirancang untuk pengujian semen dan data strukturnya

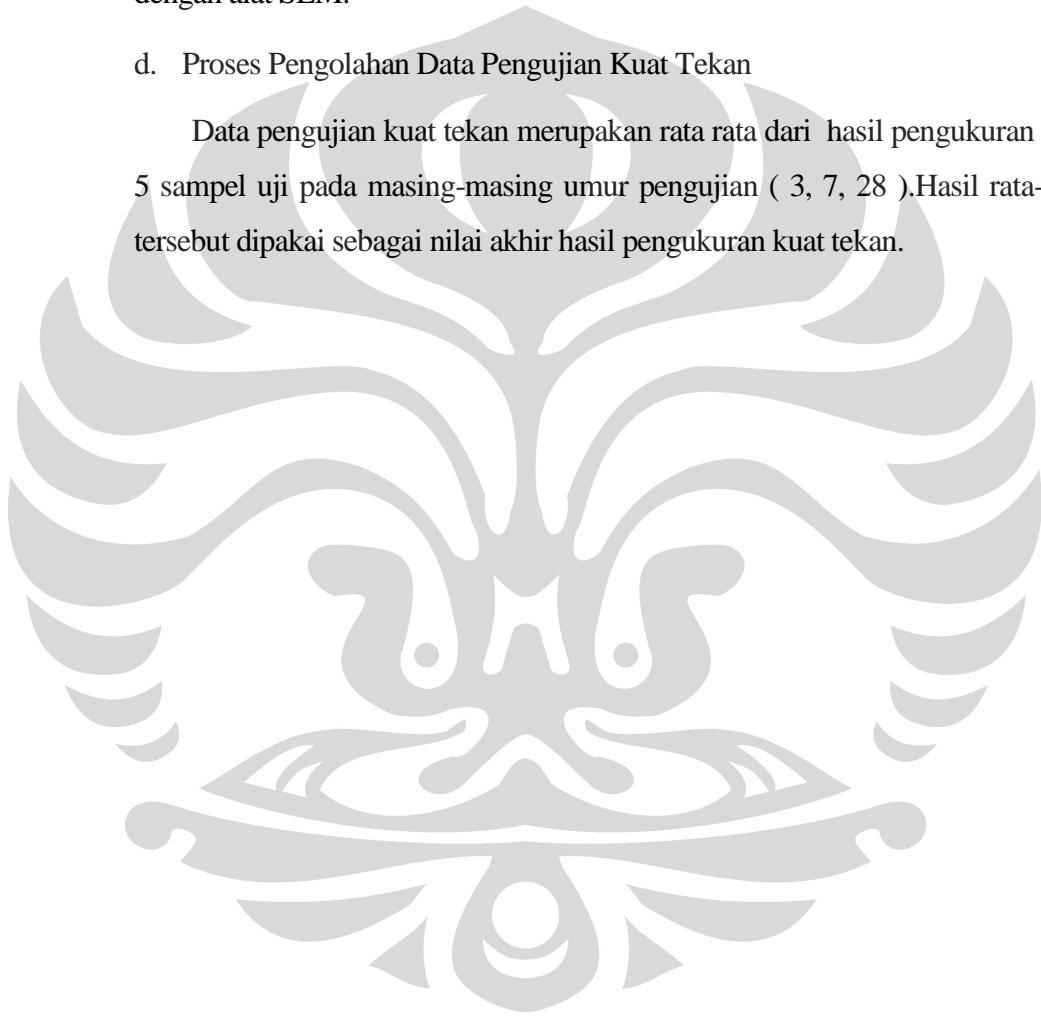
sudah ada. Disamping itu output dari persentase fasa-fasa yang diteliti sudah langsung bisa ditampilkan.

c. Proses Pengolahan Data Pengujian SEM

Pengolahan data mikrostruktur dengan SEM hanya dilakukan dengan membandingkan gambar yang diperoleh dari literatur atau jurnal-jurnal penelitian tentang mikrostruktur hidrasi semen dengan hasil pengamatan dengan alat SEM.

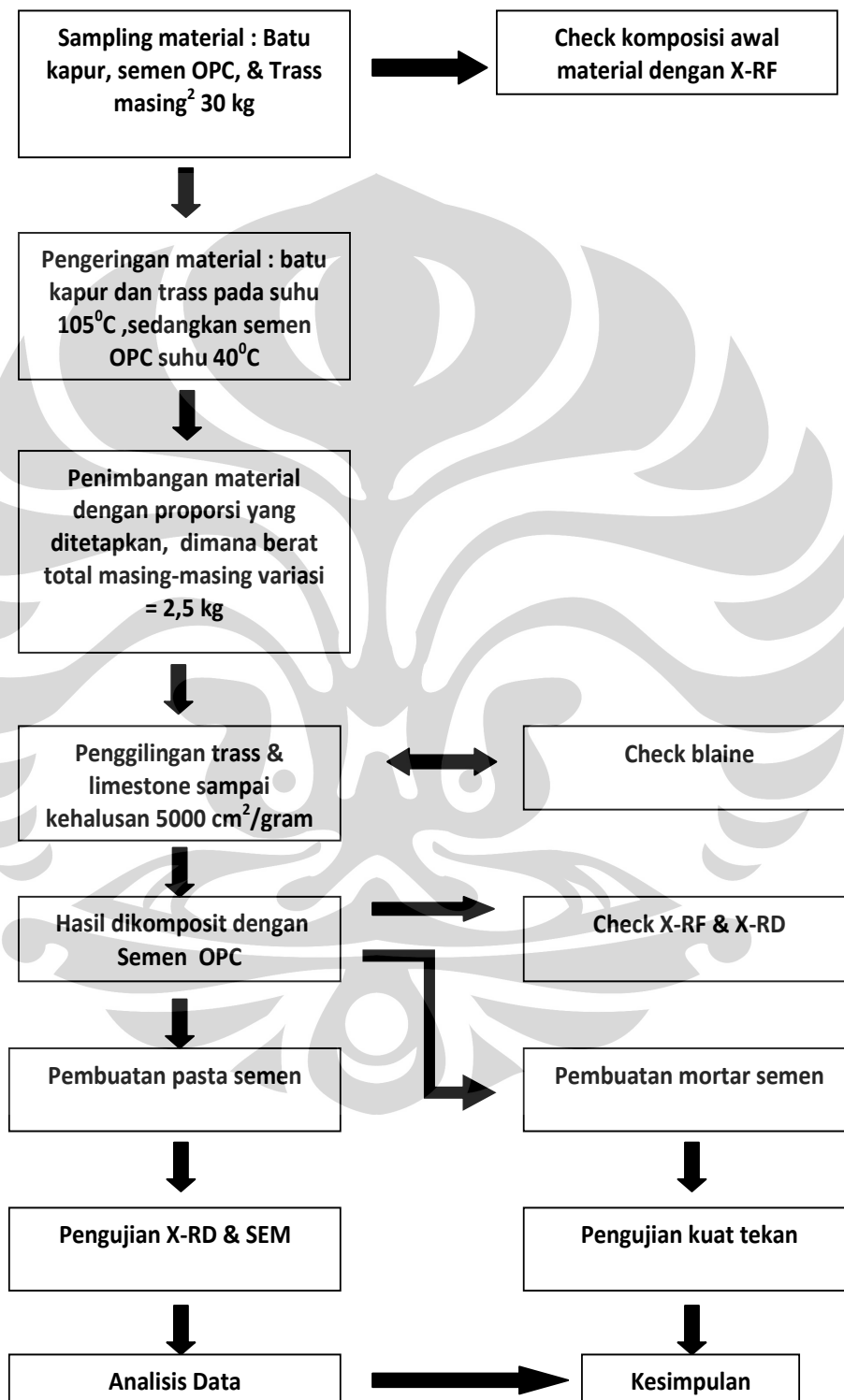
d. Proses Pengolahan Data Pengujian Kuat Tekan

Data pengujian kuat tekan merupakan rata rata dari hasil pengukuran dari 5 sampel uji pada masing-masing umur pengujian (3, 7, 28). Hasil rata-rata tersebut dipakai sebagai nilai akhir hasil pengukuran kuat tekan.



3.2 Diagram alir Penelitian

Dari gambaran proses diatas, dapat djelaskan dengan diagram alur penelitian berikut :



BAB IV

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Peralatan Uji

Validasi peralatan uji ini dilakukan dalam rangka untuk memastikan bahwa peralatan uji layak dioperasikan sehingga hasil uji bisa dipertanggungjawabkan. Secara umum metode validasi ini dapat menggunakan sampel standar uji yang sudah diketahui hasil ujinya atau dengan mengkalibrasi alat uji dengan menggunakan standar kalibrasi yang sudah diketahui nilai ujinya dan lebih tinggi nilai presisinya.

4.1.1 Validasi alat uji X-RF

Sebelum melakukan pengujian dengan alat X-RF, alat uji perlu dikalibrasi lebih dahulu dengan menggunakan sampel standar yang sudah diketahui komposisi kimianya. Masing-masing sampel standar ini kemudian disinari sinar X-ray untuk mendapatkan intensitas dari masing – masing elemen. Intensitas dari masing-masing elemen ini kemudian diplot dengan konsentrasi masing-masing elemen pada sampel standar. Kurva Intensitas dengan konsentrasi ini dijadikan dasar untuk pengujian sampel uji. Untuk pengujian rutin, validasi alat dilakukan dengan membandingkan hasil uji sampel standar dengan nilai hasil uji yang tertera pada sertifikat. Jika hasil uji dan nilai sertifikat masih dalam batasan yang diperkenankan maka alat uji X-RF layak dioperasikan untuk pengujian sampel uji. Jika terjadi penyimpangan maka perlu dikoreksi atau dilakukan kalibrasi ulang. Dibawah ini hasil validasi alat uji X-RF.

Tabel 4.1 Validasi X-RF dengan menggunakan standar NIST-1888 a

<i>SAMPLE NAME</i>	<i>SAMPLE KIND</i>	<i>LOI (%)</i>	<i>SiO₂ (%)</i>	<i>Al₂O₃ (%)</i>	<i>Fe₂O₃ (%)</i>	<i>CaO (%)</i>	<i>MgO (%)</i>	<i>SO₃ (%)</i>
NIST-1888 a	CHECK	1.75	21.19	4.24	3.08	63.23	2.99	2.17
NIST-1888 a	ACUAN	1.75	21.22	4.27	3.08	63.23	2.98	2.13
CHECK STD dgn			-0.03	-0.02	0.01	0.00	0.01	0.04
Perbedaan ASTM			0.20	0.20	0.10	0.30	0.20	0.10

4.1.2 Validasi alat uji X-RD

Untuk validasi alat X-RD dilakukan dengan menggunakan sampel standar. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan nilai yang tercantum dalam sertifikat.

4.1.2.1 Validasi X-RD dengan clinker standar NIST-8486.

Hasil pengujian clinker standar dengan X-RD tercantum di bawah ini .

Tabel 4.2 Validasi X-RD dengan menggunakan standar NIST-1888 a

Nama Sampel	Mineralogi Clinker (persen berat)							
	C3S	C2S	C3A	C4AF	Periclase	Lime	Arcanite	Alkaly Sulfate
Nilai Uji NIST-8486	58.33	22.01	1.73	13.40	3.21	0.00	0.73	-
Nilai Standar NIST- 8486	58.47	23.18	1.15	13.68	3.21	0.18	-	0.14
Beda Uji	0.14	1.17	0.58	0.28	0.00	0.18		
Perbedaan ASTM	1.65	1.95		0.63	0.72	0.14		

Secara umum hasil pengujian dengan nilai standar cukup dekat, kecuali nilai C3A yang memiliki beda 0.58. Perbedaan ini diperkirakan karena ada dua mineralogi yaitu *arcanite* dan *alkali sulfate*. Pada pengujian NIST – 8486 mampu mendeteksi unsur *arcanite* tetapi tidak mampu mendeteksi *alkaly sulfate*. Sebaliknya pada nilai standar NIST – 8486 mampu mendeteksi unsur *alkaly sulfate* tetapi tidak mencantumkan unsur *arcanite*. Perbedaan pemilihan dan keseragaman mineralogy suatu bahan inilah yang diperkirakan memberikan pengaruh C3A sebesar 0.58. Hasil kesalahan pengujian X-RD ini tercermin pada nilai Rwp pengujian sebesar : 5,32.

4.1.2.2 Validasi X-RD dengan *calcite* standar (CaCO_3 , Merck)

Hasil pengujian *calcite* standar dengan X-RD tercantum di bawah ini

Tabel 4.3 Validasi X-RD dengan menggunakan Limestone Standar

<i>Nama Sampel</i>	Mineralogi Limestone (persen berat)					
	<i>Quartz</i>	<i>Calcite</i>	<i>Lime</i>	<i>Dolomite</i>	<i>Periclase</i>	Lain-lain
Nilai uji <i>Calcium Carbonate</i>	0.01	98.50	0.03	1.26	0.20	-
Standar <i>Calcium Carbonate</i>		99				1
Beda Uji		0.5				

Secara umum hasil pengujian dengan nilai standar cukup dekat, dengan perbedaan *calcite* 0,50. Pada standar nilai mineralogy tidak dicantumkan secara rinci kecuali *calcite*, karena standar ini peruntukkannya secara umum untuk pengujian secara basah (*wet analysis*). Nilai Rwp pengujian ini sebesar 9.871.

4.1.2.3 Validasi X-RD Trass dengan TiO₂ anatase 30% berat

Hasil pengujian Trass dengan X-RD tercantum di bawah ini .

Tabel 4.4 Validasi X-RD dengan menggunakan Trass dan TiO₂ standar

Nama sampel	Mineralogi Trass (persen berat)											
	<i>Quartz</i>	<i>Sandrine</i>	<i>Albite</i>	<i>anatase</i>	<i>Anorthite</i>	<i>calcite</i>	<i>lime</i>	<i>crystalite</i>	<i>Dolomite</i>	<i>kaolinie</i>	<i>Labradorite</i>	<i>magnetite</i>
Nilai uji	1.78	1.69	6.54	30.11	12.02	1.39	0.26	1.08	0.54	33.89	10.70	0.00

Pada pengujian trass ini ditambahkan TiO₂ anatase dikarenakan tidak adanya sampel standar Trass. Nilai persen berat anatase yang ditambahkan ini yang digunakan sebagai parameter pengukuran X-RD sudah benar. Dari table di atas terlihat bahwa hasil mineralogi anatase sebesar 30.11% sedangkan yang ditambahkan sebesar 30%. Nilai rwp pengujian XRD sebesar : 5,924.

4.1.3 Validasi alat Mesin Kuat Tekan

Untuk validasi alat mesin kuat tekan dilakukan dengan *load cell* standar. Hasil kalibrasi ini kemudian dibandingkan dengan persyaratan ketepatan (*accuracy*) mesin kuat tekan sebagaimana yang tercantum dalam ASTM.

Tabel 4.5 : Validasi mesin kuat tekan dengan *load cell*

No	Beban : 0,1–1 KN		Beban : 1-10 KN		Beban : 1-30 KN		Beban 1-300 KN		Persyaratan ASTM C-109
	Nilai	% error accuracy	Nilai	% error accuracy	Nilai	% error accuracy	Nilai	% error accuracy	
1	0,1	-0,06	1	0,09	3	0,17	30	-0,06	< 1.0%
2	0,2	0,23	2	0,29	6	0,22	60	0,03	
3	0,3	0,16	3	0,37	9	0,25	90	0,08	
4	0,4	0,26	4	0,38	12	0,24	120	0,14	
5	0,5	0,23	5	0,39	15	0,20	150	0,18	
6	0,6	0,22	6	0,40	18	0,22	180	0,22	
7	0,7	0,24	7	0,41	21	0,20	210	0,27	
8	0,8	0,25	8	0,40	24	0,19	240	0,29	
9	0,9	0,26	9	0,40	27	0,16	270	0,32	
10	1,0	0,27	10	0,42	30	0,15	300	0,37	

Dari nilai sertifikat pengujian tersebut, mesin kuat tekan memenuhi persyaratan untuk pengujian kuat tekan. Hasil pengujian kuat tekan untuk umur 3- 28 hari berkisar antara 30 – 150 KN.

4.2 Hasil Pengujian sampel uji sebelum dibuat pasta semen

4.2.1 Hasil pengujian dengan X-RF

Ketika sampel uji disinari sinar X, maka hasil hamburan sinar ketika menabrak unsur dalam sampel akan diteruskan ke detector. Intensitas masing-masing unsur yang ditangkap detector ini masih dalam bentuk intensitas unsur sehingga untuk mendapat oksida unsur harus diplotkan pada kurva kalibrasi X-RF, kemudian dikalikan faktor berat molekul oksidanya/berat molekul unsur. Pada pengujian X-RF ini unsur-unsur yang mempunyai berat molekul ringan

tidak bisa terdeteksi dengan sinar X-RF sehingga total persentase total oksida unsur tidak mencapai 100%. Untuk itu perlu dinormalisasi sehingga berat total oksida unsur 100%. Hasil pengujian X-RF tercantum di bawah ini.

Tabel 4.6 Komposisi kimia sampel uji sebelum dibuat pasta

Hasil analisa X-RF setelah dinormalisasi sebelum dibuat pasta											
No	Komposisi	Hasil mineralogi sampel (persen berat)									
		Limestone	Trass	Blanko	sampel 1	sampel 2	sampel 3	sanpel 4	sampel 5	sampel 6	sampel 7
1	LOI	42.30	5.54	1.15	1.99	3.27	4.54	5.85	7.14	8.45	9.74
2	SiO ₂	0.99	63.75	21.11	30.55	27.77	24.96	22.10	19.27	16.49	13.75
3	Al ₂ O ₃	0.57	16.37	4.89	7.53	6.89	6.29	5.62	4.99	4.34	3.69
4	Fe ₂ O ₃	0.12	4.71	2.92	3.52	3.33	3.14	2.94	2.75	2.56	2.38
5	CaO	53.67	3.45	62.95	49.91	52.42	54.84	57.38	59.83	62.30	64.72
6	MgO	2.34	0.45	3.11	2.52	2.57	2.66	2.69	2.74	2.79	2.84
7	SO ₃		0.00	2.16	1.45	1.46	1.49	1.54	1.59	1.61	1.66
8	K ₂ O		2.24	0.65	0.95	0.87	0.79	0.71	0.63	0.54	0.46
9	Na ₂ O		2.87	0.20	0.73	0.64	0.55	0.46	0.37	0.27	0.16
10	TiO ₂		0.51	0.24	0.34	0.30	0.28	0.25	0.23	0.20	0.18
11	P ₂ O ₅		0.11	0.05	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08
12	SrO			0.30	0.29	0.31	0.32	0.34	0.36	0.38	0.39
13	Mn ₂ O ₃			0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
14	C ₂ O ₅			0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
15	ZnO			0.18	0.14	0.09	0.05	0.01	-0.03	-0.07	-0.11
Total		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

4.2.2 Hasil pengujian dengan X-RD

Mineralogi sampel 1 – sampel 7 adalah merupakan gabungan mineralogi yang ada pada semen blanko, Limestone dan Trass. Pada semen blanko dan Limestone sampel dibuat rangkap dua (*duplo*) untuk dianalisa dengan X-RD. Untuk sampel Trass tidak dilakukan pengujian X-RD lagi, tetapi mengambil data dari validasi X-RD dengan Trass, dimana hasil mineralogi trass harus dikalikan koreksi dengan faktor (100/70). Hasil pengujian semen blanko, Limestone dan Trass adalah sebagai berikut :

Tabel 4.7 Mineralogi semen , Limestone dan Trass

Mineralogi	Semen blanko (% Wt)			Limestone (% Wt)			Trass (% Wt)		
	Data 1	Data 2	Rata2	Data 1	Data 2	Rata2	Data 1	Data 2	Rata2
<i>Periclase</i>	0.55	0.55	0.55	0.22	0.16	0.19			
<i>Arcanite</i>	0.01	0.01	0.01						
<i>C2S alpha</i>	0.37	0.34	0.36						
<i>C2S beta</i>	18.55	18.94	18.75						
<i>C3A Na Cub</i>	5.52	5.49	5.51						
<i>C3A Na Orth.</i>	2.59	2.59	2.59						
<i>C3S Monoclinic</i>	56.58	56.26	56.43						
<i>C4AF Trans</i>	11.51	11.50	11.50						
<i>Gypsum</i>	3.82	3.82	3.82						
<i>Lime (CaO)</i>	0.50	0.49	0.50	0.30	0.57	0.44			
<i>Quartz</i>				0.06	0.11	0.09	2.53	2.54	2.54
<i>Sanidine Na 0.1</i>							2.40	2.40	2.40
<i>Albite</i>							9.24	9.34	9.29
<i>Anorthite</i>							17.20	17.17	17.18
<i>Calcite</i>				90.50	90.10	90.30	2.00	1.99	2.00
<i>Cristobalite</i>							1.60	1.54	1.57
<i>Dolomite</i>				8.92	9.06	8.99	0.80	0.77	0.78
<i>Kaolinite</i>							48.52	48.42	48.47
<i>Labradorite</i>							15.31	15.29	15.30
<i>Magnetite</i>							0.00	0.00	0.00
<i>Rwp</i>	8.47	6.73		7.99	9.37		5.44	5.92	

Mineralogi pada tabel diatas dijadikan acuan untuk membuat sampel uji yang merupakan variasi campuran limestone, trass, dan semen . Pada sampel uji juga dibuat *duplo* dalam rangka untuk mendapatkan hasil yang lebih tepat. Hasil Uji X-RD tercantum di bawah ini.

Tabel 4.8 Mineralogi Sampel uji sebelum dicampur dengan air

No	Nama Kristal	Mineralogi Sampel Uji sebelum dicampur dengan air (persen berat)											
		P1-b	P1-c	Rata2	P2-b	P2-c	Rata2	P3-b	P3-c	Rata2	P4-b	P4-c	Rata2
1	Albite	1.93	1.95	1.94	1.64	1.64	1.64	1.31	1.34	1.33	0.98	0.98	0.98
2	Anorthite	3.60	3.67	3.64	2.93	2.94	2.94	2.40	1.86	2.13	1.80	1.82	1.81
3	Archanite	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	C2S alpha	0.27	0.28	0.28	0.27	0.24	0.26	0.30	0.28	0.29	0.29	0.28	0.29
5	C2S beta	15.75	14.76	15.26	14.86	15.12	14.99	14.79	14.67	14.73	14.81	14.83	14.82
6	C3A Na-Cubic	4.30	4.37	4.34	4.24	4.22	4.23	4.38	4.40	4.39	4.38	4.35	4.37
7	C3A Na-Orth.	2.05	2.05	2.05	1.99	2.01	2.00	2.06	2.07	2.07	2.06	2.06	2.06
8	C3S monoclinic	44.08	44.80	44.44	44.83	44.78	44.81	44.54	44.83	44.69	44.52	44.50	44.51
9	C4AF	9.00	8.57	8.79	9.22	9.15	9.19	9.09	9.15	9.12	9.08	9.09	9.09
10	Calcite	0.41	0.43	0.42	3.42	3.41	3.42	6.62	6.66	6.64	9.69	9.67	9.68
11	Cristobalite low	0.33	0.34	0.34	0.27	0.24	0.26	0.22	0.22	0.22	0.17	0.17	0.17
12	Dolomite	0.16	0.18	0.17	0.44	0.43	0.44	0.74	0.73	0.74	1.03	1.02	1.03
13	Gypsum	3.01	3.05	3.03	2.97	2.93	2.95	3.07	3.10	3.09	3.04	3.04	3.04
14	Kaolinite	9.98	10.33	10.16	8.55	8.52	8.54	6.74	6.79	6.77	5.09	5.09	5.09
15	Labradorite	3.20	3.25	3.23	2.61	2.61	2.61	2.14	2.15	2.15	1.61	1.62	1.62
16	Lime	0.46	0.47	0.47	0.48	0.48	0.48	0.47	0.48	0.48	0.47	0.49	0.48
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.42	0.43	0.43	0.43	0.42	0.43	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.44
19	Quartz	0.53	0.54	0.54	0.44	0.44	0.44	0.35	0.36	0.36	0.28	0.23	0.26
20	Sanidine	0.50	0.50	0.50	0.40	0.39	0.40	0.33	0.47	0.40	0.25	0.25	0.25
	Rwp	6.36	6.31		6.63	7.02		6.23	7.28		6.45	6.44	
	Jumlah	99.98	99.98	99.98	100.00	99.98	99.99	99.99	100.01	100.00	99.99	99.94	99.97

Keterangan :

1. Sampel uji untuk masing-masing variasi uji dibuat duplo, kemudian hasil rata-rata dari sampel duplo tersebut dijadikan sebagai persentase mineralogi dari masing-masing sampel uji
2. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :
 Kode P1-b = Sampel uji variasi 1 yang diberi nama b
 Kode P1-c = Sampel uji variasi 1 yang diberi nama c

Tabel 4.9 Mineralogi sampel uji sebelum dicampur dengan air

No	Nama Kristal	Mineralogi Sampel Uji sebelum dicampur dengan air (persen berat)								
		P5-b	P5-c	Rata2	P6-b	P6-c	Rata2	P7-b	P7-c	Rata2
1	Albite	0.65	0.64	0.65	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	1.20	1.20	1.20	0.60	0.60	0.60	0.00	0.00	0.00
3	Archanite	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	C2S alpha	0.30	0.30	0.30	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
5	C2S beta	14.82	14.81	14.82	14.80	14.80	14.80	14.81	14.86	14.84
6	C3A Na-Cubic	4.32	4.32	4.32	4.34	4.35	4.35	4.37	4.36	4.37
7	C3A Na-Orth.	2.05	2.04	2.05	2.05	2.05	2.05	2.03	2.06	2.05
8	C3S monoclinic	44.59	44.58	44.59	44.57	44.58	44.58	44.56	44.51	44.54
9	C4AF	9.09	9.08	9.09	9.10	9.10	9.10	9.14	9.12	9.13
10	Calcite	12.78	12.77	12.78	15.88	15.88	15.88	18.97	18.94	18.96
11	Cristobalite low	0.11	0.10	0.11	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	1.32	1.31	1.32	1.55	1.55	1.55	1.90	1.94	1.92
13	Gypsum	3.07	3.11	3.09	3.03	3.04	3.04	3.04	3.03	3.04
14	Kaolinite	3.41	3.41	3.41	1.72	1.71	1.72	0.00	0.00	0.00
15	Labradorite	1.00	1.00	1.00	0.54	0.53	0.54	0.00	0.00	0.00
16	Lime	0.49	0.51	0.50	0.51	0.51	0.51	0.45	0.46	0.46
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.45	0.45	0.45	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.45
19	Quartz	0.19	0.19	0.19	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.17	0.16	0.17	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00
	R wp	6.24	6.40		6.53	7.83		7.53	7.44	
	Jumlah	100.02	99.99	100.01	99.99	100.01	100.00	100.00	100.02	100.01

