



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PEMAKAIAN SEMEN PORTLAND TIPE V  
TERHADAP KETAHANAN SULFAT  
PADA *SELF-COMPACTING CONCRETE* (SCC)**

**SKRIPSI**

**MONIKA KRISTYANA PUTRI  
0706266443**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PEMAKAIAN SEMEN PORTLAND TIPE V  
TERHADAP KETAHANAN SULFAT  
PADA *SELF-COMPACTING CONCRETE* (SCC)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MONIKA KRISTYANA PUTRI  
0706266443**

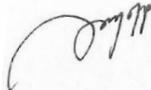
**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
KEKHUSUSAN STRUKTUR  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Monika Kristyana Putri**

**NPM : 0706266443**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 30 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Monika Kristyana Putri  
NPM : 0706266443  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Skripsi : Pengaruh Pemakaian Semen Portland Tipe V terhadap Ketahanan Sulfat pada *Self-Compacting Concrete* (SCC)

Telah berhasil dipertahankan di depan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA. (  )

Pembimbing II : Ir. Riana Herlina, MT. (  )

Penguji : Dr-Ing. Josia I. Rastandi (  )

Penguji : Ir. Essy Ariyuni, M.Sc, Ph.D (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat, rahmat, dan kasih-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik program studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Sehingga pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA., selaku pembimbing utama dan Ketua Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil UI yang telah banyak memberikan masukan serta meluangkan waktu untuk mengarahkan penelitian dan penulisan skripsi ini.
2. Ibu Ir. Riana Herlina L., MT, selaku pembimbing kedua atas bantuannya dalam penulisan dan pelaksanaan penelitian, serta atas ide awal terlaksananya penelitian ini.
3. Bapak Dr.-Ing. Josia I. Rastandi, Ibu Ir. Essy Ariyuni, M.Sc., Ph.D, dan Bapak Ir. Madsuri, MT., selaku dosen penguji atas masukan dan arahan yang diberikan kepada penulis.
4. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang berharga selama 4 tahun masa perkuliahan.
5. Mas Supri, Bapak Yudi, Mas Sony, Bapak Idris, Mbak Santi serta segenap staf Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah banyak membantu dalam proses penelitian hingga pengambilan data.
6. PT. Indocement Tunggal Prakarsa, terutama Ibu Vera Indrawati, dan Bapak Syaiful Bahri dan PT. Adhimix Precast Indonesia, Plant Lenteng Agung atas bantuan material berupa semen Portland tipe V dan agregat kasar.
7. Mbak Dian yang telah sangat direpotkan atas pelaksanaan sidang skripsi ini. Terima kasih atas kesediaannya membantu hingga sidang skripsi dapat terlaksana.

8. Keluarga tercinta: Bapak Yohanes Bosco Sarito dan Mama Rosalia Margini Agustina, serta adik Florentina Yunita Ratri atas kesabaran dan dukungan yang tak ternilai, baik moral dan material selama 4 tahun perkuliahan, terutama selama masa penelitian dan penulisan skripsi ini.
9. Rekan seperjuangan, Wisnu Ady Prasetyo dan David Silitonga atas bantuannya, terutama selama penelitian di laboratorium dan penulisan skripsi.
10. Sahabat-sahabat Sipil 2007: Vita Ariesta Fitriana dan Gloria Patricia Manurung, semangat selalu buat seminar + skripsinya; Siti Fatmawati thanks buat semua sesi curhatnya; Geng Gosip++: Radea Ariyadira, Mustofa Rifki, Wisnu Ady Prasetyo, Olva Seselima, Airlangga Ahmadi, Tri Sutrisno, Resky Agaslian, Aep Riyadi, thanks loh udah bikin kehidupan perkuliahan gue (terutama semester-semester akhir) berwarna akibat gossip-gossip kalian. Feisal Yusup + Aditya Putra Karisma thanks buat pinjaman motornya selama nge-lab.
11. Sahabat-sahabat: Christiana Sabatini dan Argihtha Marettia, chris-git chingu gomawo, God knows what's best, fighting and keep gee gee gee!; Ardie Ariyono dan Arief Maulana thanks, you're really more than words can say.
12. Seluruh rekan-rekan Teknik Sipil 2007 yang telah banyak membantu dan bekerja sama selama 4 tahun masa perkuliahan.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala bantuan yang diberikan seluruh pihak yang telah membantu. Dan besar pula harapan penulis agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak.