Keterangan :

1. Sampel uji untuk masing-masing variasi uji dibuat duplo, kemudian hasil rata-rata dari sampel duplo tersebut dijadikan sebagai persentase mineralogi dari masing-masing sampel uji
2. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :
 Kode P5-b = Sampel uji variasi 1 yang diberi nama b
 Kode P5-c = Sampel uji variasi 1 yang diberi nama c

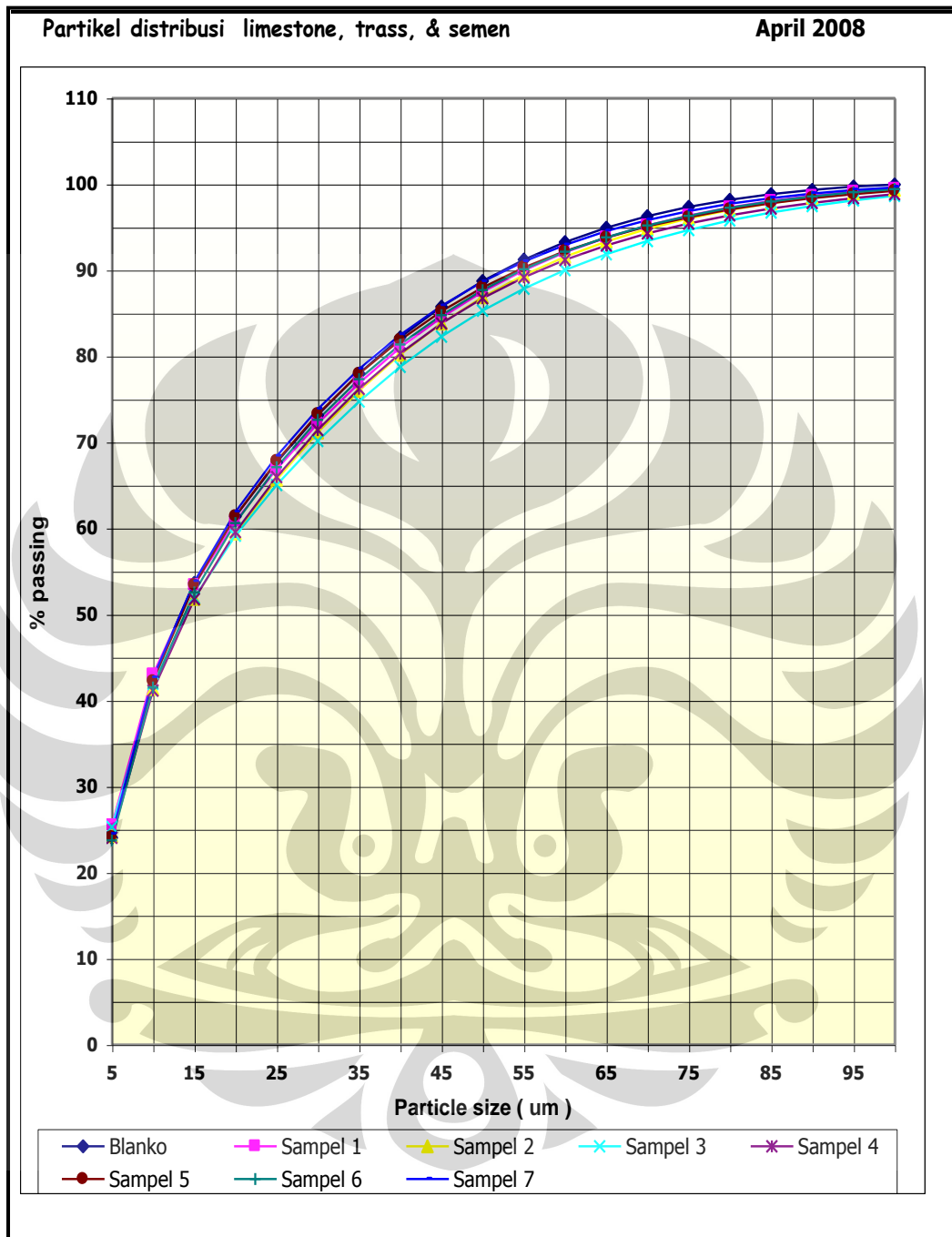
4.2.3 Hasil pengujian dengan alat Mastersizer

Pengujian dengan alat mastersizer dimaksudkan untuk mengetahui persentase distribusi ukuran butiran dari sampel uji sebelum dicampur dengan air. Hasil penyebaran ukuran butiran sebagaimana yang tercantum di bawah ini.

Tabel 4.10 Distribusi ukuran butiran sampel uji sebelum bercampur dengan air

P. Size (μm)	Percent Passing							
	Blanko	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5	Sampel 6	Sampel 7
5	24.03	25.46	24.23	25.27	24.03	24.10	23.74	24.45
10	42.68	43.02	41.33	41.92	41.14	42.23	41.49	42.61
15	53.65	53.41	51.77	51.90	51.75	53.38	52.56	53.80
20	61.37	60.81	59.38	59.12	59.55	61.40	60.61	61.89
25	67.66	66.88	65.66	65.03	65.93	67.83	67.10	68.37
30	73.14	72.17	71.14	70.15	71.43	73.27	72.59	73.84
35	77.98	76.87	75.98	74.73	76.20	77.93	77.31	78.50
40	82.18	80.98	80.19	78.76	80.31	81.89	81.34	82.47
45	85.75	84.51	83.80	82.27	83.80	85.22	84.78	85.83
50	88.74	87.49	86.85	85.27	86.73	87.99	87.68	88.65
55	91.23	89.98	89.41	87.83	89.17	90.29	90.11	91.00
60	93.26	92.06	91.55	90.00	91.19	92.20	92.13	92.94
65	94.93	93.77	93.32	91.83	92.87	93.78	93.81	94.52
70	96.27	95.19	94.79	93.37	94.25	95.08	95.18	95.81
75	97.34	96.35	96.00	94.67	95.40	96.15	96.31	96.85
80	98.17	97.29	96.98	95.76	96.36	97.04	97.24	97.69
85	98.82	98.04	97.78	96.68	97.15	97.77	97.98	98.37
90	99.32	98.64	98.42	97.45	97.81	98.36	98.57	98.90
95	99.70	99.11	98.92	98.09	98.36	98.83	99.04	99.31
100	99.94	99.46	99.31	98.63	98.82	99.22	99.40	99.61
105	100.00	99.71	99.61	99.07	99.20	99.52	99.66	99.81
110	100.00	99.87	99.81	99.44	99.52	99.76	99.84	99.92
115	100.00	99.96	99.94	99.75	99.78	99.92	99.95	99.98
120	100.00	100.00	100.00	99.96	99.97	99.99	100.00	100.00
125	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
130	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
135	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
140	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
145	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
155	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
160	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
165	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
170	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
175	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
180	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
185	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
190	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
195	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
500	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Blaine	3400	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

Distribusi ukuran butiran tersebut, bila disajikan dalam gambar adalah sebagai Gambar 4.1 Distribusi ukuran butiran sampel uji



4.3 Hasil Pengujian sampel uji setelah dibuat pasta semen

4.3.1 Hasil pengujian dengan X-RD

Mineralogi pada sampel uji setelah bercampur dengan air adalah seluruh mineralogi sampel uji ditambah dengan hasil mineralogi sampel uji ketika

bereaksi dengan air. Mineralogi hasil hidrasi semen ini sangat banyak, sehingga perlu diambil mineralogi yang berpengaruh terhadap reaksi hidrasi semen. *Mineralogi anhydrite, portlandite, ettringite, monosulphate, & Calcium Silicate Hydrate* adalah merupakan produk utama reaksi hidrasi semen. Hasil uji X-RD tercantum di bawah ini.

Tabel 4.11 Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 3 hari

Umur 3 hari													
No	Nama Kristal	Hasil Running X-RD Sampel Uji setelah dicampur dengan air (persen berat)											
		BL1	BL2	Rata2	P1-1	P1-2	Rata2	P2-1	P2-2	Rata2	P3-A	P3-C	Rata2
1	Albite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	0.00	0.00	0.00	3.50	4.59	4.05	2.55	3.01	2.78	0.27	1.17	0.72
3	Archanite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	C2S alpha	0.26	0.33	0.30	0.20	0.24	0.22	0.14	0.17	0.16	0.12	0.14	0.13
5	C2S beta	0.05	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	C3A Na-Cubic	2.09	2.25	2.17	0.05	0.08	0.07	0.03	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00
7	C3A Na-Orth.	0.79	1.04	0.92	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
8	C3S monoclinic	13.58	13.43	13.51	0.51	0.30	0.41	0.39	0.42	0.41	0.07	0.09	0.08
9	C4AF	7.71	7.35	7.53	4.77	7.82	6.30	4.54	4.52	4.53	11.83	10.20	11.02
10	Calcite	0.00	0.00	0.00	0.38	0.45	0.42	0.61	0.70	0.66	2.96	3.58	3.27
11	Cristobalite low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.20	0.15	0.18
13	Gypsum	0.28	0.31	0.30	0.07	0.08	0.08	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05
14	Kaolinite	0.00	0.00	0.00	0.11	0.11	0.11	1.22	1.42	1.32	0.06	0.10	0.08
15	Labradorite	0.00	0.00	0.00	3.27	3.89	3.58	2.16	2.56	2.36	0.00	2.04	1.02
16	Lime	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.26	0.28	0.27	0.39	0.45	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	Quartz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Anhydrite	0.09	0.10	0.10	0.08	0.09	0.09	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07
22	Portlandite	7.51	5.51	6.51	3.85	4.68	4.27	2.86	3.57	3.22	1.72	1.89	1.81
23	Ettringite	0.96	1.32	1.14	8.90	8.59	8.75	12.50	10.54	11.52	7.79	9.40	8.60
24	Monosulphate	0.07	0.04	0.06	8.27	6.61	7.44	21.75	20.18	20.97	0.26	0.38	0.32
25	C2SH	4.11	13.25	8.68	4.88	4.23	4.56	0.20	0.00	0.10	11.29	17.98	14.64
26	C3S3H	29.38	17.84	23.61	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.13	0.07
27	C6S3H	26.63	26.78	26.71	50.74	46.78	48.76	41.46	43.36	42.41	51.86	40.99	46.43
28	Afwillite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.88	3.56	4.22
29	Brucite	0.93	2.04	1.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	Boehmite	0.28	1.78	1.03	1.54	0.98	1.26	3.02	1.79	2.41	0.10	0.08	0.09
32	Katoite	0.04	0.04	0.04	0.56	0.07	0.32	0.37	0.04	0.21	0.03	0.35	0.19
33	Goethite	4.99	6.25	5.62	7.81	9.91	8.86	6.04	7.50	6.77	6.43	7.61	7.02
	Rwp	9.11	8.51		7.08	6.97		6.74	7.02		6.72	6.99	
	Jumlah	100.01	100.00	100.01	99.97	100.01	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.98	99.99

Keterangan :

1. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :

Kode P1-1 = Sampel uji variasi 1 yang diberi nama 1

Kode P3-A = Sampel uji variasi 3 yang diberi nama A

Tabel 4.12 Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 3 hari

Umur 3 hari													
No	Nama Kristal	Hasil Running X-RD Sampel Uji setelah dicampur dengan air (persen berat)											
		P4-A	P4-B	Rata2	P5-1	P5-2	Rata2	P6-1	P6-2	Rata2	P7-1	P7-2	Rata2
1	Albite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	0.75	0.94	0.85	0.41	0.03	0.22	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
3	Archanite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	C2S alpha	0.15	0.17	0.16	0.13	0.14	0.14	0.16	0.15	0.16	0.37	0.39	0.38
5	C2S beta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.07
6	C3A Na-Cubic	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	4.23	4.87	4.55
7	C3A Na-Orth.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.53	0.73	0.63
8	C3S monoclinic	0.09	0.09	0.09	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.05	6.15	8.91	7.53
9	C4AF	16.02	16.41	16.22	20.62	13.94	17.28	17.62	13.95	15.79	6.90	6.88	6.89
10	Calcite	2.39	2.74	2.57	4.16	4.16	4.16	6.62	6.48	6.55	18.31	21.02	19.67
11	Cristobalite low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	0.20	0.11	0.16	0.07	0.00	0.04	0.88	0.83	0.86	1.69	2.03	1.86
13	Gypsum	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	1.13	1.93	1.53
14	Kaolinite	0.05	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	0.64	0.00	0.00	0.00
15	Labradorite	2.39	2.68	2.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	Lime	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.62	0.58
19	Quartz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Anhydrite	0.08	0.09	0.09	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.11	0.13	0.12
22	Portlandite	2.33	2.36	2.35	0.92	0.18	0.55	1.78	1.66	1.72	5.22	5.86	5.54
23	Ettringite	8.77	20.21	14.49	14.64	23.93	19.29	16.04	26.18	21.11	0.22	0.23	0.23
24	Monosulphate	0.54	0.35	0.45	0.34	0.36	0.35	0.35	0.30	0.33	6.28	12.07	9.18
25	C2SH	0.00	7.63	3.82	7.34	0.00	3.67	9.72	12.56	11.14	0.04	0.03	0.04
26	C3S3H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.41	0.33	4.37
27	C6S3H	57.04	35.93	46.49	43.13	46.15	44.64	36.85	27.31	32.08	29.59	20.16	24.88
28	Afwillite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
29	Brucite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.90	0.60
30	Boehmite	0.17	0.15	0.16	0.02	2.49	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	Katoite	0.41	0.46	0.44	0.03	0.04	0.04	0.41	0.39	0.40	0.39	0.39	0.39
33	Goethite	8.52	9.52	9.02	8.03	8.41	8.22	9.33	8.69	9.01	9.52	12.45	10.99
	Rwp	6.91	6.90		7.23	7.25		7.18	7.36		7.27	6.71	6.99
	Jumlah	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.03	100.00	100.02	99.99	100.00	100.00

Keterangan :

1. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :

Kode P4-A = Sampel uji variasi 4 yang diberi nama A

Kode P5-1 = Sampel uji variasi 5 yang diberi nama 1

Tabel 4.13 : Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 7 hari

Umur 7 hari													
No	Nama Kristal	Hasil Running X-RD Sampel Uji setelah dicampur dengan air (persen berat)											
		BL1	BL2	Rata2	P1-1	P1-2	Rata2	P2-1	P2-2	Rata2	P3-A	P3-C	Rata2
1	Albite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	0.00	0.00	0.00	4.06	4.33	4.20	2.61	2.58	2.60	1.61	0.98	1.30
3	Archanite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	C2S alpha	0.39	0.38	0.39	0.21	0.22	0.22	0.16	0.16	0.16	0.13	0.13	0.13
5	C2S beta	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	C3A Na-Cubic	2.41	2.19	2.30	0.08	0.06	0.07	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01
7	C3A Na-Orth.	0.92	1.01	0.97	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
8	C3S monoclinic	12.62	13.55	13.09	0.51	0.59	0.55	0.43	0.39	0.41	0.07	0.02	0.05
9	C4AF	7.78	5.96	6.87	6.14	4.69	5.42	15.09	12.11	13.60	10.64	13.27	11.96
10	Calcite	0.00	0.00	0.00	0.40	0.41	0.41	1.19	1.44	1.32	3.17	3.03	3.10
11	Cristobalite low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.06	0.09	0.00	0.05
13	Gypsum	0.29	0.30	0.30	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
14	Kaolinite	0.00	0.00	0.00	0.09	0.10	0.10	1.22	1.21	1.22	0.07	0.06	0.07
15	Labradorite	0.00	0.00	0.00	3.44	3.67	3.56	2.21	2.19	2.20	1.87	0.69	1.28
16	Lime	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.30	0.27	0.29	0.00	0.45	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	Quartz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Anhydrite	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07
22	Portlandite	6.00	4.41	5.21	3.96	4.37	4.17	3.55	3.79	3.67	1.63	1.30	1.47
23	Ettringite	1.26	0.61	0.94	8.09	8.91	8.50	9.32	7.75	8.54	8.99	7.37	8.18
24	Monosulphate	0.03	0.04	0.04	7.19	7.56	7.38	11.51	12.85	12.18	0.38	0.37	0.38
25	C2SH	9.57	17.09	13.33	2.44	1.48	1.96	0.92	0.00	0.46	24.53	27.54	26.04
26	C3S3H	19.78	15.90	17.84	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
27	C6S3H	28.80	26.54	27.67	51.32	48.56	49.94	42.60	38.73	40.67	39.35	37.86	38.61
28	Afwillite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.32	3.16	0.00	0.00	0.00
29	Brucite	1.16	2.07	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02
30	Boehmite	0.31	2.77	1.54	2.89	4.18	3.54	1.62	2.18	1.90	0.04	0.00	0.02
32	Katoite	0.04	0.04	0.04	0.59	0.63	0.61	0.04	0.38	0.21	0.32	0.03	0.18
33	Goethite	8.19	6.71	7.45	8.35	9.56	8.96	7.32	7.65	7.49	6.96	7.16	7.06
	Rwp	8.93	8.99		7.00	7.03		6.41	6.31		6.85	7.05	
	Jumlah	100.00	99.99	100.00	99.99	100.02	100.01	99.99	99.99	99.99	100.00	99.98	99.99

Keterangan :

1. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :

Kode B11 = Sampel uji blanko yang diberi nama 1

Kode P3-A = Sampel uji variasi 3 yang diberi nama A

Tabel 4.14 Mineralogi Sampel Pasta pada pengujian 7 hari

Umur 7 hari													
No	Nama Kristal	Hasil Running X-RD Sampel Uji setelah dicampur dengan air (persen berat)											
		P4-A	P4-B	Rata2	P5-2	P5-3	Rata2	P6-1	P6-2	Rata2	P7-1	P7-2	Rata2
1	Albite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	1.16	1.08	1.12	0.96	0.00	0.48	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
3	Archanite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	C2S alpha	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.15	0.17	0.39	0.38	0.39
5	C2S beta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.07
6	C3A Na-Cubic	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	4.37	4.34	4.36
7	C3A Na-Orth.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.54	0.52	0.53
8	C3S monoclinic	0.13	0.12	0.13	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	5.82	5.63	5.73
9	C4AF	10.04	14.50	12.27	14.10	9.40	11.75	14.57	15.73	15.15	7.53	6.89	7.21
10	Calcite	2.50	3.28	2.89	5.45	5.40	5.43	7.35	6.58	6.97	18.89	18.77	18.83
11	Cristobalite low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	0.11	0.22	0.17	1.04	0.14	0.59	0.99	0.85	0.92	1.82	1.81	1.82
13	Gypsum	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	1.33	1.31	1.32
14	Kaolinite	0.11	0.09	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	Labradorite	2.72	2.77	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	Lime	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.55	0.56
19	Quartz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Anhydrite	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.08	0.09	0.11	0.11	0.11
22	Portlandite	2.75	3.16	2.96	1.34	1.43	1.39	2.01	1.72	1.87	5.46	5.53	5.50
23	Ettringite	10.71	20.85	15.78	10.03	11.32	10.68	14.71	17.97	16.34	0.11	0.13	0.12
24	Monosulphate	0.51	0.35	0.43	0.43	0.39	0.41	0.39	0.33	0.36	4.70	4.87	4.79
25	C2SH	0.00	2.12	1.06	0.01	7.49	3.75	5.76	9.73	7.75	0.03	0.05	0.04
26	C3S3H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.20	9.74	8.97
27	C6S3H	59.01	38.20	48.61	55.16	54.03	54.60	40.87	36.57	38.72	29.89	29.19	29.54
28	Afwillite	0.00	2.38	1.19	0.00	0.00	0.00	2.04	0.81	1.43	0.00	0.00	0.00
29	Brucite	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
30	Boehmite	0.28	0.36	0.32	0.14	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	Katoite	0.05	0.48	0.27	0.05	0.39	0.22	0.46	0.40	0.43	0.43	0.41	0.42
33	Goethite	9.55	9.67	9.61	10.87	9.53	10.20	10.39	8.93	9.66	9.74	9.68	9.71
	Rwp	7.02	7.11		6.86	6.90		7.29	7.19		7.10	6.73	
	Jumlah	99.98	100.01	100.00	100.01	100.00	100.01	100.01	100.02	100.02	100.01	100.00	100.01

Keterangan :

1. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :

Kode P4-A= Sampel uji variasi 4 yang diberi nama A

Kode P5-3 = Sampel uji variasi 5 yang diberi nama 3

Tabel 4.15 Mineralogi sampel pasta pengujian 28 hari

Umur 28 hari													
No	Nama Kristal	Hasil Running X-RD Sampel Uji setelah dicampur dengan air (persen berat)											
		BL2	BL5	Rata2	P1-1	P1-2	Rata2	P2-1	P2-2	Rata2	P3-B	P3-C	Rata2
1	Albite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	0.00	0.00	0.00	4.07	3.76	3.92	3.00	2.81	2.91	0.24	0.65	0.45
3	Archanite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	C2S alpha	0.51	0.50	0.51	0.21	0.19	0.20	0.19	0.17	0.18	0.09	0.14	0.12
5	C2S beta	0.07	0.07	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
6	C3A Na-Cubic	3.29	3.46	3.38	0.08	0.09	0.09	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00
7	C3A Na-Orth.	1.08	0.83	0.96	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
8	C3S monoclinic	10.21	11.32	10.77	0.55	0.49	0.52	0.54	0.20	0.37	0.04	0.01	0.03
9	C4AF	6.96	7.83	7.40	5.93	10.51	8.22	15.65	20.86	18.26	10.68	11.97	11.33
10	Calcite	0.00	0.00	0.00	0.39	0.34	0.37	1.34	1.45	1.40	2.20	3.16	2.68
11	Cristobalite low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.20	0.00	0.10
13	Gypsum	0.57	0.44	0.51	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.03	0.05	0.04
14	Kaolinite	0.00	0.00	0.00	1.95	1.77	1.86	1.41	1.34	1.38	0.03	0.07	0.05
15	Labradorite	0.00	0.00	0.00	3.46	3.19	3.33	2.55	2.38	2.47	1.31	0.03	0.67
16	Lime	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.40	0.42	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	Quartz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Anhydrite	0.13	0.12	0.13	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.04	0.07	0.06
22	Portlandite	5.02	7.03	6.03	3.81	2.67	3.24	4.06	4.73	4.40	1.26	1.39	1.33
23	Ettringite	0.03	0.70	0.37	6.84	4.10	5.47	7.57	4.48	6.03	11.80	12.52	12.16
24	Monosulphate	0.03	0.06	0.05	7.32	5.49	6.41	9.61	7.21	8.41	0.19	0.40	0.30
25	C2SH	14.81	9.39	12.10	0.00	0.87	0.44	0.00	10.73	5.37	38.46	34.39	36.43
26	C3S3H	14.00	24.66	19.33	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	C6S3H	29.88	26.35	28.12	50.61	55.45	53.03	43.63	30.09	36.86	27.40	27.53	27.47
28	Afwillite	0.12	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00	0.44
29	Brucite	2.71	2.73	2.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	Boehmite	3.70	2.96	3.33	5.05	1.78	3.42	1.61	1.86	1.74	0.12	0.00	0.06
32	Katoite	0.60	0.63	0.62	0.59	0.05	0.32	0.10	0.04	0.07	0.22	0.03	0.13
33	Goethite	5.86	0.56	3.21	8.89	9.02	8.96	8.49	11.45	9.97	4.80	7.57	6.19
	Rwp	8.81	9.23		7.00	7.57		7.11	6.42		6.70	6.99	
	Jumlah	99.98	100.06	100.02	99.98	99.99	99.99	100.01	100.01	100.01	99.99	100.00	100.00

Keterangan :

1. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :

Kode B11= Sampel uji blanko yang diberi nama 1

Kode P3-B = Sampel uji variasi 3 yang diberi nama B

Tabel 4.16 Mineralogi sampel pasta pengujian 28 hari

Umur 28 hari													
No	Nama Kristal	Hasil Running X-RD Sampel Uji setelah dicampur dengan air (persen berat)											
		P4-A	P4-B	Rata2	P5-1	P5-2	Rata2	P6-1	P6-2	Rata2	P7-1	P7-2	Rata2
1	Albite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Anorthite	0.75	0.94	0.85	0.41	0.03	0.22	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
3	Archanite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	C2S alpha	0.15	0.17	0.16	0.13	0.14	0.14	0.16	0.15	0.16	0.37	0.39	0.38
5	C2S beta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.07
6	C3A Na-Cubic	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	4.23	4.87	4.55
7	C3A Na-Orth.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.53	0.73	0.63
8	C3S monoclinic	0.09	0.09	0.09	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.05	6.15	8.91	7.53
9	C4AF	16.02	16.41	16.22	20.62	13.94	17.28	17.62	13.95	15.79	6.90	6.88	6.89
10	Calcite	2.39	2.74	2.57	4.16	4.16	4.16	6.62	6.48	6.55	18.31	21.02	19.67
11	Cristobalite low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Dolomite	0.20	0.11	0.16	0.07	0.00	0.04	0.88	0.83	0.86	1.69	2.03	1.86
13	Gypsum	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	1.13	1.93	1.53
14	Kaolinite	0.05	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	0.64	0.00	0.00	0.00
15	Labradorite	2.39	2.68	2.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	Lime	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Magnetite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Periclase	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.62	0.58
19	Quartz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Sanidine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Anhydrite	0.08	0.09	0.09	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.11	0.13	0.12
22	Portlandite	2.33	2.36	2.35	0.92	0.18	0.55	1.78	1.66	1.72	5.22	5.86	5.54
23	Ettringite	8.77	20.21	14.49	14.64	23.93	19.29	16.04	26.18	21.11	0.22	0.23	0.23
24	Monosulphate	0.54	0.35	0.45	0.34	0.36	0.35	0.35	0.30	0.33	6.28	12.07	9.18
25	C2SH	0.00	7.63	3.82	7.34	0.00	3.67	9.72	12.56	11.14	0.04	0.03	0.04
26	C3S3H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.41	0.33	4.37
27	C6S3H	57.04	35.93	46.49	43.13	46.15	44.64	36.85	27.31	32.08	29.59	20.16	24.88
28	Afwillite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
29	Brucite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.90	0.60
30	Boehmite	0.17	0.15	0.16	0.02	2.49	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	Katoite	0.41	0.46	0.44	0.03	0.04	0.04	0.41	0.39	0.40	0.39	0.39	0.39
33	Goethite	8.52	9.52	9.02	8.03	8.41	8.22	9.33	8.69	9.01	9.52	12.45	10.99
	Rwp	7.02	7.11		6.86	6.90		7.29	7.19		7.10	6.73	
	Jumlah	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.03	100.00	100.02	99.99	100.00	100.00