**Depok, Juni 2011**

Monika Kristyana Putri

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

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

Nama : Monika Kristyana Putri  
NPM : 0706266443  
Program Studi : Teknik Sipil  
Departemen : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Pengaruh Pemakaian Semen Portland Tipe V  
terhadap Ketahanan Sulfat pada *Self-Compacting Concrete* (SCC)**

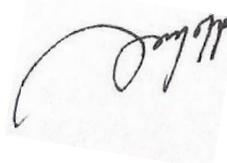
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan



(Monika Kristyana Putri)

## ABSTRAK

Nama : Monika Kristyana Putri  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Pengaruh Pemakaian Semen Tipe V Terhadap Ketahanan Sulfat pada *Self-Compacting Concrete* (SCC)

Serangan sulfat pada beton dalam jangka panjang dapat merusak ikatan antar material penyusun beton, sehingga mengurangi durabilitas beton. Salah satu teknologi praktis dalam pencegahan dampak serangan sulfat adalah penggunaan semen Portland tipe V. Selain itu, perkembangan teknologi beton berupa *Self-Compacting Concrete* (SCC) dapat meminimalisir jumlah *void* sehingga mengurangi difusi larutan sulfat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik SCC dengan semen Portland tipe V, dan mengetahui pengaruh serangan sulfat terhadap beton dengan semen Portland tipe V.

Benda uji direndam pada air suling selama 28 hari, kemudian diperlakukan dengan beberapa variasi perendaman, yaitu menggunakan air suling, air laut, larutan magnesium sulfat 5%, dan perlakuan *wetting-drying* (rendam-angkat) pada larutan magnesium sulfat 5% selama 14 dan 28 hari. Peninjauan pengaruh sulfat terhadap beton dilakukan dengan pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan permeabilitas. Kekuatan tekan, tarik belah, dan lentur beton diukur pada umur ke-28, 42, dan 56 hari. Sementara permeabilitas diukur ketika beton berumur 42 hari.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama 28 hari, ketiga variasi perendaman menyebabkan penurunan kekuatan mekanis pada benda uji dibandingkan dengan benda uji yang direndam pada air suling. Akibat variasi perendaman air laut, presentase penurunan yang terjadi pada kekuatan tekan, tarik belah, dan tarik lentur masing-masing sebesar -7,23%, 3,37%, dan 1,68%. Sementara, akibat variasi perendaman larutan magnesium sulfat 5%, presentase penurunan pada kekuatan tekan, tarik belah, dan tarik lentur masing-masing sebesar -26,99%, -24,39%, dan 16,2%. Dan akibat perlakuan rendam-angkat pada larutan magnesium sulfat 5%, presentase penurunan pada kekuatan tekan, tarik belah, dan tarik lentur masing-masing sebesar -37,15%, -17,59%, dan 33,52%. Sementara, akibat perendaman dalam air laut, larutan magnesium sulfat, dan perlakuan rendam angkat pada magnesium sulfat, terjadi peningkatan penetrasi air pada uji permeabilitas, dengan presentase masing-masing sebesar -35,6%, 5,2%, dan 22,94%. Hasil yang didapat pada penelitian ini memerlukan penelitian lebih lanjut diakibatkan oleh kesalahan yang terjadi selama pembuatan benda uji.

Kata Kunci: Serangan Sulfat, Semen Tipe V, *Self-Compacting Concrete* (SCC), Beton

## ABSTRACT

Name : Monika Kristyana Putri  
Study Program : Civil Engineering  
Title : The Effect of Using Type V Portland Cement to the Sulfate Resistance of Self-Compacting Concrete (SCC)

Sulfate attack on concrete in a long period of time breaks the bond between the former materials, so that it reduces durability of concrete. One of some practical technologies in mitigating the effect of sulfate attack is the use of type V Portland cement. Besides, the advancement of concrete technology, namely Self-Compacting Concrete (SCC) can reduce the diffusion of sulfate solution through the void because of its smaller amount of void. The objectives of this study are to examine the characteristic of SCC using type V Portland cement, and to study the effect of sulfate attack on type V Portland cement concrete.

The concrete is treated with some methods of immersion: using tap water, sea water, 5% magnesium sulfate solution, and wetting-drying cycle on 5% magnesium sulfate solution during 14 and 28 days after being immersed during 28 days on tap water. Effect of sulfate attack on concrete reviewed by observing the compressive, splitting tensile, and flexural strength, also the permeability on each sample. The compressive, splitting tensile, and flexural strength of concrete observed on the 28<sup>th</sup>, 42<sup>nd</sup>, and 56<sup>th</sup> day. While, the permeability observed only on the age of 42 days.

The result of this study shows that the immersion of samples in those three variation of immersion during 28 days results in the reduction of mechanical strength relative to the samples immersed in tap water. The rates of reduction on compressive, splitting tensile, and flexural strength due to the immersion in sea water, consecutively, are -7,23%, 3,37%, and 1,68%. While, due to the immersion in 5% magnesium sulfate solution, the rates of reduction on compressive, splitting tensile, and flexural strength, consecutively, are -26,99%, -24,39%, and 16,2%. And The rates of reduction on compressive, splitting tensile, and flexural strength due to wetting-drying cycle on 5% magnesium sulfate solution, consecutively, are -37,15%, -17,59%, and 33,52%. Otherwise, the immersion in sea water, magnesium sulfate solution, and wetting-drying cycle on magnesium sulfate solution results in the increase of water penetration level on the permeability test, by the rate of -35,6%, 5,2%, and 22,94%. The result of this research needs a more advanced research, due to the errors happen in the making of the samples.

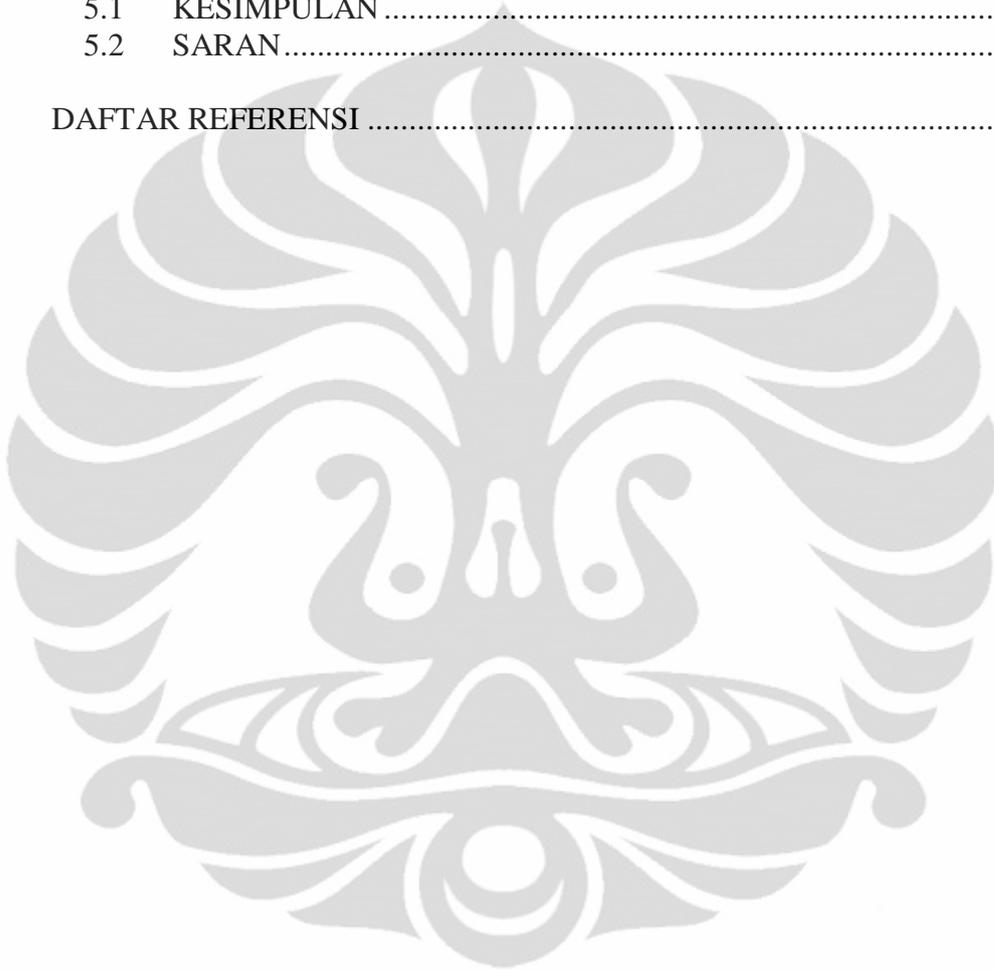
Keywords : Sulfate Attack, Type V Portland Cement, Self-Compacting Concrete (SCC), Concrete