Keterangan :

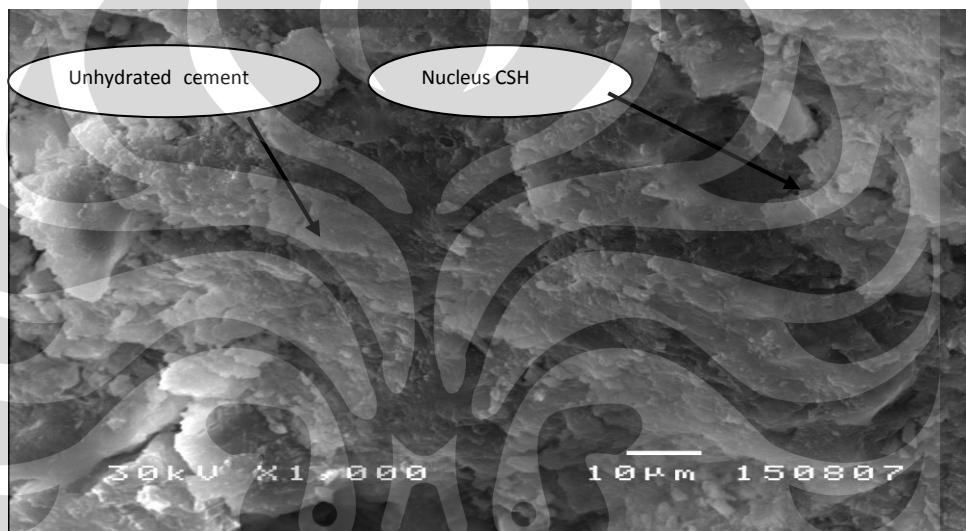
1. Contoh penjelasan kode sampel sebagai berikut :

Kode P4-A= Sampel uji variasi 4 yang diberi nama A

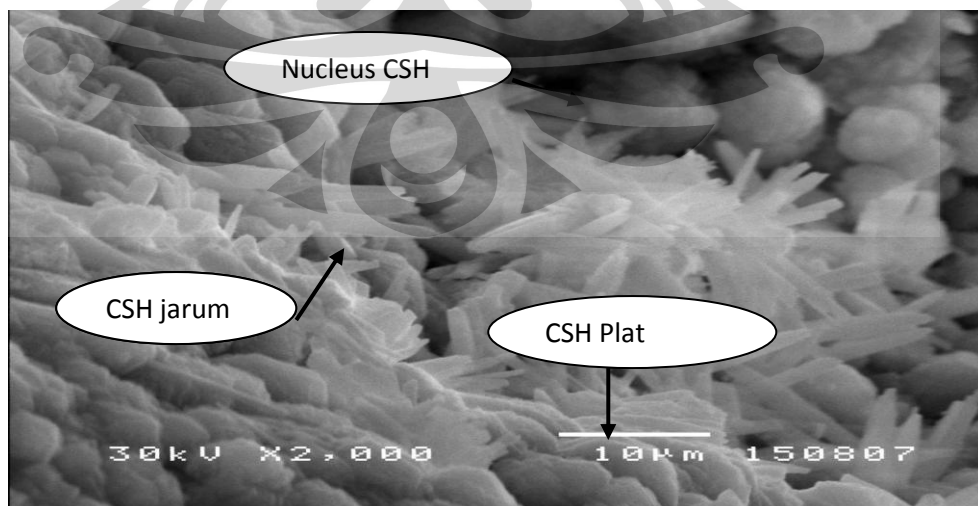
Kode P5-1 = Sampel uji variasi 5 yang diberi nama 1

4.3.2 Hasil pengujian dengan SEM

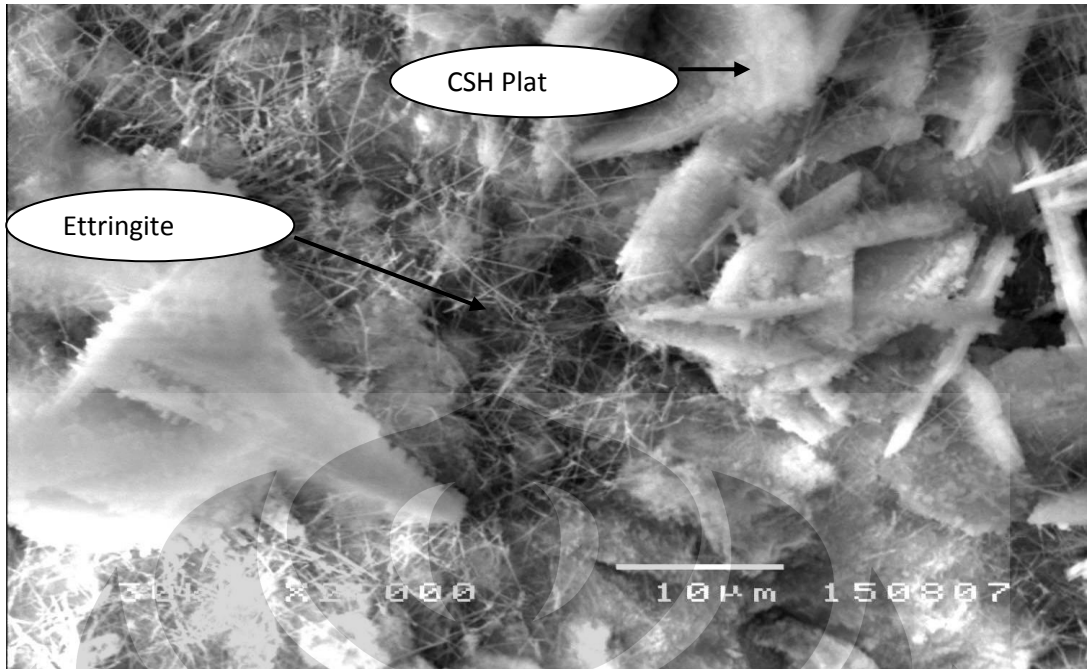
Pengujian SEM ini dilakukan pada umur pengujian 3 hari, 7 hari, dan 28 hari. Sampel uji dibuat pasta semen kemudian dicetak pada cetakan 2 inchi x 2 inchi x 2 inchi. Setelah sampai pada umur pengujian tertentu, sampel dipress sampai patah / pecah. Pecahan sampel ini kemudian diperkecil sampai ukuran 7 mm x 7 mm x 2 mm, kemudian dilarutkan pada acetone selama 24 jam untuk menghentikan proses hidrasi. Selanjutnya sampel siap uji ini dicoating dengan lapisan emas (AU) agar bersifat konduktor. Hasil pengujian SEM ditunjukkan gambar di bawah ini.



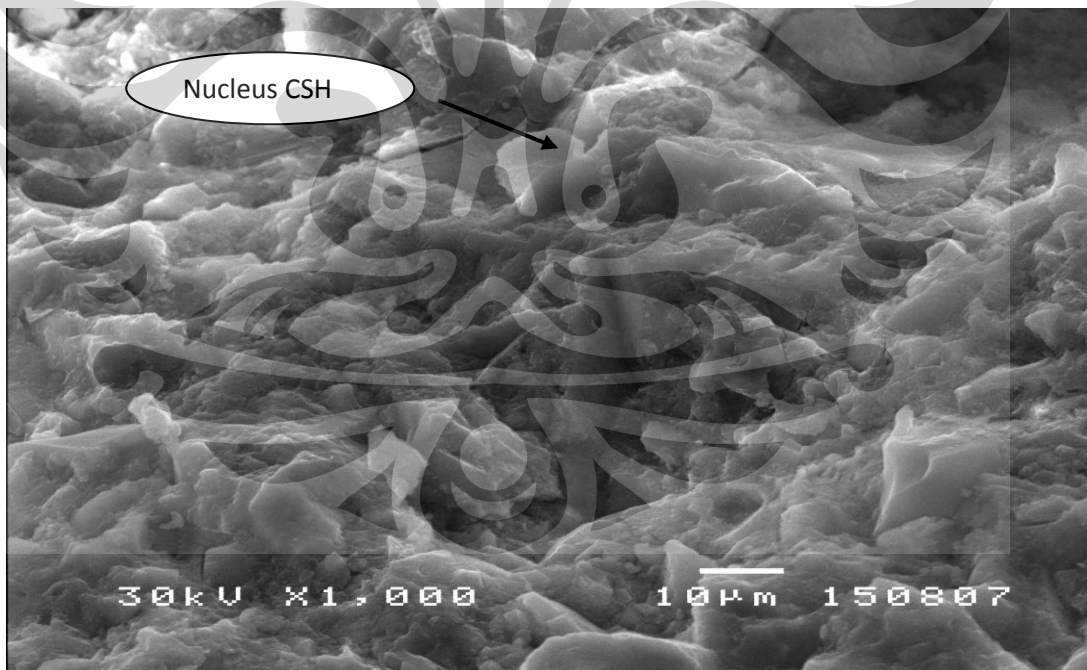
Gambar 4.2 Mikrostruktur sampel pasta semen blanko pada umur pengujian 3 hari



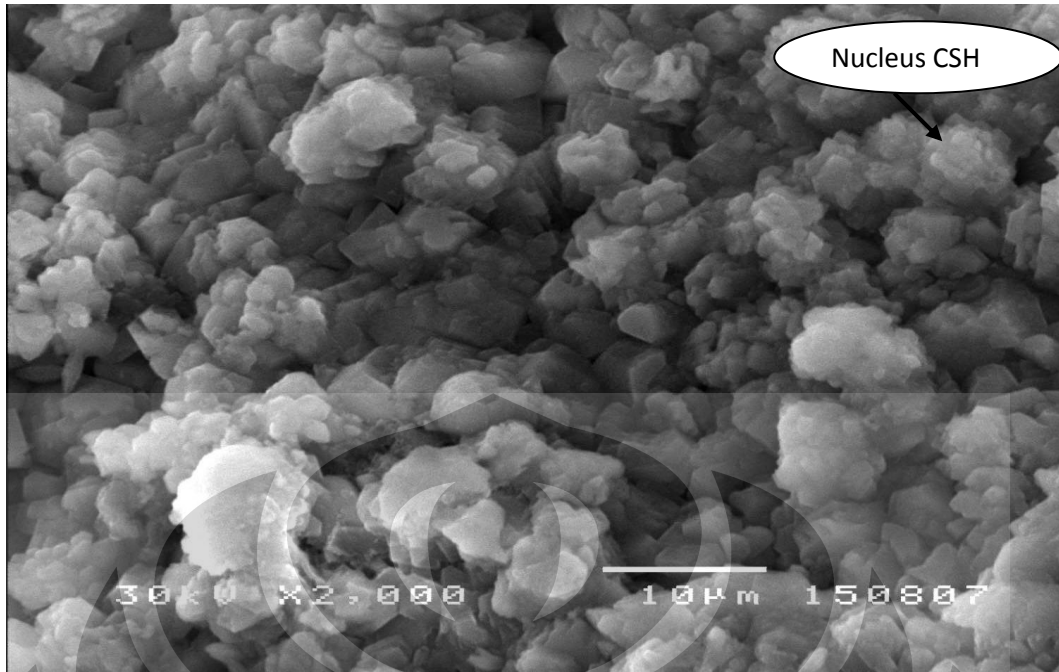
Gambar 4.3 Mikrostruktur sampel pasta semen blanko pada umur pengujian 7 hari



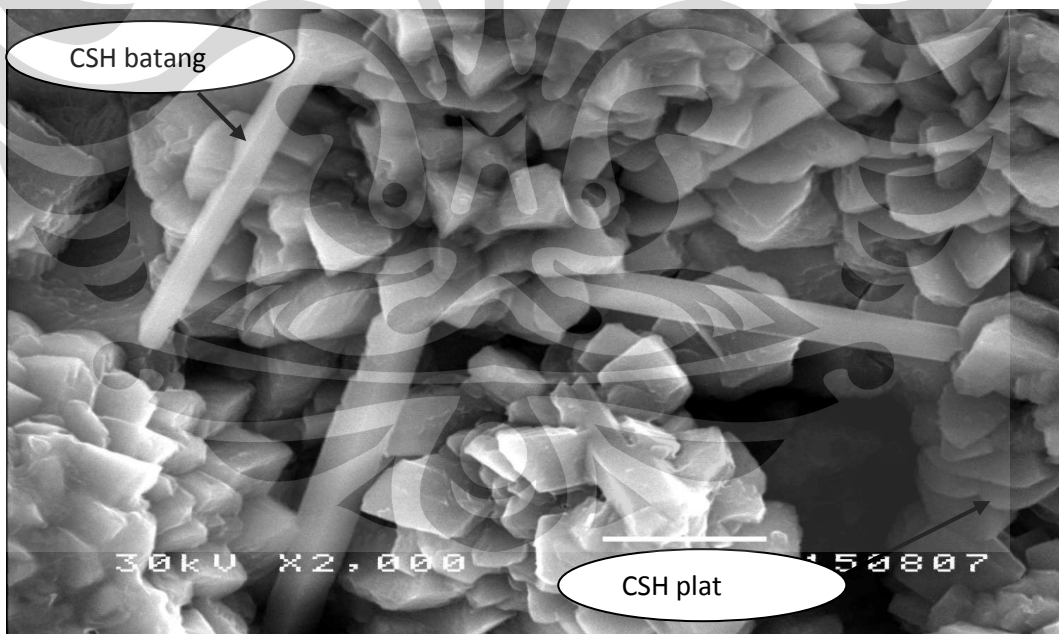
Gambar 4.4 Mikrostruktur sampel pasta semen blanko pada umur pengujian 28 hari



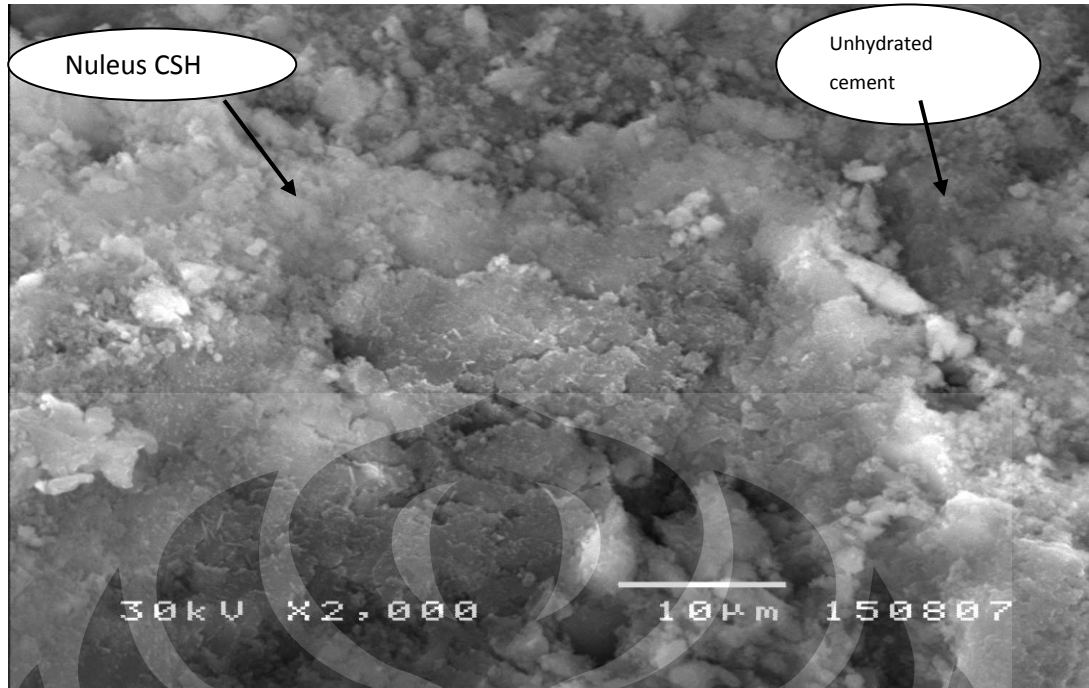
Gambar 4.5 Mikrostruktur sampel pasta semen 1 pada umur pengujian 3 hari



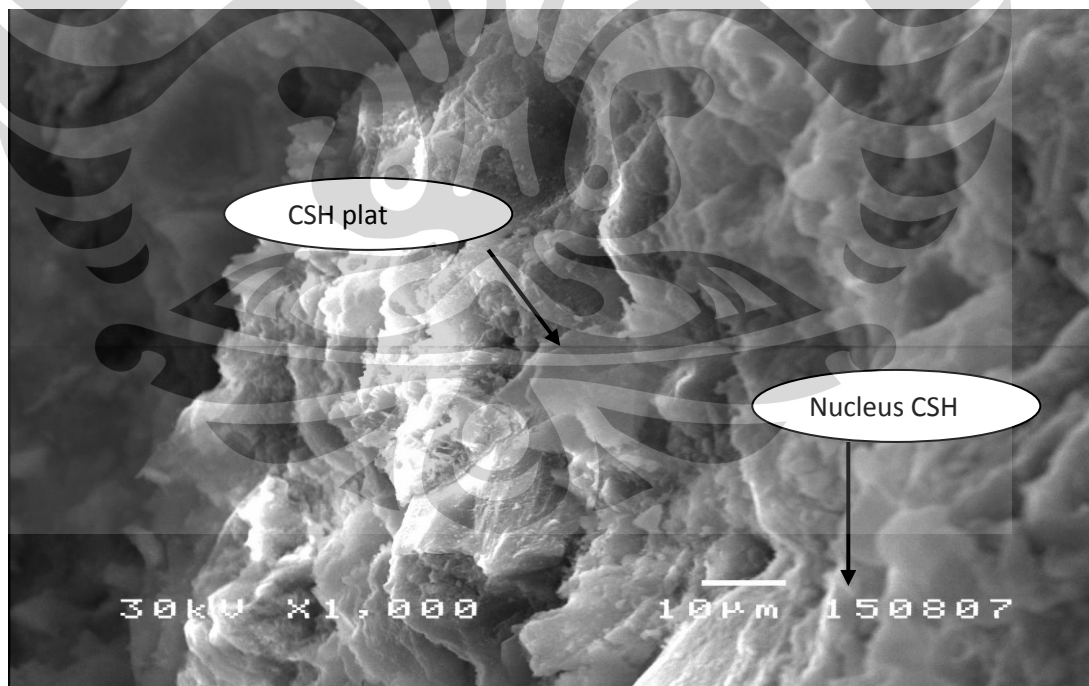
Gambar 4.6 Mikrostruktur sampel pasta semen 1 pada umur pengujian 7 hari



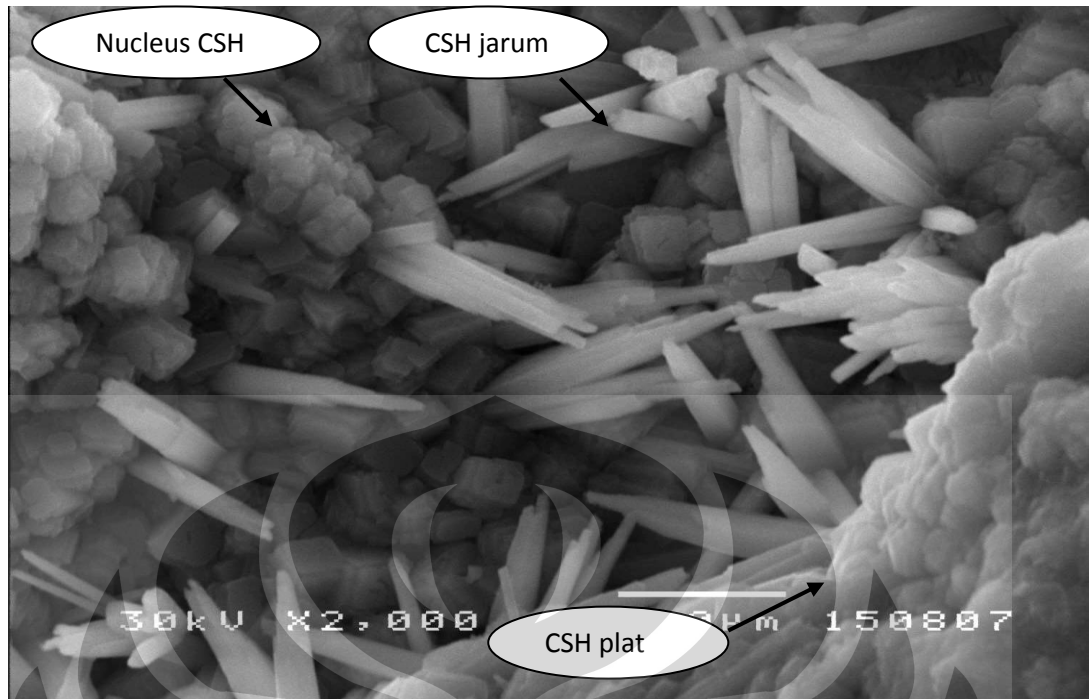
Gambar 4.7 Mikrostruktur sampel pasta semen 1 pada umur pengujian 28 hari



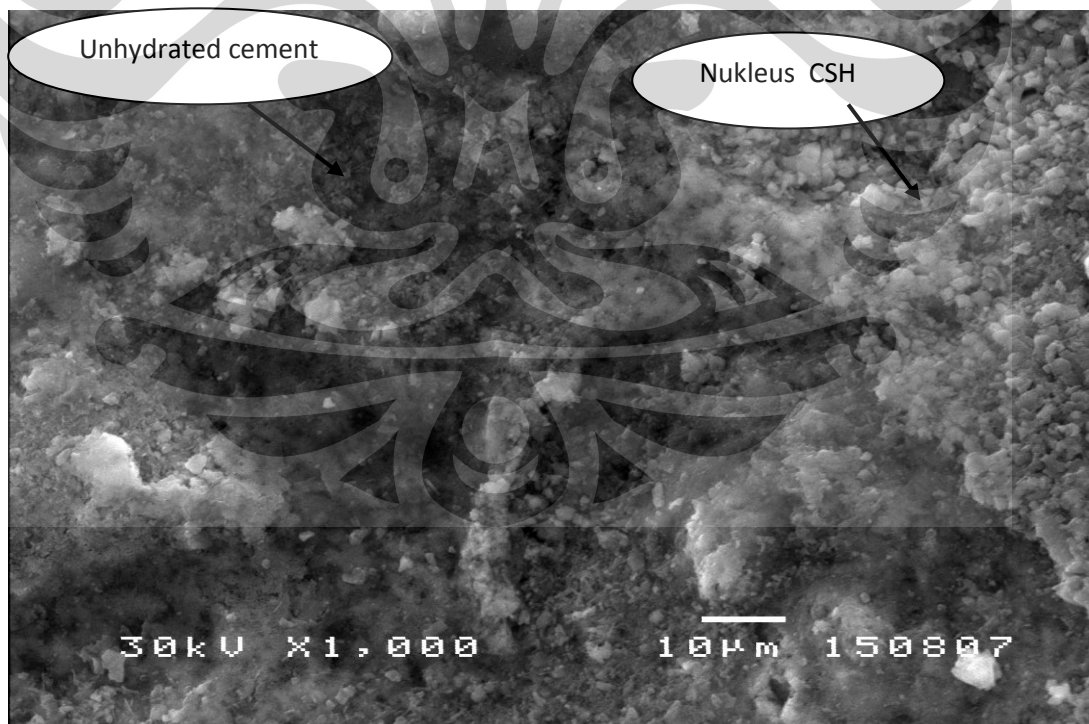
Gambar 4.8 Mikrostruktur sampel pasta semen 2 pada umur pengujian 3 hari



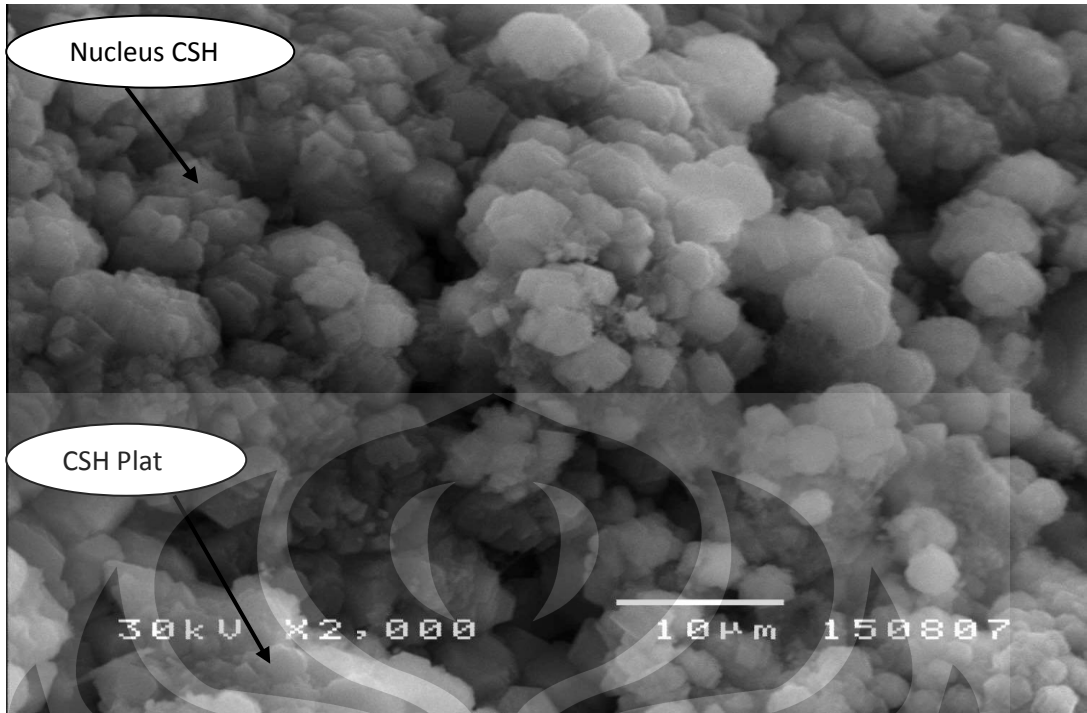
Gambar 4.9 Mikrostruktur sampel pasta semen 2 pada umur pengujian 7 hari



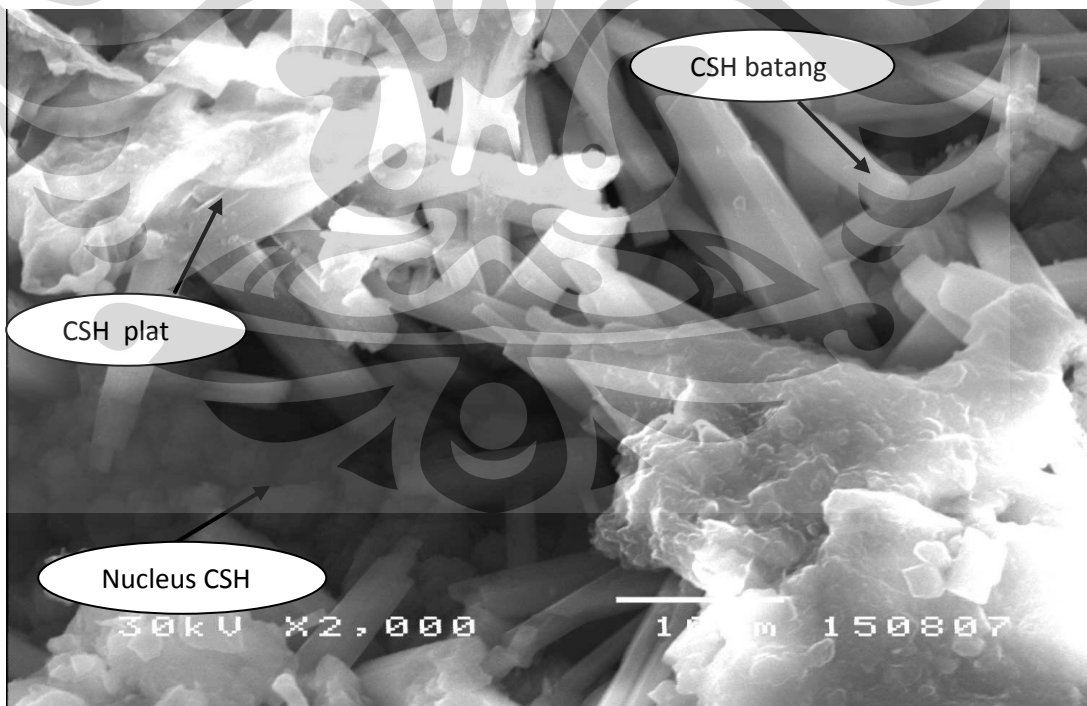
Gambar 4.10 Mikrostruktur sampel pasta semen 2 pada umur pengujian 28 hari



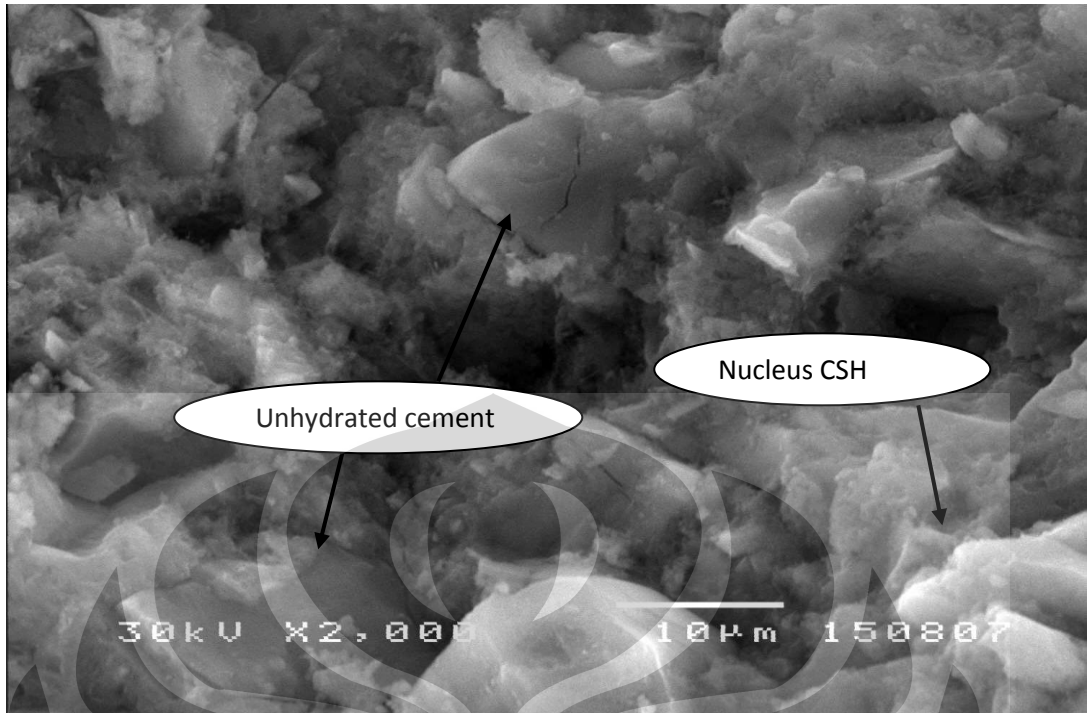
Gambar 4.11 Mikrostruktur sampel pasta semen 3 pada umur pengujian 3 hari



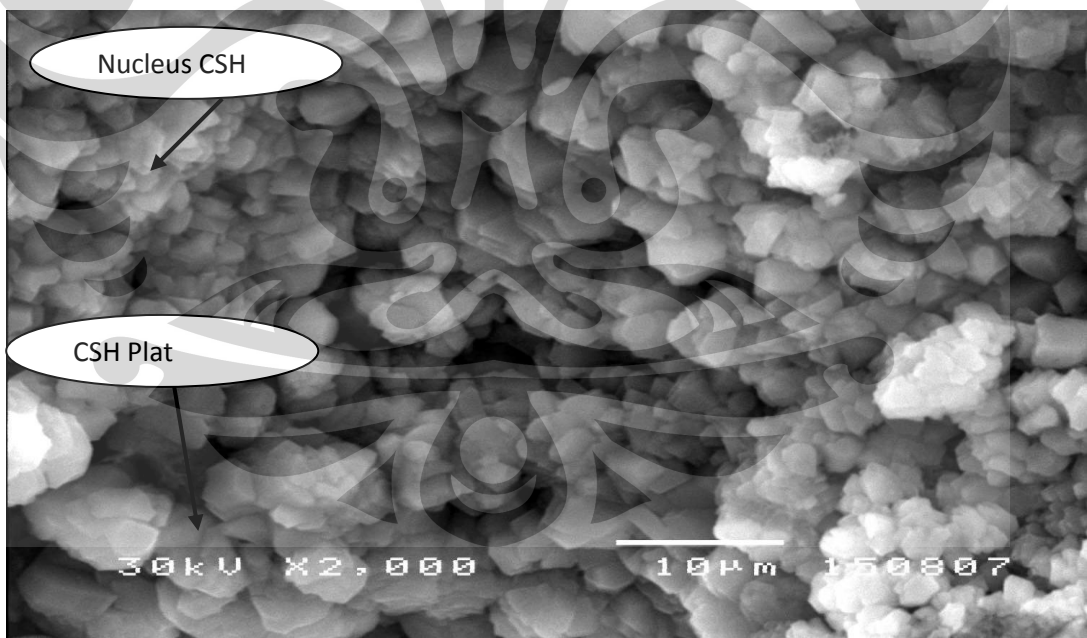
Gambar 4.12 Mikrostruktur sampel pasta semen 3 pada umur pengujian 7 hari



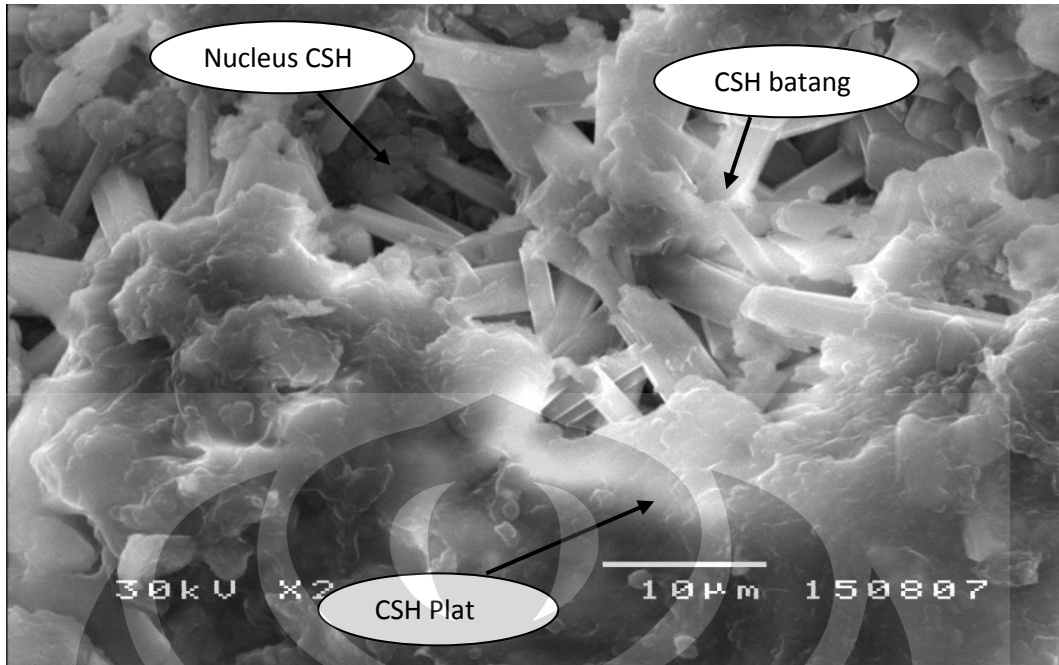
Gambar 4.13 Mikrostruktur sampel pasta semen 3 pada umur pengujian 28 hari



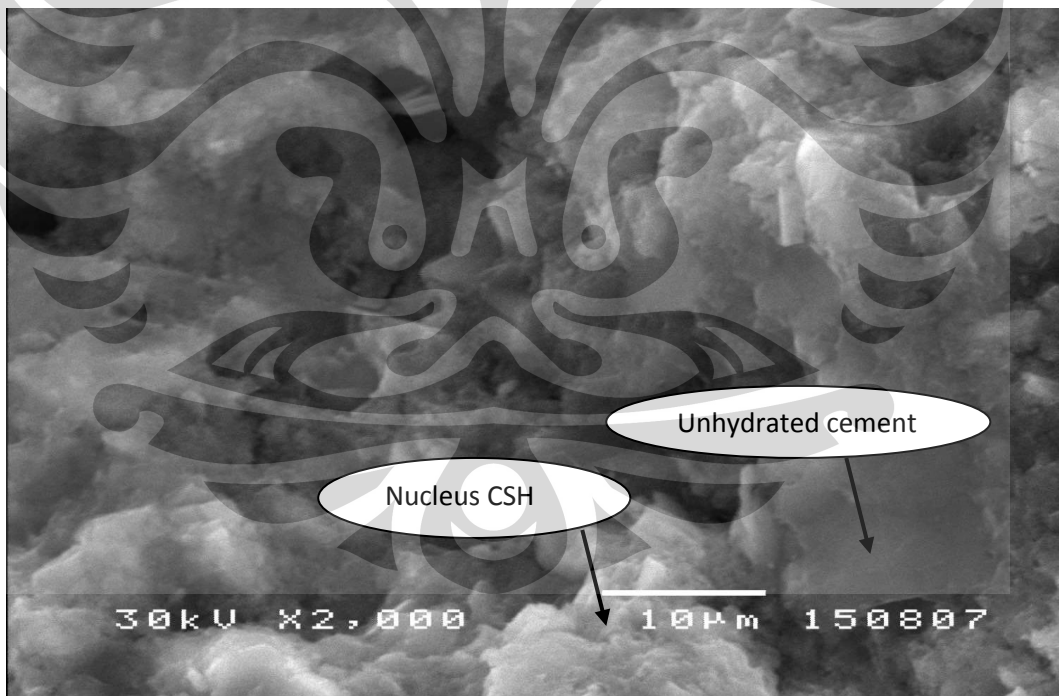
Gambar 4.14 Mikrostruktur sampel pasta semen 4 pada umur pengujian 3 hari



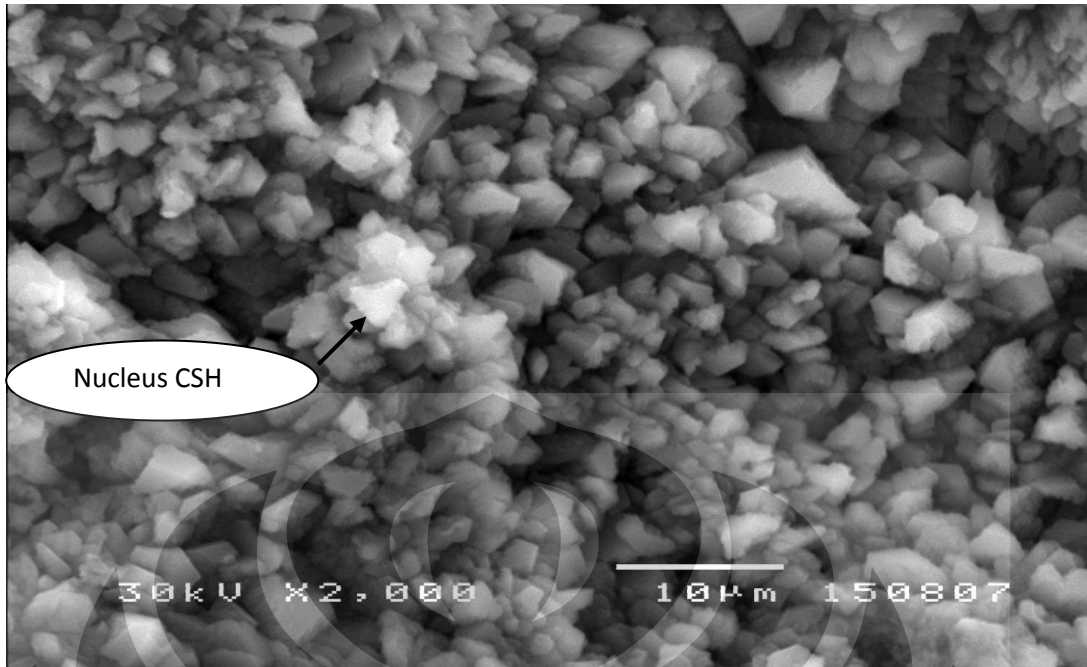
Gambar 4.15 Mikrostruktur sampel pasta semen 4 pada umur pengujian 7 hari



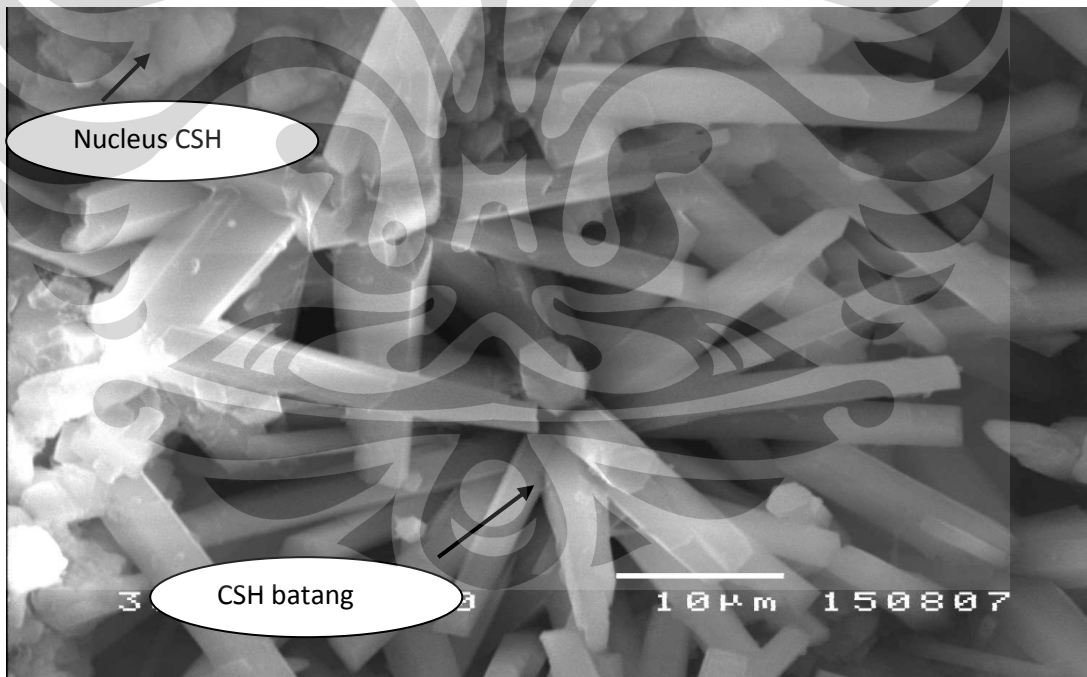
Gambar 4.16 Mikrostruktur sampel pasta semen 4 pada umur pengujian 28 hari



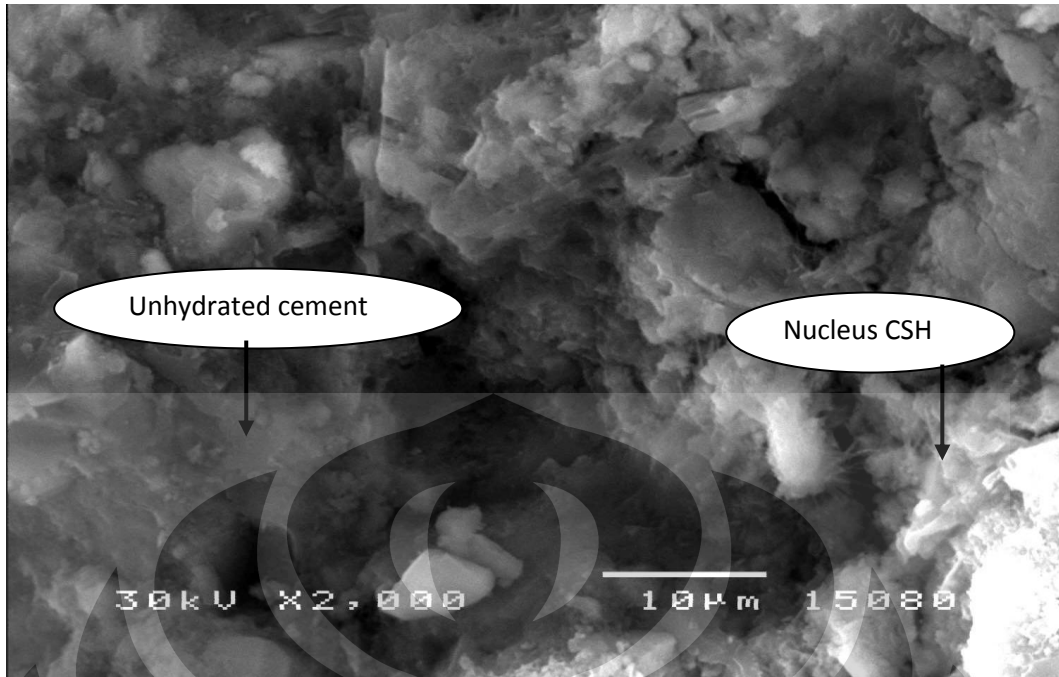
Gambar 4.17 Mikrostruktur sampel pasta semen 5 pada umur pengujian 3 hari



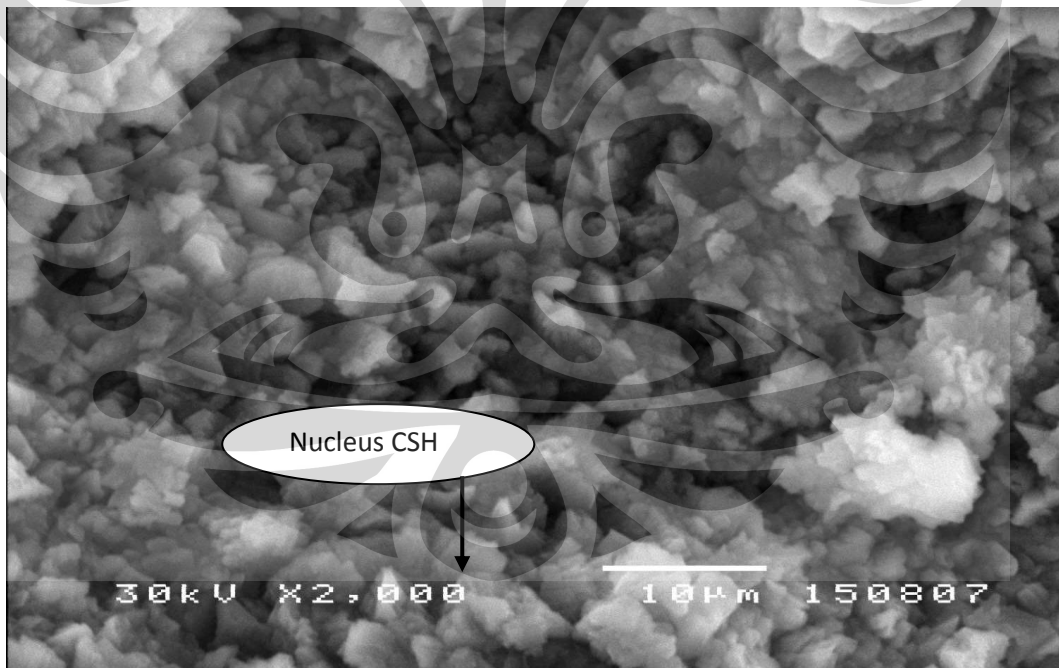
Gambar 4.18 Mikrostruktur sampel pasta semen 5 pada umur pengujian 7 hari



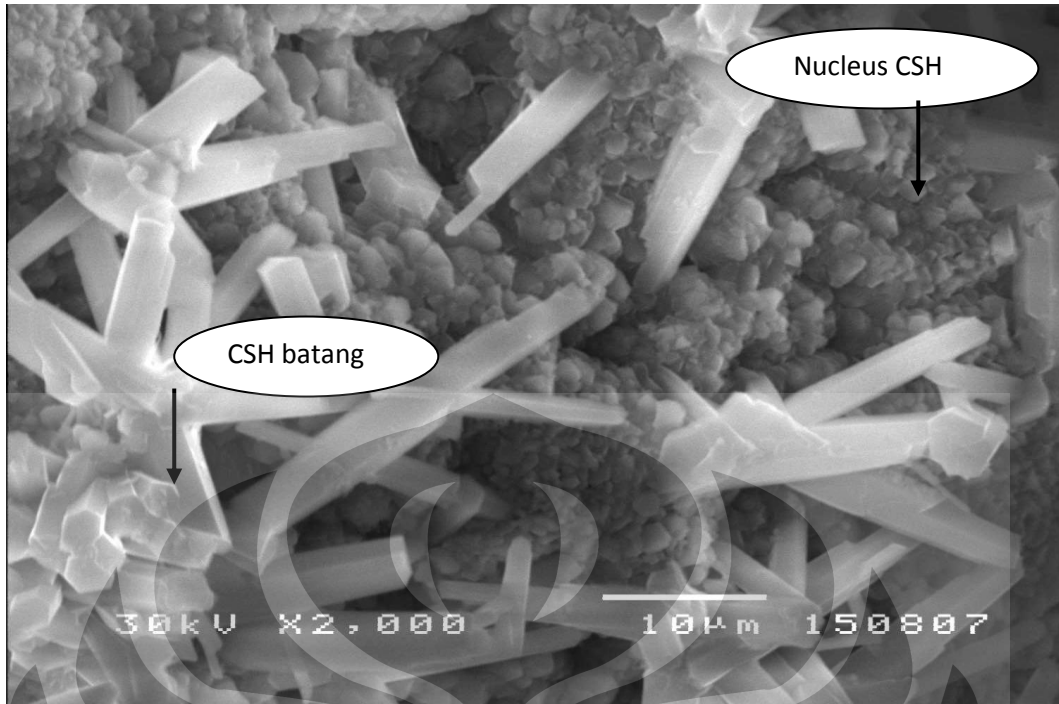
Gambar 4.19 Mikrostruktur sampel pasta semen 5 pada umur pengujian 28 hari



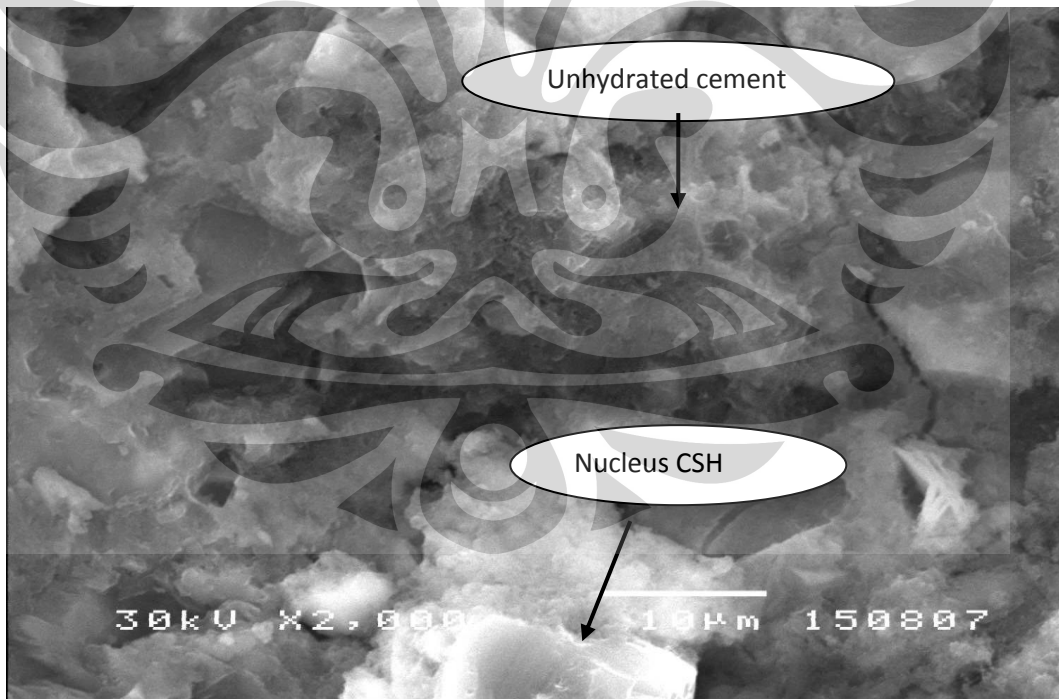
Gambar 4.20 Mikrostruktur sampel pasta semen 6 pada umur pengujian 3 hari