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
DAFTAR SINGKATAN .....	xvi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN .....	3
1.4 BATASAN PENELITIAN .....	3
1.5 HIPOTESIS.....	4
1.6 METODE PENELITIAN .....	4
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 BETON .....	6
2.2 <i>SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC)</i> .....	6
2.2.1 Perkembangan SCC.....	6
2.2.2 Kelebihan SCC.....	7
2.2.3 Komposisi SCC.....	7
2.2.4 Mekanisme Pemadatan Sendiri pada SCC .....	8
2.2.5 Karakteristik SCC .....	10
2.2.6 Kriteria SCC.....	13
2.3 KOMPONEN PENYUSUN BETON.....	14
2.3.1 Semen Portland .....	14
2.3.1.1 Proses Pembuatan Semen .....	14
2.3.1.2 Komposisi Kimia Semen .....	15
2.3.1.3 Hidrasi pada Semen Portland.....	16
2.3.2 Agregat .....	19
2.3.2.1 Jenis Agregat.....	20
2.3.2.2 Karakteristik Agregat .....	21
2.3.3 Air.....	22
2.3.3.1 Kuantitas Air .....	23
2.3.3.2 Kualitas Air.....	23
2.3.4 <i>Admixture</i> .....	24
2.3.4.1 Tipe <i>Admixture</i> .....	24
2.3.4.2 <i>Superplasticizer</i> .....	25

2.4	SEMEN PORTLAND TIPE V .....	27
2.5	KARAKTERISTIK BETON KERAS .....	28
	2.5.1 Kekuatan Tekan Beton .....	28
	2.5.2 Kekuatan Tarik Belah Beton.....	29
	2.5.3 Kekuatan Lentur Beton.....	30
	2.5.4 Permeabilitas Beton.....	31
2.6	SERANGAN SULFAT PADA BETON .....	32
	2.6.1 Jenis Serangan Sulfat.....	33
	2.6.2 Bentuk dan Mekanisme Serangan Sulfat.....	33
	2.6.3 Dampak Serangan Sulfat pada Beton.....	35
	2.6.4 Pencegahan Serangan Sulfat .....	35
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>38</b>
3.1	ALUR PENELITIAN .....	38
3.2	PERENCANAAN JUMLAH SAMPEL .....	39
	3.2.1 Variasi Metode <i>Curing</i> .....	39
	3.2.2 Pengujian Sampel.....	41
3.3	JADWAL PELAKSANAAN.....	42
3.4	STANDAR PENGUJIAN .....	43
3.5	PENGUJIAN MATERIAL PENYUSUN BETON.....	44
	3.5.1 Pengujian Agregat Kasar .....	44
	3.5.2 Pengujian Agregat Halus .....	47
3.6	PERANCANGAN CAMPURAN .....	53
3.7	PEMBUATAN ADUKAN DAN BENDA UJI BETON .....	56
	3.7.1 Tahap Persiapan .....	56
	3.7.2 Tahap Pelaksanaan Pengecoran .....	56
	3.7.3 Tahap Pencetakan.....	57
3.8	PENGUJIAN BETON SEGAR .....	57
3.9	PENGUJIAN BETON KERAS .....	59
	3.9.1 Pengujian Kuat Tekan .....	59
	3.9.2 Pengujian Kuat Lentur.....	60
	3.9.3 Pengujian Kuat Tarik Belah.....	62
	3.9.4 Pengujian Permeabilitas .....	64
3.10	PENKODEAN BENDA UJI.....	65
<b>BAB 4 ANALISIS DAN HASIL PENELITIAN .....</b>		<b>66</b>
4.1	ANALISIS HASIL PENGUJIAN MATERIAL PENYUSUN BETON.....	66
	4.1.1 Agregat Kasar .....	66
	4.1.2 Agregat Halus .....	67
4.2	ANALISIS PENGUJIAN <i>SLUMP FLOW</i> .....	68
4.3	ANALISIS MASSA JENIS <i>SELF-COMPACTING CONCRETE</i> .....	69
4.4	ANALISIS SERANGAN SULFAT SECARA VISUAL.....	71
4.5	ANALISIS PENURUNAN BERAT BENDA UJI .....	72
4.6	ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP KUAT TEKAN.....	75
4.7	ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP KUAT TARIK BELAH.....	86