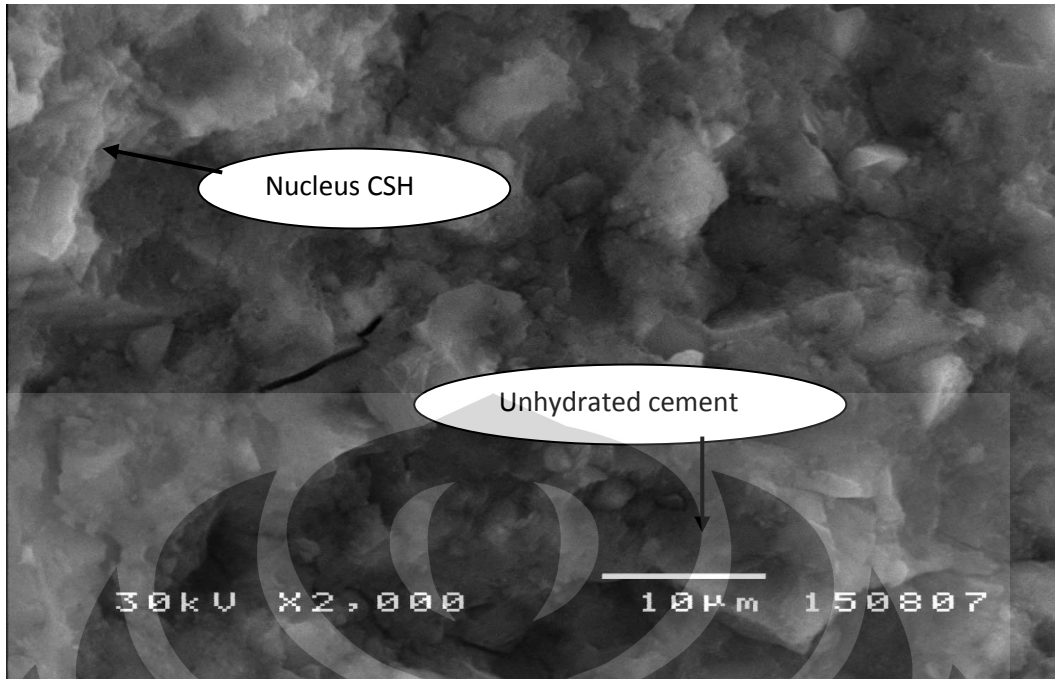
Gambar 4.21 Mikrostruktur sampel pasta semen 6 pada umur pengujian 7 hari



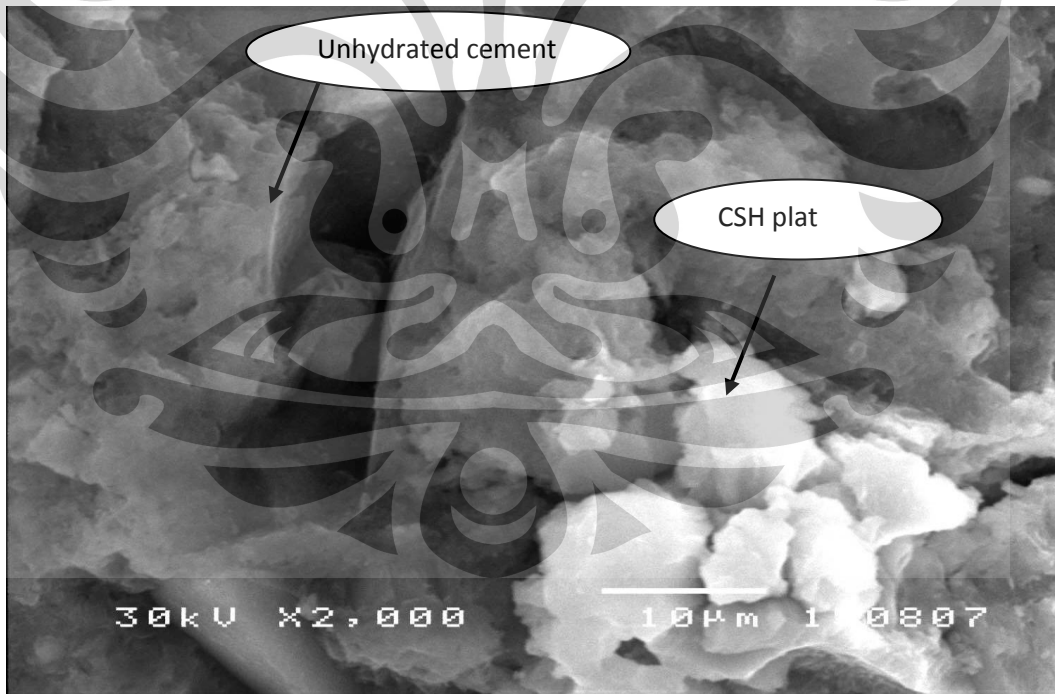
Gambar 4.22 Mikrostruktur sampel pasta semen 6 pada umur pengujian 28 hari



Gambar 4.23 Mikrostruktur sampel pasta semen 7 pada umur pengujian 3 hari



Gambar 4.24 Mikrostruktur sampel pasta semen 7 pada umur pengujian 7 hari



Gambar 4.25 Mikrostruktur sampel pasta semen 7 pada umur pengujian 28 hari

4.3.3 Hasil pengujian Kuat Tekan

Proses pembuatan sampel uji untuk pengujian kuat tekan ini dapat digambarkan sebagai berikut. Sampel uji dari sampel semen blanko, sampel semen 1 sampai sampel semen 7, masing-masing ditambahkan pasir otawa dengan perbandingan tertentu. Setelah itu ditambahkan air, kemudian diaduk dengan *mixer*. Adukan semen dengan air (mortar) ini kemudian diisikan pada cetakan mortar yang berukuran 2 inchi x 2 inchi x 2 inchi. Perlakuan selanjutnya sampel uji kuat tekan diletakkan dalam ruang curing yang dijaga kelembabannya diatas 95% dan suhunya dijaga pada 21 – 25°C. Setelah 24 jam sampel uji dibongkar dari cetakannya, selanjutnya dipindahkan ke bak perendaman yang berisi air yang dijaga pada suhu 21 – 25°C. Pada umur pengujian 3 hari, 7 hari, dan 28 hari, sampel dari bak perendaman untuk dilakukan pengepresan kuat tekan. Hasil pengepresan kuat tekan sebagaimana di bawah ini :

Tabel 4.17 Hasil pengujian kuat tekan sampel uji mortar pada umur 3 hari

Nama Sampel	Hasil Uji kuat tekan 3 Hari (kgf/cm ²)					
	Kubus 1	kubus 2	kubus 3	kubus 4	kubus 5	Rata-rata
Sampel blanko	255	261	257	262	272	261
Sampel 1 - Mortar	196	195	195	204	197	197
Sampel 2 - Mortar	204	211	225	226	227	219
Sampel 3 - Mortar	210	212	232	237	231	224
Sampel 4 - Mortar	197	202	200	212	210	204
Sampel 5 - Mortar	197	184	186	202	200	194
Sampel 6 - Mortar	219	217	220	219	225	220
Sampel 7 - Mortar	199	192	200	210	204	201

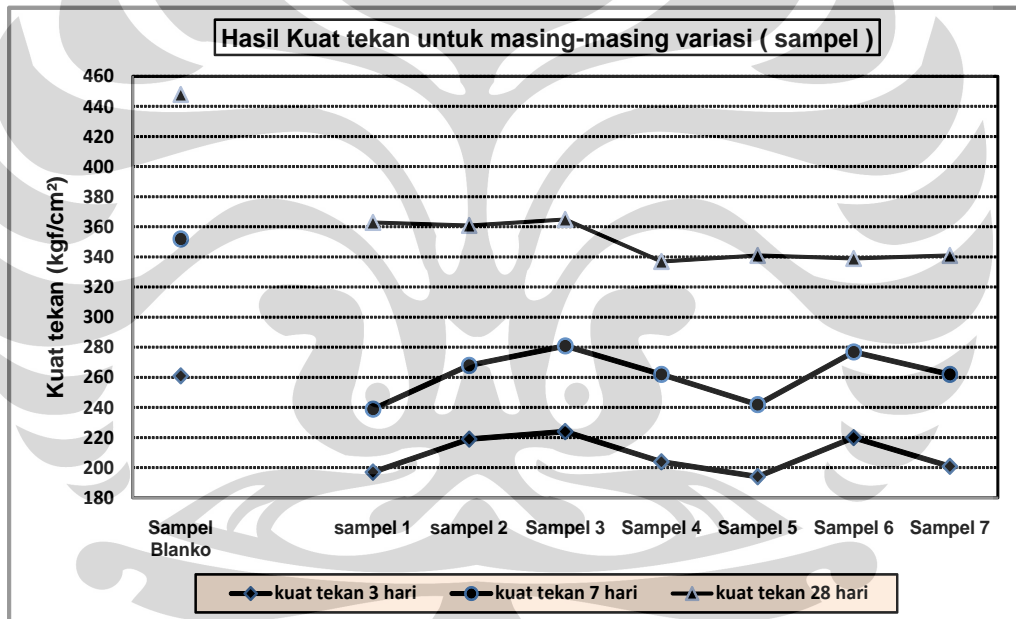
Tabel 4.18 Hasil pengujian kuat tekan sampel uji mortar pada umur 7 hari

Nama Sampel	Hasil Uji kuat tekan 7 Hari (kgf/cm ²)					
	Kubus 1	kubus 2	kubus 3	kubus 4	kubus 5	Rata-rata
Sampel blanko	337	354	355	360	352	352
Sampel 1 - Mortar	248	231	240	241	236	239
Sampel 2 - Mortar	261	268	269	279	264	268
Sampel 3 - Mortar	278	269	286	285	288	281
Sampel 4 - Mortar	249	252	264	264	279	262
Sampel 5 - Mortar	237	244	237	240	251	242
Sampel 6 - Mortar	273	277	280	279	274	277
Sampel 7 - Mortar	260	261	256	265	266	262

Tabel 4.19 Hasil pengujian kuat tekan sampel uji mortar pada umur 28 hari

Nama Sampel	Hasil Uji kuat tekan 28 Hari (kgf/cm ²)					
	Kubus 1	kubus 2	kubus 3	kubus 4	kubus 5	Rata-rata
Sampel blanko	442	465	464	430	437	448
Sampel 1 - Mortar	357	368	361	368	359	363
Sampel 2 - Mortar	366	354	357	362	365	361
Sampel 3 - Mortar	366	370	367	349	374	365
Sampel 4 - Mortar	350	336	324	349	324	337
Sampel 5 - Mortar	322	328	343	357	353	341
Sampel 6 - Mortar	338	332	338	343	344	339
Sampel 7 - Mortar	335	340	347	341	344	341

Hasil rata-rata kuat tekan pada masing-masing variasi pada umur pengujian 3, 7 dan 28 hari, bila digambarkan dengan grafik seperti dibawah ini :



Gambar 4.26 Grafik hubungan variasi sampel dengan kuat tekan

4.4 Reaksi Hidrasi Sampel Uji Ditinjau Dengan Pengamatan X-RD

Hasil reaksi hidrasi semen secara prinsip dapat dibedakan menjadi beberapa macam. Reaksi C_2S , C_3S dengan H_2O akan menghasilkan Kalsium Silikat Hidrat, yang disingkat dengan CSH (Dratva, 1996) dan Kalsium Hidroksida yang dikenal dengan *Portlandite* dan disingkat CH (Luca Bertolini et al., 2004 ; Jeffrey J et al., 2004). Reaksi C_3A dengan adanya *gypsum* dan air akan

menghasilkan *ettringite* dan *Monosulphate* (Pollman, 2007). Reaksi C_4AF dengan air akan menghasilkan *Tricalcium aluminate hydrate* yang disingkat C_3AH_6 , Iron Hidroksida yang disingkat FH_3 dan Kalsium Hidroksida. C_3A yang tidak bereaksi bersama sama C_3AH_6 yang tidak bereaksi dengan adanya air akan membentuk rangkaian garnet dan hidrogarnet (Edward Arnold, 1976).

Mineralogi atau kristal CSH sangat banyak dan beragam. Secara umum dapat dibagi menjadi 5 grup. Lima grup tersebut yaitu *wollastonite* terdiri 5 kristalin, *Tobermorite* terdiri 5 kristalin, *gyrolite* terdiri dari 3 kristalin, *calciochondrodite*, struktur kristal lainnya terdiri dari 8 kristalin .(Edward Arnold, 1976).

Pada pengujian sampel uji pasta semen pada penelitian ini ada produk hidrasi yang tidak bisa dilakukan pengukuran yaitu C_3AH_6 karena tidak adanya data struktur untuk mineral tersebut. Kristalin yang lain diwakili sebagai berikut : untuk FH_3 diwakili kristal dengan nama goethite, hasil reaksi C_3A diwakili *ettringite* dan *monosulphate*, dan hasil reaksi C_2S , C_3S dengan H_2O diwakili oleh C_2SH *alpha*, C_3S_3H *Rosenhahnite*, C_6S_3H *gamma dellaite*, dan *afwillite*.

Reaksi hidrasi dari contoh uji semen dapat dilihat dari 2 sisi yaitu kristal semen yang bereaksi dan produk reaksi. Persen yang sudah bereaksi dihitung dengan rumusan sebagai berikut :

$$\text{Persen mineralogi yang bereaksi} = \frac{(\text{persen awal reaksi} - \text{persen akhir reaksi})}{\text{Persen awal reaksi}} \times 100$$

Untuk mempermudah pengamatan dan analisa ditampilkan tabel sebagai berikut :

Tabel 4.20 Fraksi mineralogi C₂S, C₃S, dan C₃A Pada Hidrasi 3 Hari

Umur 3 hari												
Nama Kristal	Blanko (% Wt)			Sampel variasi 1 (% Wt)			Sampel Variasi 2 (% Wt)			Sampel Variasi 3 (% Wt)		
	awal	Akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi
C ₂ S	19.10	0.36	98.12	15.53	0.23	98.52	15.25	0.17	98.88	15.02	0.13	99.13
C ₃ S	56.42	15.31	72.86	44.44	0.41	99.08	44.81	0.41	99.08	44.69	0.09	99.80
C ₃ A	8.10	3.09	61.83	6.38	0.11	98.28	6.23	0.07	98.88	6.46	0.01	99.85

Umur 3 hari												
Nama Kristal	Sampel variasi 4 (% Wt)			Sampel variasi 5 (% Wt)			Sampel Variasi 6 (% Wt)			Sampel Variasi 7 (% Wt)		
	awal	Akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	Awal	akhir	% reaksi
C ₂ S	15.11	0.19	98.74	15.12	0.18	98.81	15.08	0.17	98.87	15.12	0.42	97.22
C ₃ S	44.51	0.14	99.69	44.59	0.09	99.80	44.58	0.06	99.87	44.54	7.62	82.89
C ₃ A	6.43	0.03	99.53	6.37	0.03	99.53	6.40	0.03	99.53	6.41	4.74	26.05

Tabel 4.21 Fraksi mineralogi C₂S, C₃S, dan C₃A Pada Hidrasi 7 Hari

Umur 7 hari												
Nama Kristal	Blanko (% Wt)			Sampel variasi 1 (% Wt)			Sampel Variasi 2 (% Wt)			Sampel Variasi 3 (% Wt)		
	awal	Akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	Awal	akhir	% reaksi
C ₂ S	19.10	0.45	97.64	15.53	0.23	98.52	15.25	0.17	98.88	15.02	0.14	99.07
C ₃ S	56.42	13.09	76.80	44.44	0.55	98.76	44.81	0.41	99.08	44.69	0.05	99.89
C ₃ A	8.10	3.27	59.60	6.38	0.11	98.28	6.23	0.05	99.20	6.46	0.02	99.69

Umur 7 hari												
Nama Kristal	Sampel variasi 4 (% Wt)			Sampel variasi 5 (% Wt)			Sampel Variasi 6 (% Wt)			Sampel Variasi 7 (% Wt)		
	awal	Akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi
C ₂ S	15.11	0.19	98.74	15.12	0.19	98.74	15.08	0.18	98.81	15.12	0.46	96.96
C ₃ S	44.51	0.13	99.71	44.59	0.05	99.89	44.58	0.06	99.87	44.54	5.63	87.36
C ₃ A	6.43	0.03	99.53	6.37	0.02	99.69	6.40	0.03	99.53	6.41	4.86	24.18

Tabel 4.22 Fraksi mineralogi C₂S, C₃S, dan C₃A Pada Hidrasi 28 Hari

Umur 28 hari												
Nama Kristal	Blanko (% Wt)			Sampel variasi 1 (% Wt)			Sampel Variasi 2 (% Wt)			Sampel Variasi 3 (% Wt)		
	awal	Akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	Awal	akhir	% reaksi
C ₂ S	19.10	0.58	96.96	15.53	0.21	98.62	15.25	0.19	98.75	15.02	0.13	99.13
C ₃ S	56.42	10.77	80.91	44.44	0.52	98.83	44.81	0.37	99.17	44.69	0.03	99.93
C ₃ A	8.10	4.44	45.15	6.38	0.11	98.28	6.23	0.06	99.04	6.46	0.01	99.85
Umur 28 hari												
Nama Kristal	Sampel variasi 4 (% Wt)			Sampel variasi 5 (% Wt)			Sampel Variasi 6 (% Wt)			Sampel Variasi 7 (% Wt)		
	awal	Akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi	awal	akhir	% reaksi
C ₂ S	15.11	0.17	98.87	15.12	0.15	99.01	15.08	0.16	98.94	15.12	0.45	96.82
C ₃ S	44.51	0.09	99.80	44.59	0.01	99.98	44.58	0.03	99.93	44.54	7.53	83.09
C ₃ A	6.43	0.03	99.53	6.37	0.01	99.84	6.40	0.02	99.69	6.41	5.18	19.19

Perbandingan reaktivitas dari C₂S untuk umur pengujian awal 3 hari adalah sebagai berikut. Sampel uji semen blanko sebesar 98,12%, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.52%, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 98.81 – 99.15%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 97,22%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C₂S untuk umur pengujian 7 hari adalah sebagai berikut . Sampel uji semen blanko sebesar 97.64%, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.52%, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 98.74 – 99.07%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 96.02%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel

uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja

Perbandingan reaktivitas dari C2S untuk umur pengujian akhir 28 hari adalah sebagai berikut . Sampel uji semen blanko sebesar 96.96 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.64 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 98.75 – 99.13%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 97.02%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C3S adalah sebagai berikut . Untuk umur pengujian awal 3 hari sampel uji semen blanko sebesar 72.86 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 99.08 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 99.08 – 99.87%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 82.89%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C3S adalah sebagai berikut . Untuk umur pengujian 7 hari sampel uji semen blanko sebesar 76.80 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.76 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 99.08 – 99.89%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 87.36%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C3S adalah sebagai berikut . Untuk umur pengujian akhir 28 hari sampel uji semen blanko sebesar 80.91 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.83 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6

(semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 99.17 – 99.98%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 83.09%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C3A adalah sebagai berikut . Untuk umur pengujian awal 3 hari sampel uji semen blanko sebesar 61.83 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.28 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 98.85 – 99.85%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 26.05%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C3A adalah sebagai berikut . Untuk umur pengujian 7 hari sampel uji semen blanko sebesar 59.60 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.28 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 99.20 – 99.69%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 24.18%. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Perbandingan reaktivitas dari C3A adalah sebagai berikut . Untuk umur pengujian akhir 28 hari sampel uji semen blanko sebesar 45.15 %, sampel uji 1 (semen dengan tambahan trass 21%) 98.28 %, sampel uji 2 sampai sampel uji 6 (semen dengan variasi trass dan *limestone* 21%) memberikan hasil yang berkisar antara 99.04 – 99.84%, dan sampel uji 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) sebesar 19.19 %. Dari hasil reaktivitas diatas terlihat bahwa sampel uji semen dengan variasi *limestone* dan trass lebih baik reaktivitas dibanding dengan

sampel uji semen blanko dan sampel uji semen dengan hanya menambahkan *limestone* saja.

Dari hasil yang konsisten diatas memberikan indikasi dengan adanya *limestone* dan trass sebagai material tambahan pada semen akan mempercepat reaksi hidrasi C2S, hidrasi C3S, dan hidrasi C3A. Disamping itu juga terlihat untuk reaksi hidrasi C3A pada contoh uji semen blanko dan contoh uji semen 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%) semakin panjang umur pengujian, reaksi hidrasinya makin menurun . Contoh uji semen blanko mempunyai nilai 61.83 % pada 3 hari, 59.60 % pada 7 hari , 45.15 % pada 28 hari. Untuk contoh uji semen 7 memberikan nilai 26.05 % untuk 3 hari , 24.18 % untuk 7 hari dan 19.19% untuk umur pengujian 28 hari. Untuk contoh uji semen 1 memberikan nilai 98,28 % baik umur pengujian 3 hari, 7 hari, dan 28 hari. Untuk contoh uji semen 2 sampai contoh uji semen 6 memberikan hasil yang relatif sama, yaitu umur 3 hari bergerak antara 98.85 – 99.85%, untuk umur 7 hari bergerak antara 99.20 – 99.69%, dan untuk umur pengujian 28 hari bergerak antara 99.04 – 99.84%. Dari hasil ini memberikan petunjuk, bahwa untuk untuk contoh uji semen blanko dan contoh uji semen 7 optimum reaksi hidrasi C3A sebelum 3 hari, dan untuk contoh uji semen 1 sampai contoh uji semen 6 optimum reaksi hidrasi pada C3A umur 3 sampai 28 hari.

Produk hasil reaksi semen adalah CSH dan CH yang merupakan reaksi C2S atau C3S dengan air, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ untuk reaksi C4AF dengan air, *ettringite* untuk reaksi *gypsum* dengan air, dan *monosulphate* yang merupakan reaksi lanjut C3A dengan *ettringite*. Hasil reaksi mineral – mineral di atas dicantumkan tabel di bawah ini.

Tabel 4.23 Mineralogi hasil reaksi sampel uji semen dengan air pada umur 3 hari

Umur 3 hari								
Senyawa Hasil	Hasil Hidrasi (persen berat)							
	Blanko	Pasta 1	Pasta 2	Pasta 3	Pasta 4	Pasta 5	Pasta 6	Pasta 7
Portlandite	6.51	4.27	3.22	1.81	3.24	2.00	2.01	6.80
Ettringite	1.14	8.75	11.52	8.60	17.96	13.22	18.65	1.74
Monosulphate	0.06	7.44	20.97	0.32	0.39	0.39	0.37	7.15
C2SH	8.68	4.56	0.10	14.64	0.72	0.30	6.54	0.26
C3S3H	23.61	0.03	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	11.73
C6S3H	26.71	48.76	42.41	46.43	48.08	54.44	42.69	25.24
Afwillite	0.00	0.00	0.00	4.22	0.00	0.12	1.80	0.00
Goethite	5.62	8.86	6.77	7.02	10.12	9.57	8.24	8.38
Total CSH	59.00	53.34	42.52	65.35	48.80	54.85	51.03	37.23

Tabel 4.24 Mineralogi hasil reaksi sampel uji semen dengan air pada umur 7 hari

Umur 7 hari								
Senyawa Hasil	Hasil Hidrasi (persen berat)							
	Blanko	Pasta 1	Pasta 2	Pasta 3	Pasta 4	Pasta 5	Pasta 6	Pasta 7
Portlandite	5.21	4.17	3.67	1.47	2.96	1.39	1.87	5.50
Ettringite	0.94	8.50	8.54	8.18	15.78	10.68	16.34	0.12
Monosulphate	0.04	7.38	12.18	0.38	0.43	0.41	0.36	4.79
C2SH	13.33	1.96	0.46	26.04	1.06	3.75	7.75	0.04
C3S3H	17.84	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	8.97
C6S3H	27.67	49.94	40.67	38.61	48.61	54.60	38.72	29.54
Afwillite	0.00	0.00	3.16	0.00	1.19	0.00	1.43	0.00
Goethite	7.45	8.96	7.49	7.06	9.61	10.20	9.66	9.71
Total CSH	58.84	51.94	44.29	64.65	50.86	58.35	47.89	38.55

Tabel 4.25 Mineralogi hasil reaksi sampel uji semen dengan air pada umur 28 hari

Umur 28 hari								
Senyawa Hasil	Hasil Hidrasi (persen berat)							
	Blanko	Pasta 1	Pasta 2	Pasta 3	Pasta 4	Pasta 5	Pasta 6	Pasta 7
Portlandite	6.03	3.24	4.40	1.33	2.35	0.55	1.72	5.54
Ettringite	0.37	5.47	6.03	12.16	14.49	19.29	21.11	0.23
Monosulphate	0.05	6.41	8.41	0.30	0.45	0.35	0.33	9.18
C2SH	12.10	0.44	5.37	36.43	3.82	3.67	11.14	0.04
C3S3H	19.33	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.37
C6S3H	28.12	53.03	36.86	27.47	46.49	44.64	32.08	24.88
Afwillite	0.06	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.02	0.00
Goethite	2.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60
Total CSH	59.61	53.51	42.23	64.33	50.30	48.31	43.24	29.28

Pada pengujian umur 3 hari, CSH total adalah sebagai berikut. Pada sampel uji semen blanko memberikan nilai 59.00%, untuk sampel uji semen 1 sebesar 53.34%, sampel uji semen 2 sampai sampel uji semen 6 mempunyai nilai berkisar antara 42,52% - 65.35%, dengan mencapai optimum pada sampel uji semen 3 sebesar 65.35%, dan sampel uji semen 7 memberikan nilai 37.23%. Berdasarkan kristal CSH yang terbentuk, untuk sampel uji semen blanko didominasi C6S3H, C3S3H, dan C2SH. Sampel uji semen 1, sampel uji semen 3, dan sampel uji semen 6 didominasi kristal C6S3H dan C2SH. Sampel uji semen 2, sampel uji semen 4 dan sampel uji semen 5 didominasi C6S3H. Pada sampel uji semen 7 didominasi C6S3H dan C3S3H. Dari hasil tersebut memberikan indikasi reaksi hidrasi optimum pada sampel uji semen 3 diikuti sampel uji semen blanko, kemudian dilanjutkan sampel uji semen yang merupakan variasi *limestone* dan trass selain sampel uji semen 3, dan terakhir sampel uji semen 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%).

Pada pengujian umur 7 hari, CSH total adalah sebagai berikut. Pada sampel uji semen blanko memberikan nilai 58.84%, untuk sampel uji semen 1 sebesar 51.94%, sampel uji semen 2 sampai sampel uji semen 6 mempunyai nilai berkisar antara 44.29% - 64.65%, dengan mencapai optimum pada sampel uji semen 3 sebesar 64.65%, dan sampel uji semen 7 memberikan nilai 38.55%.

Berdasarkan kristal CSH yang terbentuk, untuk sampel uji semen blanko didominasi C6S3H, C3S3H, dan C2SH. Sampel uji semen 1, sampel uji semen 3, dan sampel uji semen 6 didominasi kristal C6S3H dan C2SH. Sampel uji semen

2, sampel uji semen 4 dan sampel uji semen 5 didominasi C6S3H. Pada sampel uji semen 7 didominasi C6S3H dan C3S3H. Dari hasil tersebut memberikan indikasi reaksi hidrasi optimum pada sampel uji semen 3 diikuti sampel uji semen blanko, kemudian dilanjutkan sampel uji semen yang merupakan variasi *limestone* dan trass selain sampel uji semen 3, dan terakhir sampel uji semen 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%).

Pada pengujian umur 28 hari, CSH total adalah sebagai berikut. Pada sampel uji semen blanko memberikan nilai 59.61%, untuk sampel uji semen 1 sebesar 53.51%, sampel uji semen 2 sampai sampel uji semen 6 mempunyai nilai berkisar antara 42.23% - 64.33%, dengan mencapai optimum pada sampel uji semen 3 sebesar 64.33%, dan sampel uji semen 7 memberikan nilai 29.28%. Berdasarkan kristal CSH yang terbentuk, untuk sampel uji semen blanko didominasi C6S3H, C3S3H, dan C2SH. Sampel uji semen 1, sampel uji semen 3, dan sampel uji semen 6 didominasi kristal C6S3H dan C2SH. Sampel uji semen 2, sampel uji semen 4 dan sampel uji semen 5 didominasi C6S3H. Pada sampel uji semen 7 didominasi C6S3H dan C3S3H. Dari hasil tersebut memberikan indikasi reaksi hidrasi optimum pada sampel uji semen 3 diikuti sampel uji semen blanko, kemudian dilanjutkan sampel uji semen yang merupakan variasi *limestone* dan trass selain sampel uji semen 3, dan terakhir sampel uji semen 7 (semen dengan penambahan *limestone* 21%).

Hasil yang konsisten pada sampel uji semen 3 (semen dengan penambahan trass 14% dan *limestone* 7%) memberikan petunjuk bahwa sampel ini mempunyai reaksi hidrasi yang paling tinggi baik dibandingkan dengan hidrasi sampel uji semen blanko, hidrasi sampel uji semen 1 (semen dengan penambahan trass 21%), sampel uji semen dengan variasi yang lain maupun sampel uji semen 7 (semen dengan penambahan trass 21%). Hasil yang optimum ini disebabkan peran *limestone* sebagai zat yang mempercepat reaksi posolan trass. Tanpa adanya trass, *limestone* tidak berfungsi sebagai akselerator reaksi hidrasi, sehingga terlihat hasil hasil produk CSH yang kecil.

4.5 Reaksi Hidrasi Sampel Uji Ditinjau Dengan Pengamatan SEM

Fasa *CSH* merupakan campuran fasa kristalin dan non kristalin yang sampai saat ini belum diketahui secara pasti mineralnya. Macam-macam *CSH* yang teramati dengan metode SEM yaitu spongy *CSH* dan Fibrous *CSH* (Shondeep L. Sarkar, 1989), Fibrous *CSH* dan Plate *CSH* (Dienemann W, 2007). Kalsium Silikat Hidrat menurut (Vera, 2006) berbentuk jarum atau batang. Hasil fasa – fasa yang teramati dengan pengamatan SEM terangkum di bawah ini.

Tabel 4.26 Mikrostruktur sampel uji umur pengujian 3 hari

Nama Sampel uji	Gambaran Mikrostruktur Kristal Sampel Uji
Sampel blanko	40 % nukleus <i>CSH</i> , 50% semen belum terhidrasi, 10% pori-pori
Sampel 1	40 % nukleus <i>CSH</i> , 60% semen belum terhidrasi
Sampel 2	30 % nukleus <i>CSH</i> , 70% semen belum terhidrasi
Sampel 3	20 % nukleus <i>CSH</i> , 80% semen belum terhidrasi
Sampel 4	20 % nukleus <i>CSH</i> , 80% semen belum terhidrasi
Sampel 5	20 % nukleus <i>CSH</i> , 80% semen belum terhidrasi
Sampel 6	10 % nukleus <i>CSH</i> , 80% semen belum terhidrasi
Sampel 7	10 % nukleus <i>CSH</i> , 90% semen belum terhidrasi

Tabel 4.27 Mikrostruktur sampel uji umur pengujian 7 hari

Nama Sampel uji	Gambaran Mikrostruktur Kristal Sampel Uji
Sampel blanko	40% <i>CSH</i> batang, 30% <i>CSH</i> Plat, 30% nukleus <i>CSH</i>
Sampel 1	90 % nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 2	10% <i>CSH</i> Plat, 50% nukleus <i>CSH</i> , 40% semen belum terhidrasi
Sampel 3	10% <i>CSH</i> Plat, 80 % nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 4	20% <i>CSH</i> Plat, 70 % nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 5	90 % nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 6	90 % nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 7	20 % nukleus <i>CSH</i> , 80% semen belum terhidrasi

Tabel 4.28 Mikrostruktur sampel uji umur pengujian 28 hari

Nama Sampel uji	Gambaran Mikrostruktur Kristal Sampel Uji
Sampel blanko	60% <i>CSH</i> plat, 20% ettringite, 20% pori-pori
Sampel 1	20% <i>CSH</i> batang, 50% <i>CSH</i> plat, 30% pori-pori
Sampel 2	20% <i>CSH</i> jarum, 30% <i>CSH</i> plat, , 40% nukleus <i>CSH</i> , 10% pori
Sampel 3	40% <i>CSH</i> Plat, 50% <i>CSH</i> batang , 10% pori-pori
Sampel 4	60% <i>CSH</i> Plat, 30% <i>CSH</i> batang , 10% pori-pori
Sampel 5	70% <i>CSH</i> batang , 20% nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 6	30% <i>CSH</i> batang , 60% nukleus <i>CSH</i> , 10% pori-pori
Sampel 7	20% <i>CSH</i> Plat, 60% semen belum terhidrasi, 20% pori-pori

Penentuan persentase mikrostruktur kristal ini berdasarkan pengamatan (*visual*) sehingga persentase kesalahan masih cukup tinggi. Kuantitatif berdasar pengamatan ini dipakai untuk memudahkan mengambil kesimpulan hidrasi pada sampel contoh semen.

Sampel uji semen pada umur 3 hari secara umum masih didominasi oleh semen yang belum terhidrasi. *Nukleus* CSH cukup banyak pada pada sampel uji semen blanko dan sampel uji semen 1 (semen dengan campuran trass 21%). Semen dengan penambahan limestone makin banyak menunjukkan gejala makin berkurangnya nukleus CSH dan makin bertambahnya semen belum terhidrasi.

Pada umur pengujian 7 hari , mulai terlihat adanya CSH yaitu pada sampel semen blanko yaitu CSH plat dan CSH batang sekitar 70%, dengan nukleus CSH sekitar 30%. Untuk semen dengan bahan tambahan *limestone* dan trass terlihat pada sampel uji semen 2, sampel uji semen 3, dan sampel uji semen 4. Sampel uji semen 1, sampel uji semen 5, dan sampel uji semen 6 didominasi dengan nukleus CSH sekitar 90%. Pada sampel uji semen 7 masih didominasi oleh semen yang belum terhidrasi yang memiliki persentase kurang lebih 80% dan baru ada *nukleus* CSH sekitar 20%.

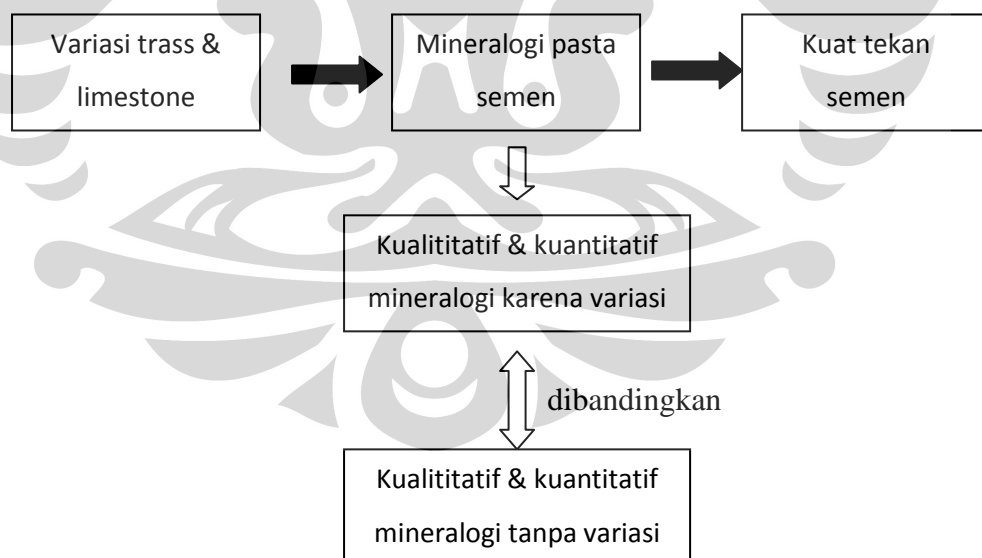
Pengujian untuk umur 28 hari memberikan hasil sebagai berikut. Sampel semen blanko memiliki CSH plat yang berpori dengan dikelilingi jarum-jarum kecil (*ettringite*) dengan persentase dua bagian ini yaitu 80%. Sampel semen 2 didominasi oleh CSH jarum dan plat sekitar 50% dan 40% nukleus CSH. Sampel semen 3 dan semen 4 didominasi oleh CSH batang dan plat mencapai persentase kurang lebih 90%. Perbedaan sampel semen 3 dan sampel semen 4 yaitu pada sampel semen 3 lebih banyak CSH batang dan pada sampel semen 4 lebih banyak CSH Plat. Pada sampel 5 terdapat kurang lebih 70% CSH batang, sampel 6 terdapat 30% CSH batang dan 60% nukleus CSH. Sampel semen 7 masih didominasi dengan semen yang belum terhidrasi 70% dan baru terbentuk CSH plat sekitar 20%.

Secara umum dapat digambarkan reaksi hidrasi semen belum terlihat pada umur awal pengujian yaitu 3 hari. Pada tahap ini baru terbentuk embrio CSH yang paling terlihat pada sampel semen blanko dan sampel semen 1. Pada umur

pengujian lebih lanjut yaitu 7 hari, reaksi hidrasi semen masih dipegang semen blanko dengan persentase terbentuk CSH kurang lebih 70%. Reaksi hidrasi juga mulai terlihat pada sampel uji semen 2, sampel uji semen 3, dan sampel semen 4. Pada sampel uji selain ini masih dalam tahap memperbanyak embrio CSH. Pada umur 28 hari terlihat adanya peran variasi *limestone* dan *trass*, yang terbukti pada persentase CSH yang mencapai 90%. Pada sampel semen blanko tidak terlihat adanya penambahan CSH tetapi terlihat adanya fasa CSH plat yang dikelilingi dengan *ettringite*.

4.6 Pengaruh Variasi Trass dan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen dilihat dari mineralogi dalam pasta semen

Uji kekuatan mekanik adalah cara termudah untuk melihat hasil akhir dari reaksi hidrasi semen dengan air. Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap kuat tekan ini diantara komposisi awal dari semen sewaktu mau direaksikan dengan air, kehalusan butiran, reaksi hidrasi semen, fasa-fasa atau kristal yang terbentuk sebagai hasil hidrasi semen. Untuk mempermudah melihat pengaruh variasi Trass dan limestone digambarkan dengan skema di bawah ini :



Dari skema tersebut, dapat dijelaskan bahwa variasi Trass dan Limestone akan menyebabkan perubahan secara kualitatif dan kuantitatif mineralogi pada pasta semen, yang mana akan berpengaruh terhadap kuat tekan semen. Uraian yang menjadi penyebab perbedaan kuat tekan antara semen dengan variasi trass

dan limestone dan semen tanpa variasi trass dan limestone diterangkan dibawah ini.

Pada umur pengujian 3 hari terlihat untuk sampel uji semen blanko jauh lebih tinggi kuat tekannya dibandingkan dengan semen yang ditambahkan dengan limestone maupun trass. Sampel uji semen blanko memberikan hasil kuat tekan 261 kgf/cm², sampel uji semen 3 memberikan hasil kuat tekan 224 kgf/cm², sampel semen 6 memberikan hasil kuat tekan 220 kgf/cm², sedangkan variasi yang lain memberikan nilai kuat tekan dibawah itu.

Hasil kuat tekan umur 3 hari ini diperkirakan banyak dipengaruhi oleh fase kristal yang terbentuk. Walaupun secara reaksi hidrasi semen dengan tambahan variasi limestone dan trass lebih tinggi dilihat dari C3S, C2S, dan C3A yang bereaksi tetapi ada perbedaan yang terlihat pada fasa-fasa kristal yang terbentuk. Pada semen blanko fasa CSH yang terbentuk terdiri dari C2SH = 8.68%, C3S3H = 23.61%, C6S3H = 26.71% dan *afwillite* = 0.00%. Untuk sampel semen 3 memberikan fasa fasa CSH yang terdiri dari C2SH = 14.64%, C3S3H = 0.07%, C6S3H = 46.08% dan *afwillite* = 0.00%. Untuk sampel semen 6 memberikan fasa fasa CSH yang terdiri dari C2SH = 6.54%, C3S3H = 0.00%, C6S3H = 42.69% dan *afwillite* = 1.80%. Fasa C3S3H diperkirakan memberikan kontribusi terhadap kuat tekan lebih tinggi daripada fasa C6S3H.

Untuk perbandingan pada variasi penambahan limestone dan trass terlihat bahwa sampel uji semen 3 lebih tinggi nilai kuat tekannya karena kumulatif fasa-fasa CSH yang terbentuk jauh lebih tinggi dari yang lainnya. Sampel uji semen CSH total = 65.35% sedangkan CSH yang lainnya di bawah 54.85%.

Pengujian pada umur 7 hari terlihat untuk sampel uji semen blanko jauh lebih tinggi kuat tekannya dibandingkan dengan semen yang ditambahkan dengan limestone maupun trass. Sampel uji semen blanko memberikan hasil kuat tekan 352 kgf/cm², sampel uji semen 3 memberikan hasil kuat tekan 281 kgf/cm², sampel semen 6 memberikan hasil kuat tekan 277 kgf/cm², sedangkan variasi yang lain memberikan nilai kuat tekan dibawah itu.

Sebagaimana pada umur 3 hari, hasil kuat tekan umur 7 hari diperkirakan banyak dipengaruhi oleh fase kristal yang terbentuk. Pada semen blanko fasa CSH yang terbentuk terdiri dari C2SH = 13.33%, C3S3H = 17.84%, C6S3H =

27.67% dan *afwillite* = 0.00%. Untuk sampel semen 3 memberikan fasa fasa CSH yang terdiri dari C2SH = 26.04%, C3S3H = 0.01%, C6S3H = 38.61% dan *afwillite* = 0.00%. Untuk sampel semen 6 memberikan fasa fasa CSH yang terdiri dari C2SH = 7.75%, C3S3H = 0.00%, C6S3H = 38.72% dan *afwillite* = 1.43%. Fasa C3S3H diperkirakan memberikan kontribusi terhadap kuat tekan lebih tinggi daripada fasa C6S3H.

Untuk perbandingan pada variasi penambahan limestone dan trass umur 7 hari terlihat bahwa sampel uji semen 3 lebih tinggi nilai kuat tekannya karena kumulatif fasa-fasa CSH yang terbentuk jauh lebih tinggi dari yang lainnya. Sampel uji semen CSH total = 64.65% sedangkan CSH yang lainnya di bawah 58.35%. Secara pengamatan SEM juga terlihat bahwa pada sampel uji blanko CSH sekitar 70%, untuk sampel uji 2, sampel uji 3, sampel uji 4 sudah mulai terlihat CSH 10-20%, sampel uji yang lainnya baru tahap embrio CSH.

Pengujian pada umur 28 hari terlihat untuk sampel uji semen blanko jauh lebih tinggi kuat tekannya dibandingkan dengan semen yang ditambahkan dengan limestone maupun trass. Sampel uji semen blanko memberikan hasil kuat tekan 448 kgf/cm², sampel uji semen 3 memberikan hasil kuat tekan 365 kgf/cm², , sedangkan variasi yang lain memberikan nilai kuat tekan dibawah itu. Sebagaimana pada umur 7 hari , hasil kuat tekan ini diperkirakan banyak dipengaruhi oleh fase kristal yang terbentuk. Pada semen blanko fasa CSH yang terbentuk terdiri dari C2SH = 12.10%, C3S3H = 19.33%, C6S3H = 28,12% dan *afwillite* = 0.06%.

Untuk sampel semen 3 memberikan fasa fasa CSH yang terdiri dari C2SH = 36.43%, C3S3H = 0.00%, C6S3H = 27.47% dan *afwillite* = 0.44%. Fasa C3S3H diperkirakan memberikan kontribusi terhadap kuat tekan lebih tinggi daripada fasa C6S3H. Untuk perbandingan pada variasi penambahan limestone dan trass terlihat bahwa sampel uji semen 3 lebih tinggi nilai kuat tekannya karena kumulatif fasa-fasa CSH yang terbentuk jauh lebih tinggi dari yang lainnya. Sampel uji semen CSH total = 64.33% sedangkan CSH yang lainnya di bawah 53.51%.

Secara pengamatan SEM juga terlihat bahwa pada sampel uji blanko terlihat memiliki fasa CSH berbeda dengan sampel uji semen yang lain, yaitu

berbentuk plat dengan bulu-bulu halus dengan dikelilingi oleh *ettringite*. Persentase CSH dan *ettringite* sekitar 80%. Sampel semen 3 lebih tinggi CSH yang terbentuk yaitu sebesar 90% yang terdiri 40% CSH Plat dan 50% CSH batang. Untuk variasi yang lain CSH yang terbentuk kurang dari itu, bahkan untuk sampel uji 7 masih didominasi oleh semen yang belum terhidrasi.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari data data penelitian dan pembahasan sebelumnya dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penambahan Trass dan Limestone akan menurunkan kuat tekan semen baik pada umur 3 hari, 7 hari maupun 28 hari. Hasil ini disebabkan sedikitnya fase kristal Rosenhandrite dibandingkan pada semen tanpa penambahan trass dan limestone dengan pengamatan X-RD. Pada pengamatan SEM pada penambahan Trass dan Limestone terbentuk CSH berbentuk plat sedangkan semen tanpa penambahan Trass dan Limestone terbentuk Plat dengan bulu bulu lembut dan terbentuk ettringite. Kedua faktor diatas diperkirakan memberikan kontribusi terhadap perbedaan kuat tekan pada semen dengan variasi Trass dan Limetone dan semen tanpa Trass dan Limestone.
2. Terbentuknya mineral CSH dalam bentuk kristal Rosenhandrite, C₂SH alpha, C₆SH₃ Gamma Dellaite, dan afwillite pada pengamatan X-RD dan terbentuk mineral CSH yang berbentuk plat dan / atau batang, jarum pada pengamatan dengan SEM.

5.2 Saran

1. Pada pengujian X-RD akan lebih baik jika fasa-fasa hidrogarnet dari reaksi C₄AF dan C₃A dengan air bisa dimasukkan sebagai fasa-fasa hasil reaksi semen dengan air
2. Pembuatan sampel pasta untuk pengujian X-RD sebaiknya dibuat untuk masing-masing variasi dari sampel uji lebih dari 2 sehingga bisa dipilih sampel yang permukaannya paling halus, tidak adanya pori sehingga memberikan data X-RD yang lebih baik.
3. Perlu penelitian lebih lanjut tentang pengaruh fasa-fasa hasil hidrasi semen terhadap kuat tekan semen

DAFTAR REFERENSI

- Arnold, E. (Pub), *The Chemistry of Cement and Concrete*, The Gresham Press, London, Ed. 3, 1970
- ASTM C 109/C 109M - 02, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, ASTM International, USA, Vol 04.01, 2005
- ASTM C 150-04a^{c1}, *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM International, USA, Vol 04.01, 2005
- ASTM C 187-04, *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM International, USA, Vol 04.01, 2005
- ASTM C 305, *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM International, USA, Vol 04.01, 2005
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., and Rob P. Polder, *Corrosion of steel in Concrete*, Verlag GmbH & Co. KGaA, Part I Properties of Cementitious Material, Weinheim, 2004
- Bye, G.C., *Portland Cement, Composition, Production, and Properties*, Pergamon Press, Ed. 1, 1983
- Deja, J., *Influence of The Type and Concentration of Sodium Alkali Activator on The Hydration Process of Blast Furnace Slag*, 12th International Congress on The Chemistry of Cement, Montreal Canada, 8-13 July 2007
- Dienemann, W., *Technical Seminar Clinker Mineralogy and Cement Chemistry*, Heidelberg Technology Center, Ed. 10, 2007
- DIN 1164-1, *Cement Composition and Requirement*, Deutsche Norm, 1994
- Donald, H. Campbell, *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker*, Construction Technology Laboratories, USA, 1986
- Dratva, T., *Fundamental of Concrete Technology*, Material Technology II, Cement Seminar, Holderbank, 1996.
- H.Pollman, *Characterization of Different Water Contents of Ettringite and Kuzelite*, 12th International Congres On The Chemistry of Cement, Material Canada, 8-13 July 2007.