4.8	ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP KUAT TARIK LENTUR.....	95
4.10	ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP PERMEABILITAS BETON.....	104
4.11	KORELASI KUAT TEKAN DENGAN KUAT TARIK BELAH DAN KUAT TARIK LENTUR.....	105
<b>BAB 5 PENUTUP</b> .....		108
5.1	KESIMPULAN .....	108
5.2	SARAN.....	109
DAFTAR REFERENSI .....		111



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Komposisi Bahan Penyusun SCC .....	8
Gambar 2.2.	Proporsi Campuran Beton Normal dan SCC .....	8
Gambar 2.3.	Metode untuk Mencapai Pematatan Sendiri pada SCC .....	9
Gambar 2.4.	Skema Pematatan Sendiri pada SCC .....	10
Gambar 2.5.	Papan <i>Slump Flow</i> .....	11
Gambar 2.6.	V-Funnel .....	11
Gambar 2.7.	L-Box .....	12
Gambar 2.8.	Penggolongan SCC Berdasarkan VSI .....	13
Gambar 2.9.	Perkembangan Kekuatan Senyawa Pembentuk Semen .....	17
Gambar 2.10.	Perkembangan Kekuatan Tekan pada Semua Tipe Semen .....	19
Gambar 2.11.	Perbandingan Keleccakan dan Faktor Air Semen pada Beton dengan dan Tanpa Superplasticizer .....	26
Gambar 2.12.	Metode Pengujian <i>Third-Point Loading</i> .....	30
Gambar 2.13.	Metode Pengujian <i>Center-Point Loading</i> .....	30
Gambar 2.14.	Ekspansi pada Mortar dengan Variasi Kadar $C_3A$ .....	36
Gambar 3.1.	Alur Penelitian .....	38
Gambar 3.2.	Alat Uji <i>Slump Flow</i> .....	58
Gambar 3.3.	Keruntuhan Benda Uji Lentur pada Bagian Tengah Bentang .....	61
Gambar 3.4.	Keruntuhan Benda Uji Lentur Di Luar Bagian Tengah Bentang .....	61
Gambar 3.5.	Alat Uji Kuat Lentur .....	62
Gambar 3.4.	Permodelan Uji Tarik Belah .....	63
Gambar 4.1.	(a) <i>Slump Flow</i> Tidak Memenuhi Standar EFNARC; (b) <i>Slump Flow</i> Memenuhi Standar EFNARC .....	69
Gambar 4.2.	Karakteristik Fisik Benda Uji Akibat Variasi Perendaman (a) Air Suling; (b) Air Laut; (c) Larutan Sulfat; (d) Rendam-Angkat .....	71
Gambar 4.3.	Grafik Perbandingan Berat Benda Uji Umur 42 Hari untuk Semua Variasi Perendaman .....	73
Gambar 4.4.	Grafik Perbandingan Berat Benda Uji Umur 56 Hari untuk Semua Variasi Perendaman .....	74
Gambar 4.5.	Grafik Hubungan Kuat Tekan dengan Umur Beton untuk Setiap Variasi Perendaman .....	76
Gambar 4.6.	Grafik Kenaikan Kuat Tekan Benda Uji untuk Setiap Variasi Perendaman .....	76
Gambar 4.7.	Grafik Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton Umur 42 Hari .....	79
Gambar 4.8.	Grafik Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton Umur 56 Hari .....	82
Gambar 4.9.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Suling .....	83
Gambar 4.10.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Laut .....	83
Gambar 4.11.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Larutan Sulfat .....	84
Gambar 4.12.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Pasang-Surut .....	84