- Hegde, S.B., and Chelladurai, P., *An Investigation on Enhancing Blast Furnace Slag Content in Portland Slag Cement through Alkali Activation*, 12th International Congress on The Chemistry of Cement, Montreal Canada, 8-13 July 2007
- Luca Bertolini, Bernhard Elsener, Pietro Pedferri, Rob P Polder, *Corrosion of Steel in Concrete, Part I Properties of Cementitious Materials*, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, KGaA, Weinheim, 2004.
- Magallanes-Rivera R.X., Escalante-Garcia, A., and Gorokhovskiy, A. , *Waste Gypsum-Activated Blast Furnace Slag Composites : Effect of Aggregate Type on Strength Development*, 12th International Congress on The Chemistry of Cement, Montreal Canada, 8-13 July 2007
- Shondeep L, Sarkar, *Microstructural Investigation of Strength Loss in A Type 10 Cement*, Proceedings of The Eleventh International Conference on Cement Microscopy, New Orleans Louisiana, 10-13 April, 1989.
- Vera. I , *Pengaruh Substitusi Cementitious Material Fly Ash, Trass, dan Limestone dalam Semen Portland terhadap Mekanisme Reaksi Hidrasi*, FMIPA UI, Tesis, 2006
- Walter, H. Duda, *Cement – Data – Book*, Bouverlag GMBH, Berlin, V.1, Rev. 3, 1985
- Wang, S. and Victor, C. Li, *Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash*, *ACI Materials Journal*, No. 104-M25, May-june 2007
- Yuksel, I. and Genc, A., *Properties of Concrete Containing Nonground Ash and Slag as Fine Agregate*, *ACI Materials Journal*, No. 104-M44, July-August 2007

LAMPIRAN 1
FOTO PERALATAN ALAT GRINDING



LAMPIRAN 2
FOTO PERALATAN COMPRESSIVE MACHINE DAN X-RF

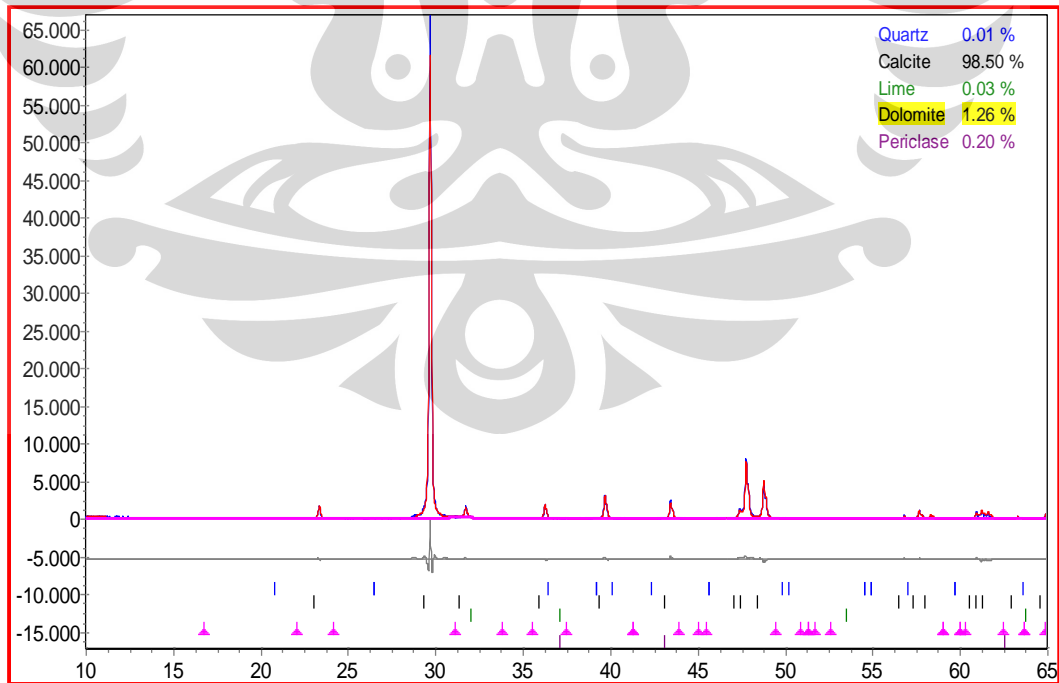
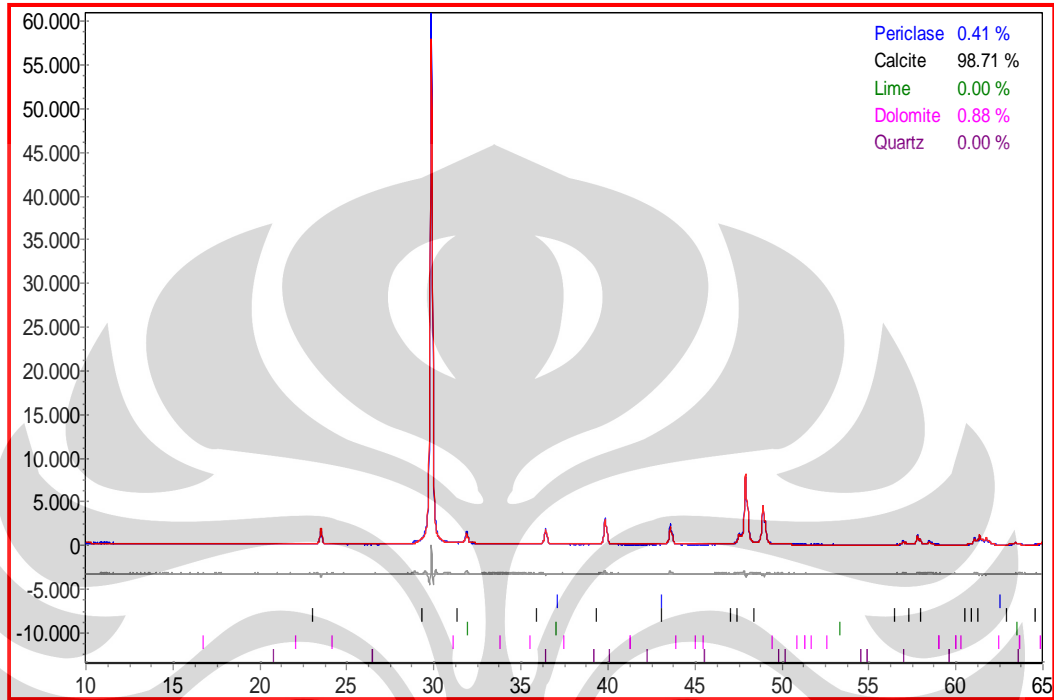


LAMPIRAN 3
FOTO PERALATAN X-RD DAN CUBE MOLD



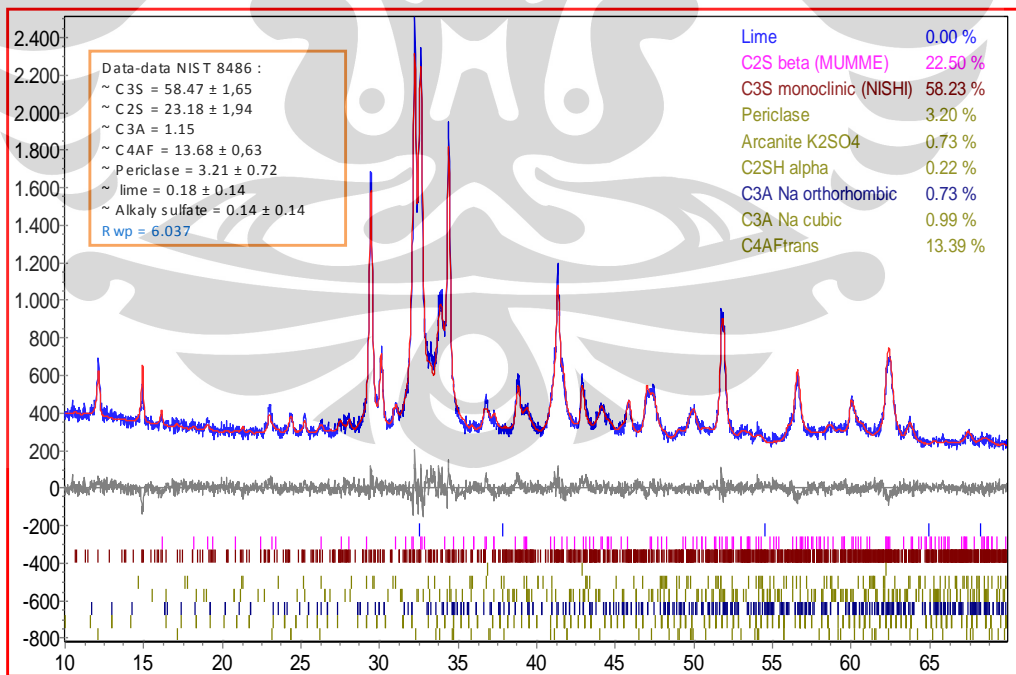
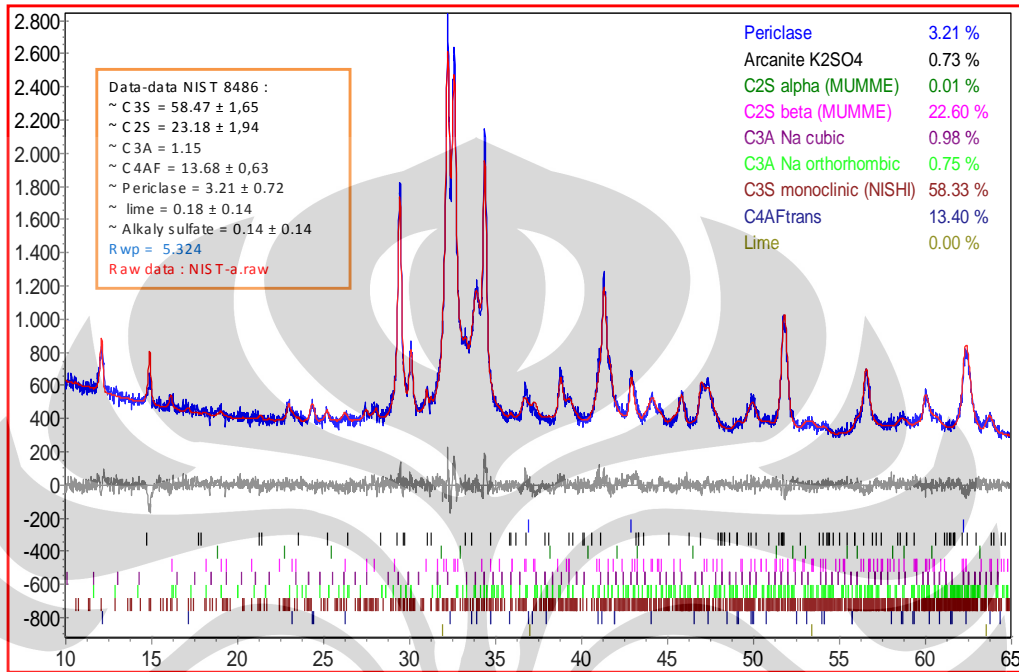
LAMPIRAN 4

DATA RUNNING CALCITE STANDAR



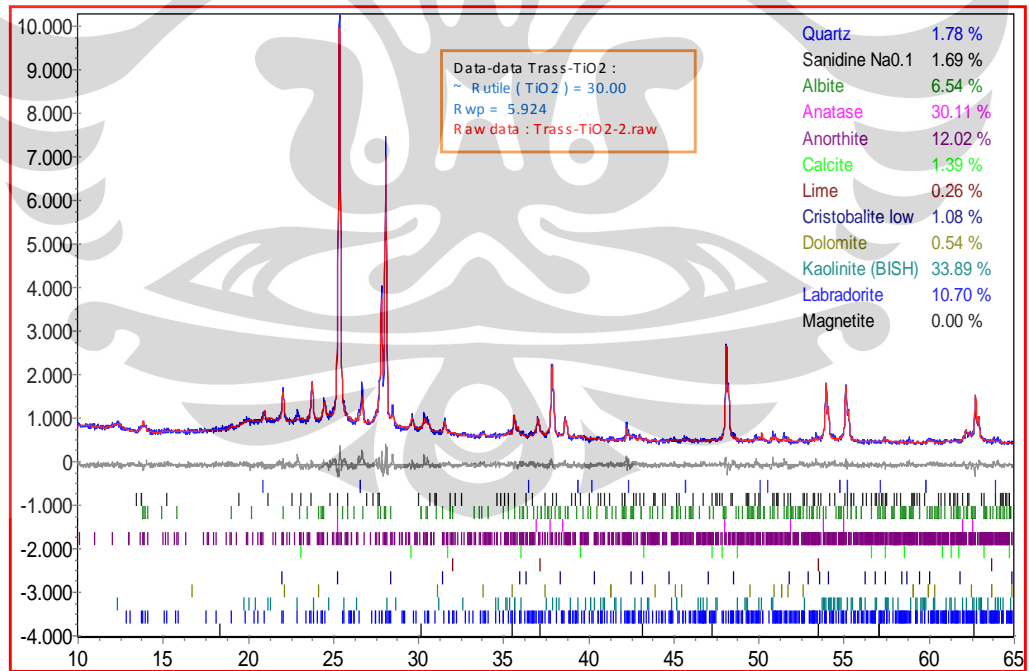
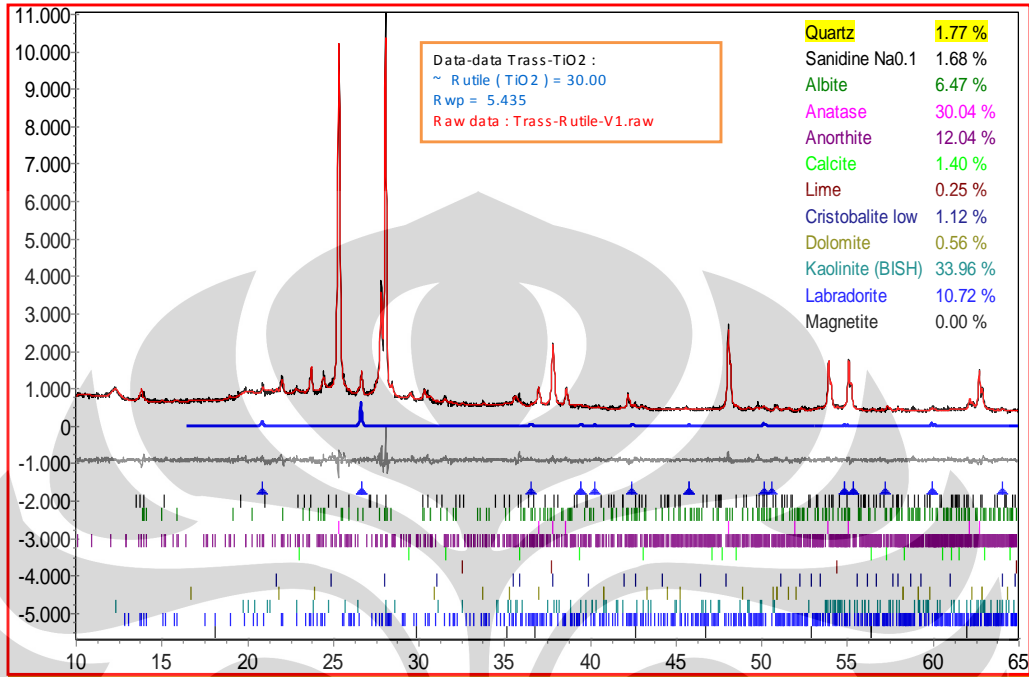
LAMPIRAN 5

DATA RUNNING NIST - 8486



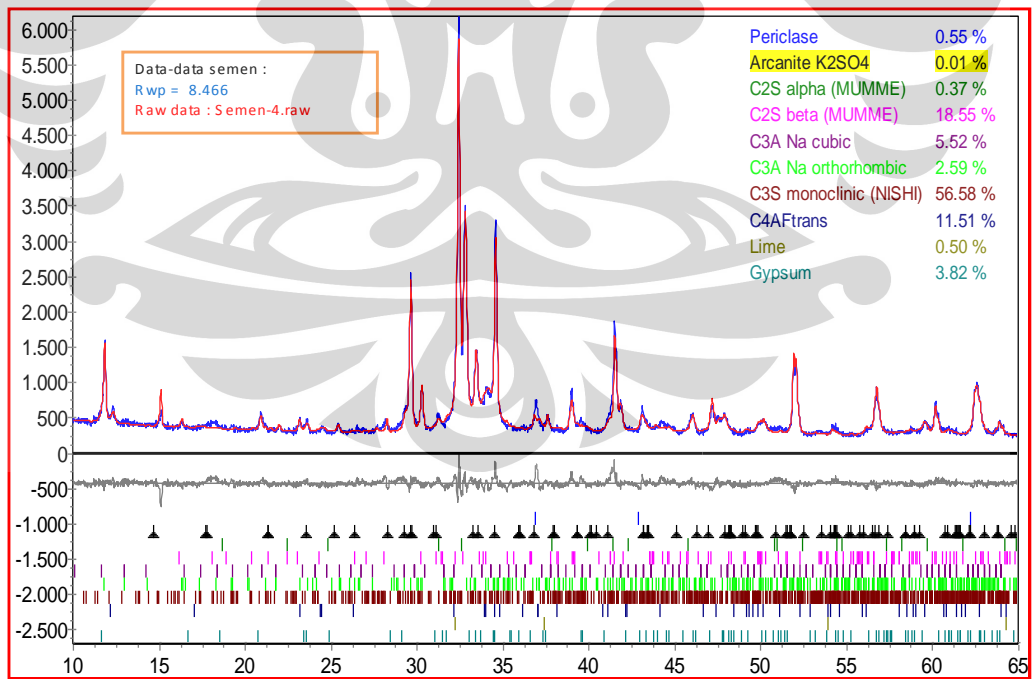
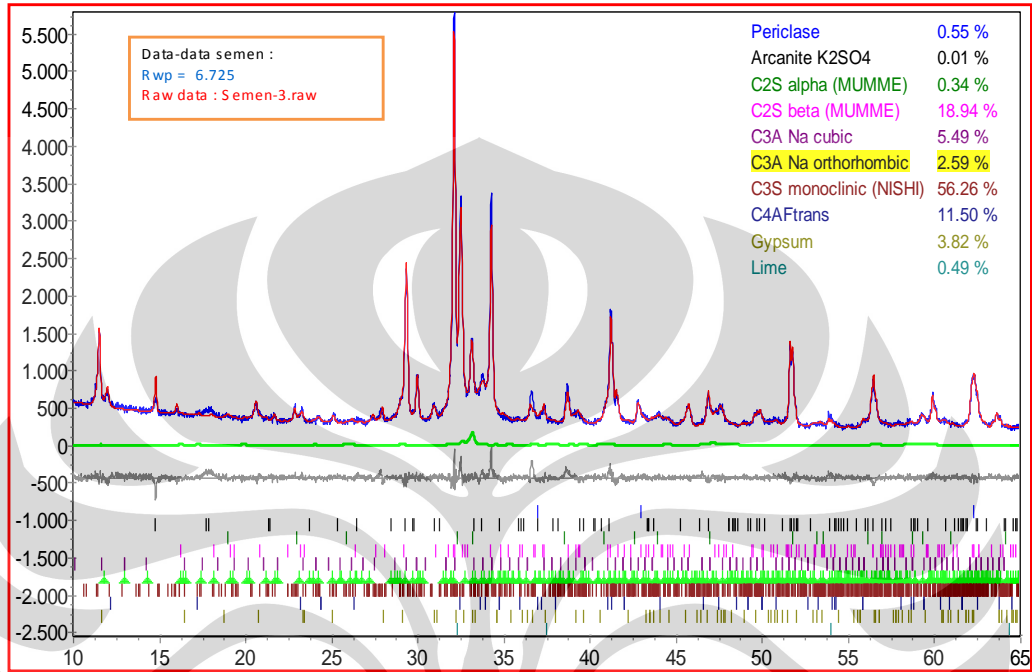
LAMPIRAN 6

DATA RUNNING Trass-TiO2



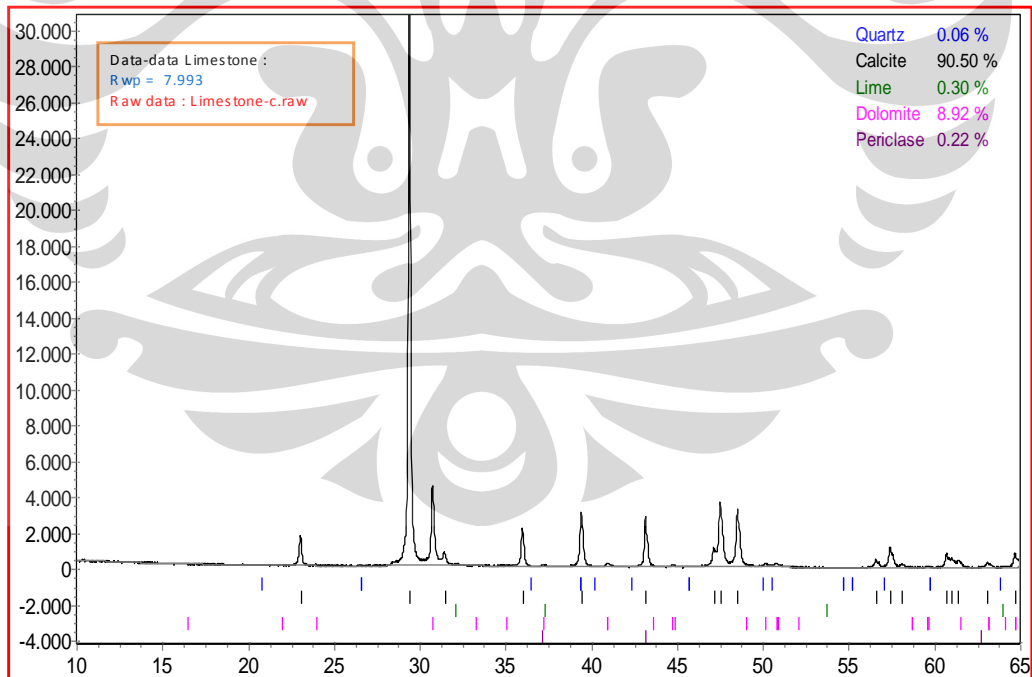
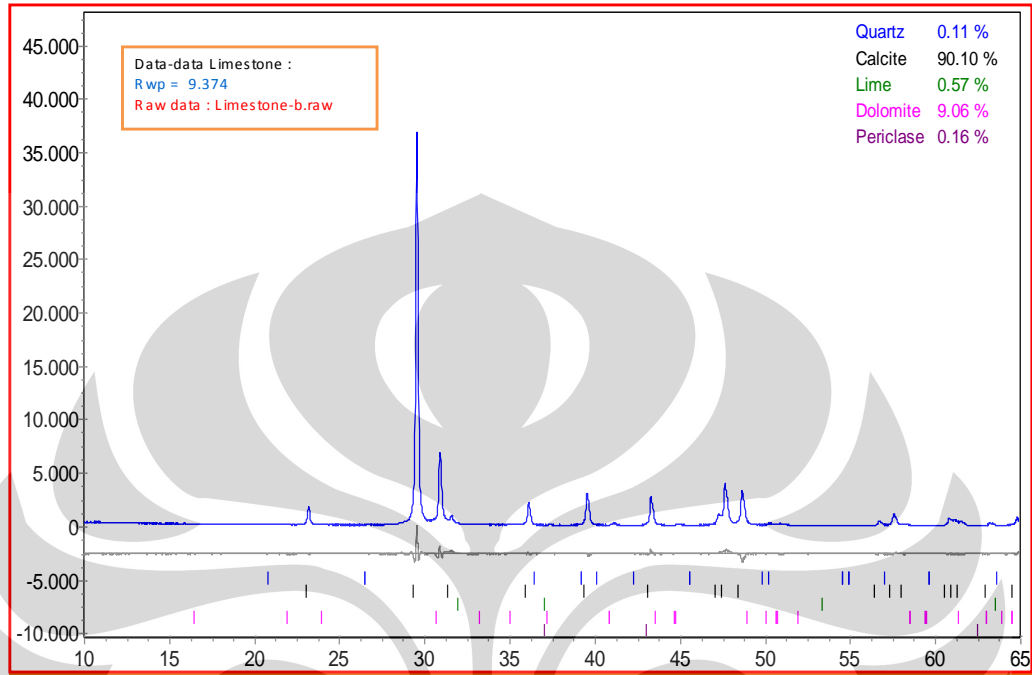
LAMPIRAN 7

DATA RUNNING SEMEN



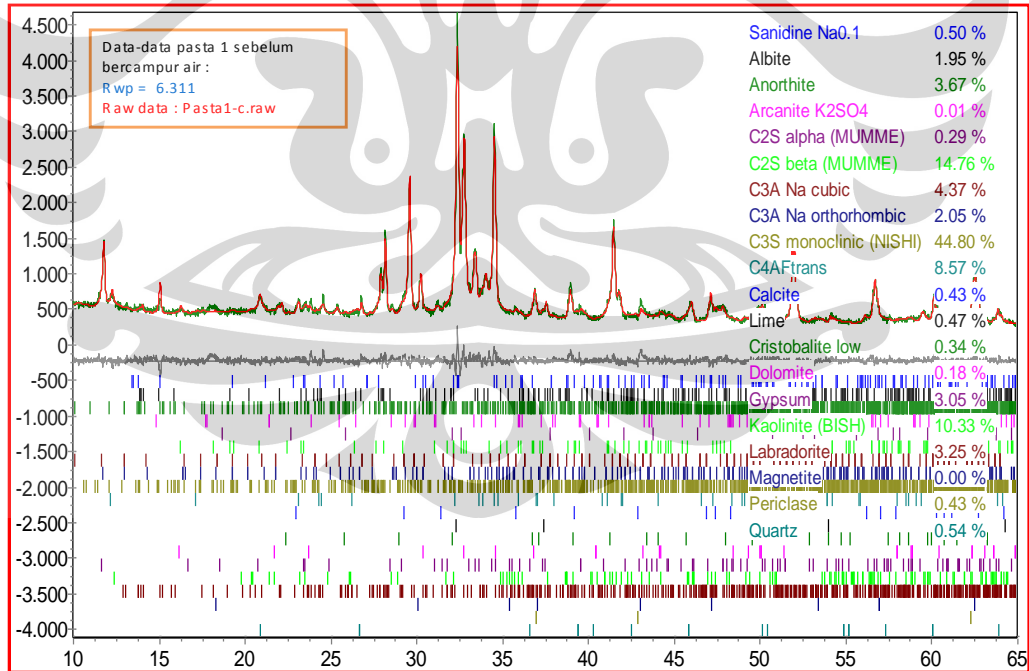
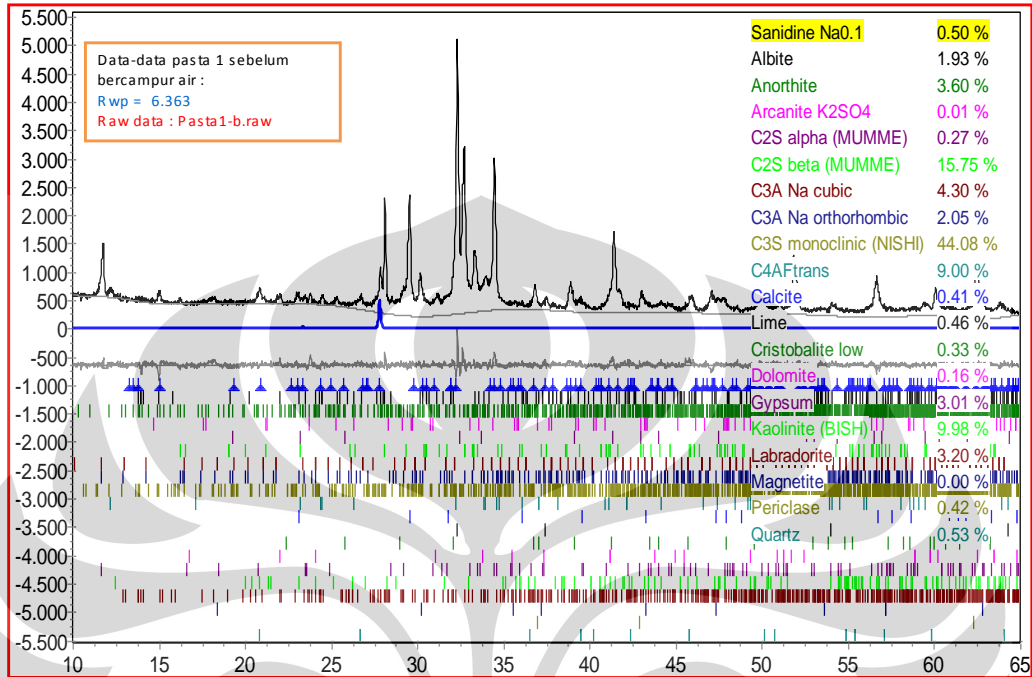
LAMPIRAN 8