Gambar 4.13.	Grafik Tren Perkembangan Kuat Tekan untuk Semua Variasi Perendaman.....	85
Gambar 4.14.	Grafik Hubungan Kuat Tarik Belah dengan Umur Beton untuk Setiap Variasi Perendaman .....	87
Gambar 4.15.	Grafik Persentase Kenaikan Kuat Tarik Belah Benda Uji untuk Setiap Variasi Perendaman .....	87
Gambar 4.16.	Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 42 Hari .....	89
Gambar 4.17.	Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 56 Hari .....	91
Gambar 4.18.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Suling.....	92
Gambar 4.19.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Laut.....	92
Gambar 4.20.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Larutan Sulfat.....	93
Gambar 4.21.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Pasang-Surut .....	93
Gambar 4.22.	Tren Perkembangan Kuat Tarik Belah untuk Semua Variasi Perendaman.....	94
Gambar 4.23.	Grafik Perkembangan Kuat Tarik Lentur untuk Setiap Variasi Perendaman.....	96
Gambar 4.24.	Grafik Persentase Kenaikan Kuat Tarik Lentur Benda Uji untuk Setiap Variasi Perendaman .....	96
Gambar 4.25.	Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 42 Hari .....	98
Gambar 4.26.	Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 56 Hari .....	100
Gambar 4.27.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Suling.....	101
Gambar 4.28.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Laut.....	102
Gambar 4.29.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Larutan Sulfat.....	102
Gambar 4.30.	Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Pasang-Surut .....	103
Gambar 4.31.	Tren Perkembangan Kuat Tarik Lentur untuk Semua Variasi Perendaman.....	103

## DAFTAR TABEL

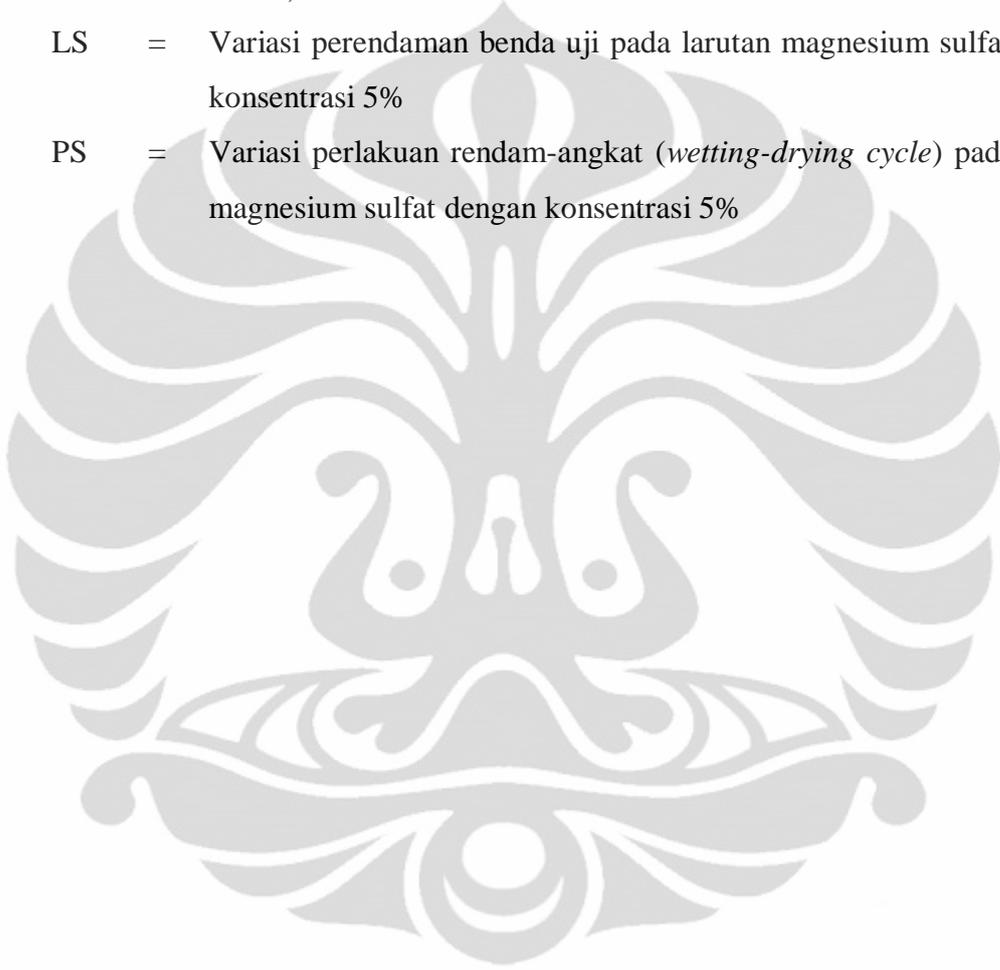
Tabel 2.1.	Kriteria SCC.....	14
Tabel 2.2.	Senyawa Utama Pembentuk Semen .....	15
Tabel 2.3.	Oksida Pembentuk Semen .....	16
Tabel 2.4.	Produk Hidrasi Senyawa Pembentuk Semen dan Sifatnya.....	18
Tabel 2.5.	Standar Gradasi Agregat Kasar .....	20
Tabel 2.6.	Standar Gradasi Agregat Halus .....	21
Tabel 2.7.	Batas Toleransi Kotoran pada Air Campuran Beton.....	24
Tabel 2.8.	Pembatasan Kadar Senyawa Kimia pada Semua Tipe Semen Portland .....	27
Tabel 2.9.	Presentase Senyawa pada Seluruh Tipe Semen Portland .....	28
Tabel 2.10.	Faktor Konversi Kekuatan Tekan Beton .....	29
Tabel 3.1.	Perencanaan Jumlah Sampel.....	41
Tabel 3.2.	Penjadwalan Penelitian.....	42
Tabel 3.3.	Kapasitas Wadah Untuk Pengujian Berat Isi Agregat Kasar.....	44
Tabel 3.4.	Berat Contoh Agregat Kering Minimum.....	52
Tabel 3.5.	Estimasi Air Campuran Berdasarkan Slump dan MSA .....	54
Tabel 3.6.	Faktor Air Semen Berdasarkan Kekuatan Tekan.....	55
Tabel 3.7.	Volume Agregat Kasar yang Diperlukan Berdasarkan FM dan MSA .....	55
Tabel 3.8.	Bentuk dan Dimensi Alat Cetak yang Digunakan pada Penelitian .....	57
Tabel 4.1.	Hasil Pengujian Agregat Kasar .....	66
Tabel 4.2.	Hasil Pengujian Agregat Halus .....	67
Tabel 4.3.	Massa Jenis Benda Uji.....	70
Tabel 4.4.	Perbandingan Berat Benda Uji.....	73
Tabel 4.5.	Hasil Uji Kuat Tekan.....	75
Tabel 4.6.	Hasil Uji Kuat Tekan untuk Benda Uji Umur 42 Hari .....	79
Tabel 4.7.	Hasil Uji Kuat Tekan untuk Benda Uji Umur 56 Hari .....	81
Tabel 4.8.	Hasil Uji Kuat Tarik Belah .....	86
Tabel 4.9.	Hasil Uji Kuat Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 42 Hari .....	89
Tabel 4.10.	Hasil Uji Kuat Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 56 Hari .....	91
Tabel 4.11.	Hasil Uji Kuat Tarik Lentur.....	95
Tabel 4.12.	Hasil Uji Kuat Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 42 Hari.....	98
Tabel 4.13.	Hasil Uji Kuat Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 56 Hari....	100
Tabel 4.14.	Hasil Uji Permeabilitas .....	104
Tabel 4.15.	Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Tarik Belah .....	106
Tabel 4.16.	Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Tarik Lentur.....	107

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A-1 Data Pengujian Agregat Halus
- Lampiran A-2 Data Pengujian Agregat Kasar
- Lampiran B Perhitungan Rancang Campur Beton
- Lampiran C Catatan Pengecoran
- Lampiran D -1 Hasil Uji Kuat Tekan
- Lampiran D-2 Hasil Uji Kuat Tarik Belah
- Lampiran D-3 Hasil Uji