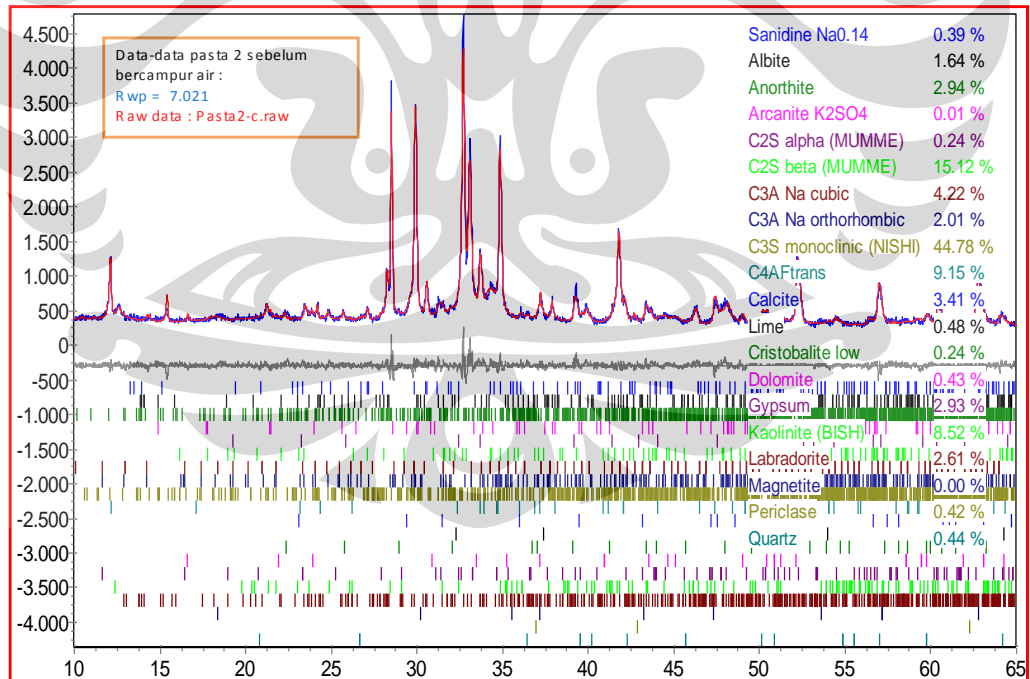
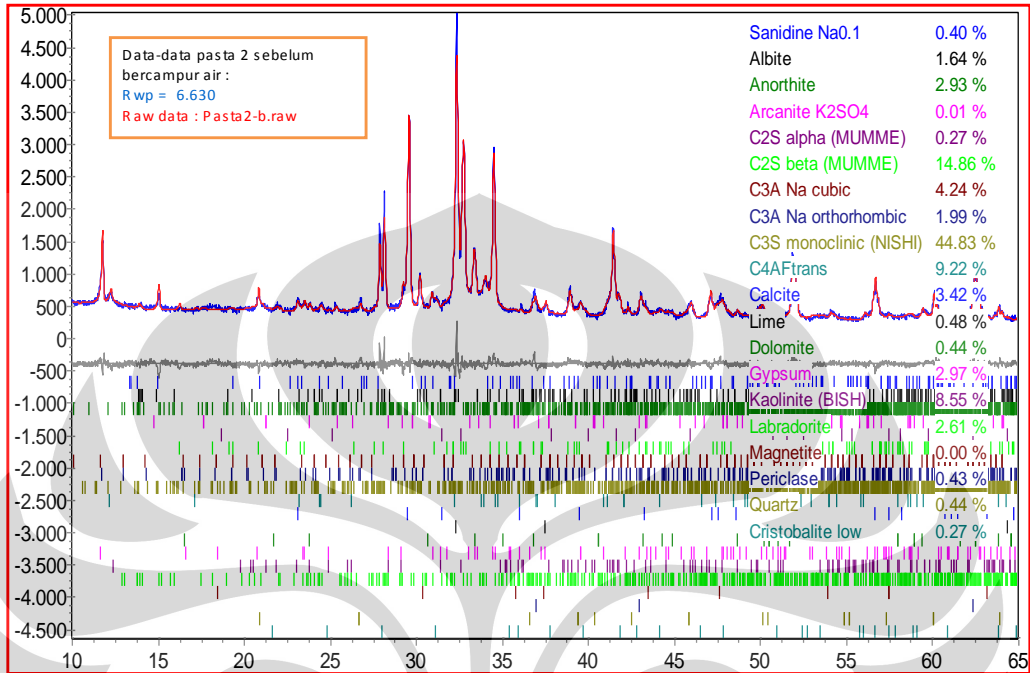
DATA RUNNING LIMESTONE

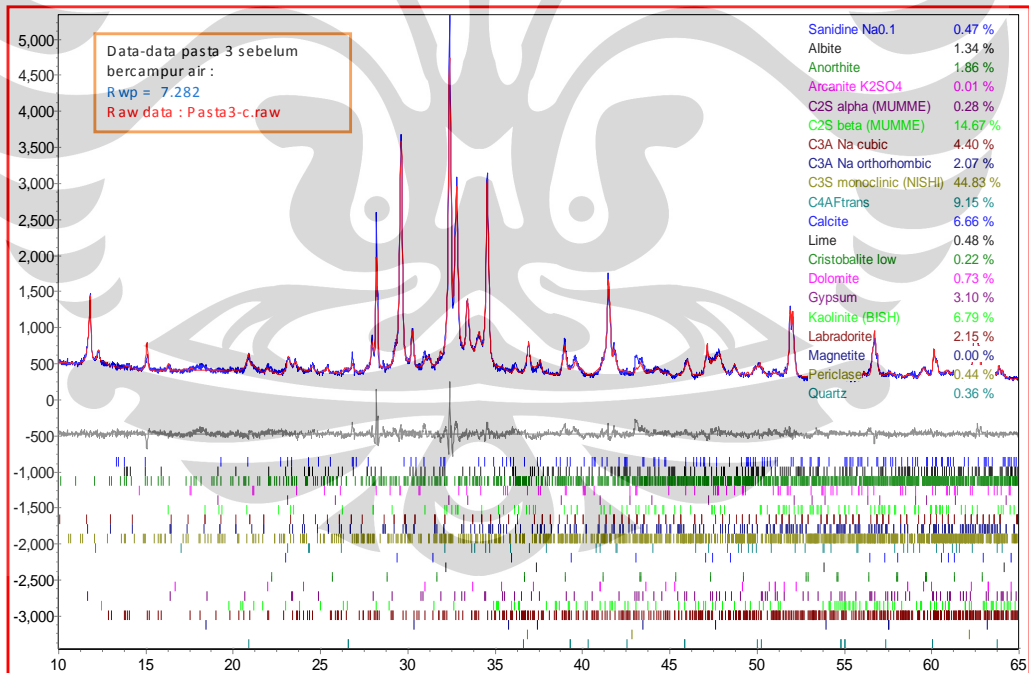
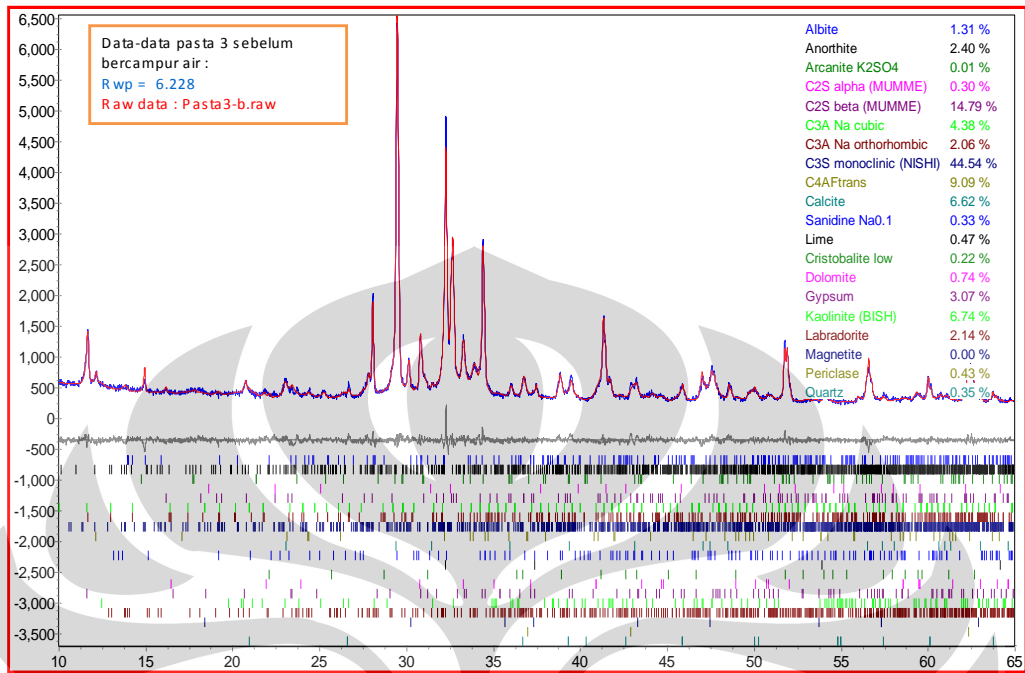


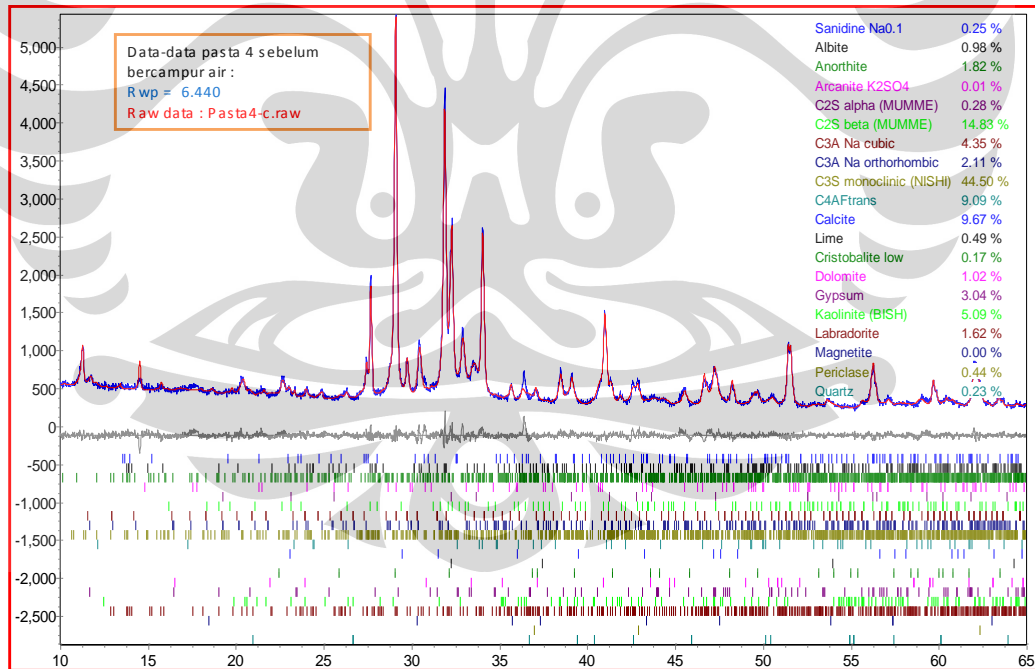
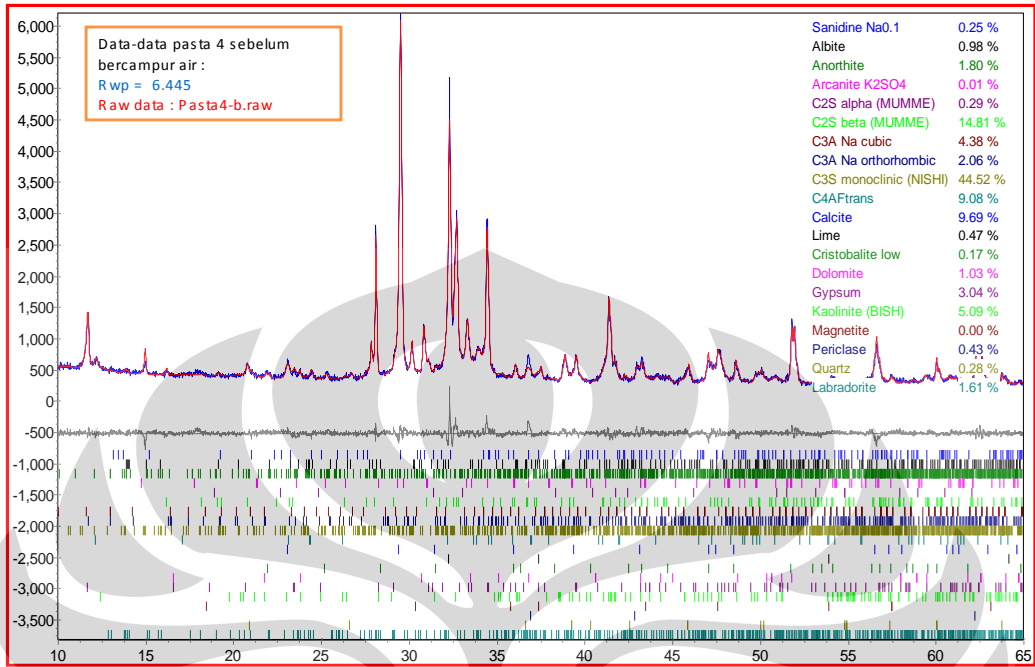
LAMPIRAN 9

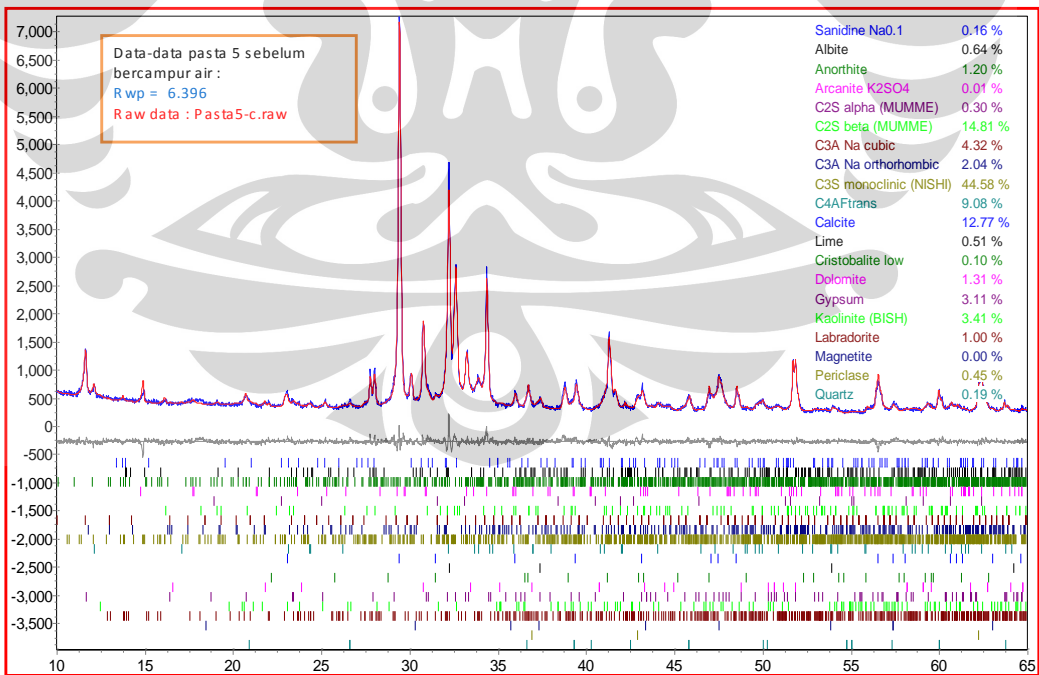
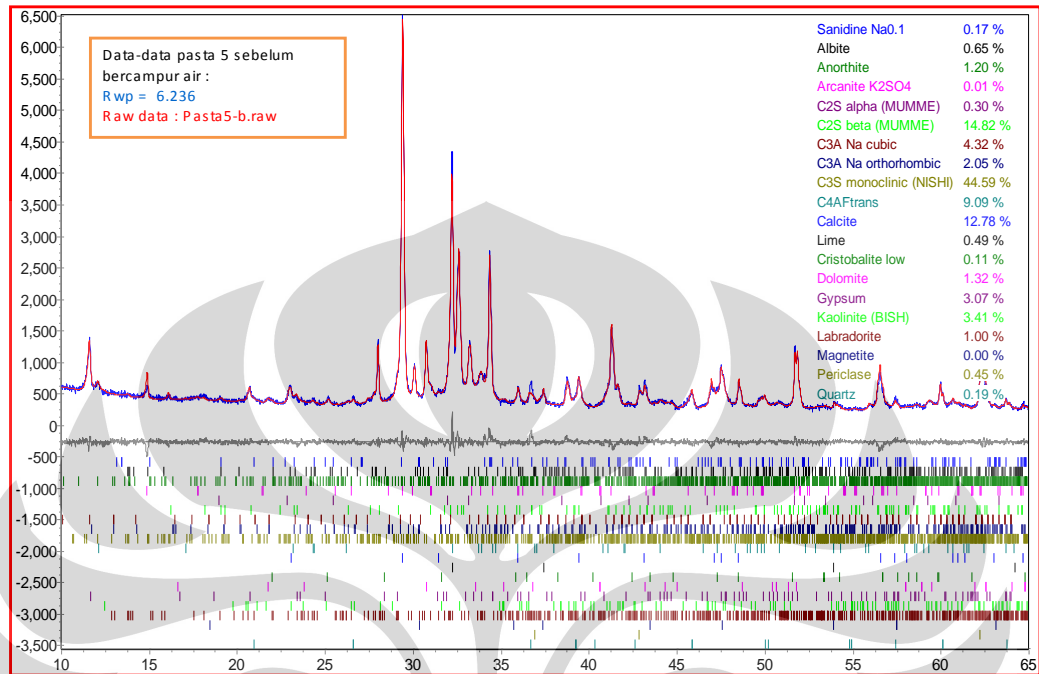
DATA RUNNING SAMPEL UJI SEBELUM DICAMPUR AIR

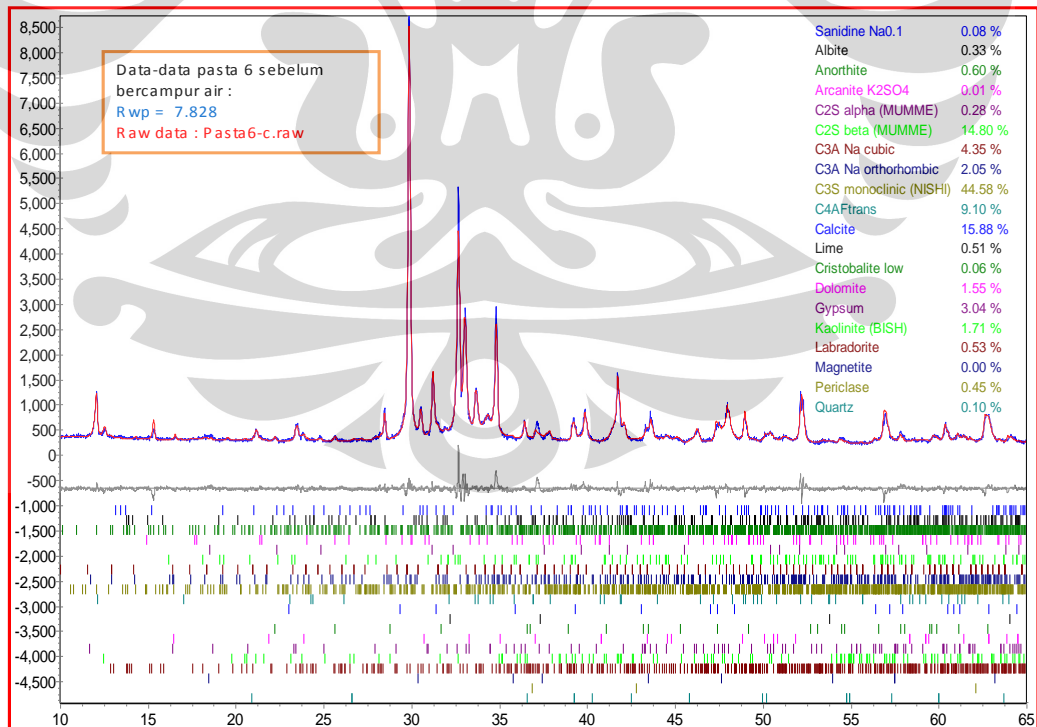
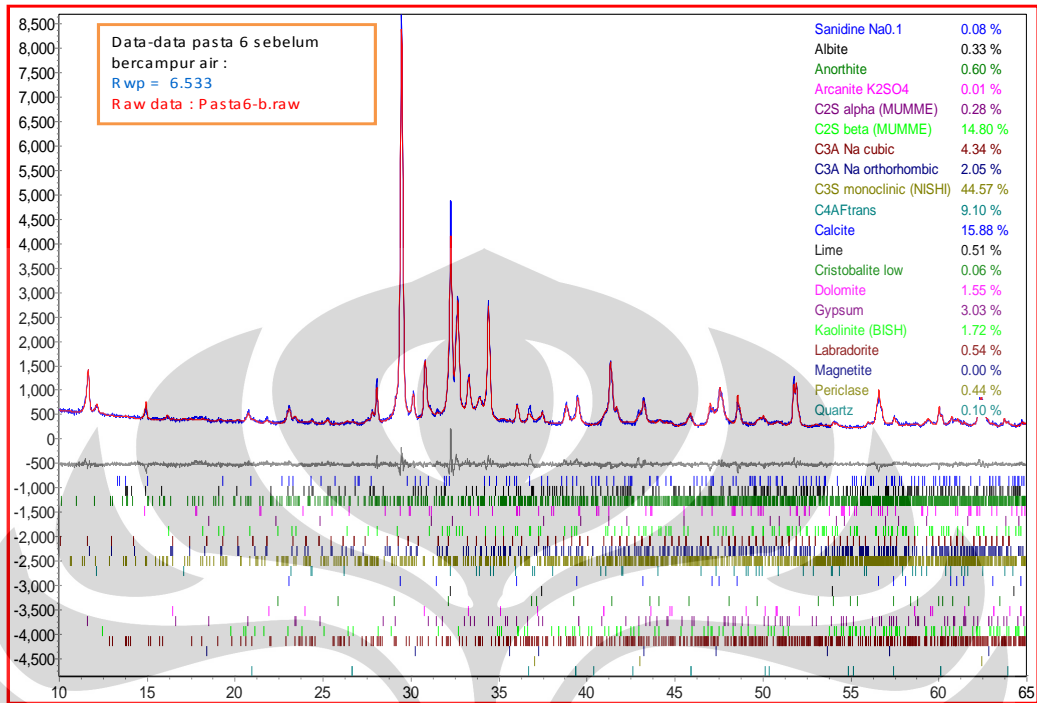


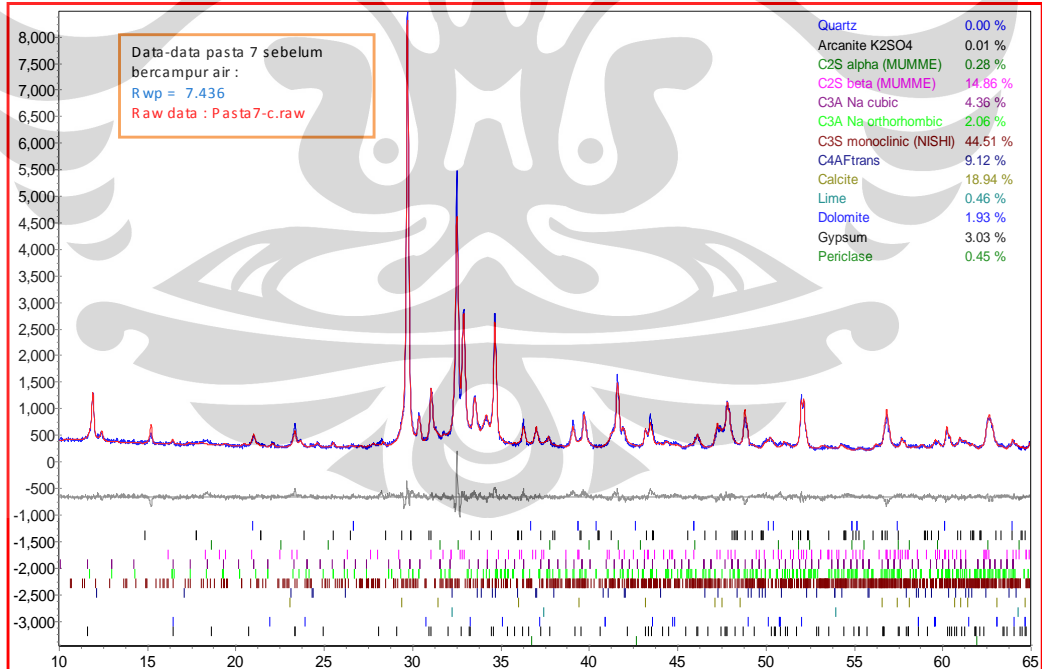
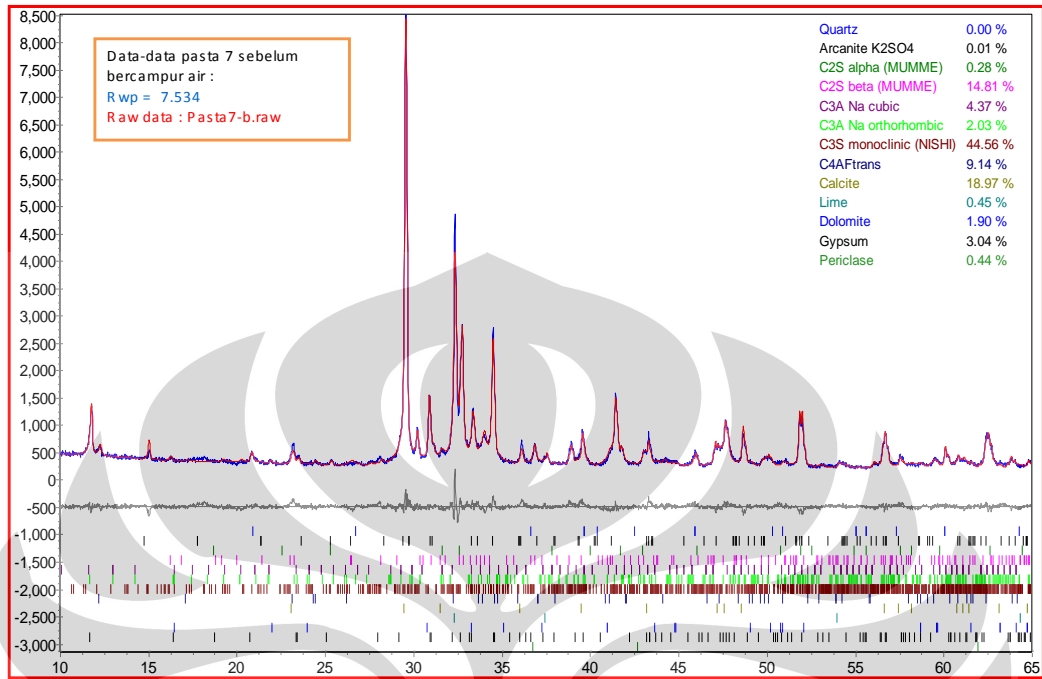












LAMPIRAN 10

DATA RUNNING SAMPEL UJI SETELAH DICAMPUR AIR

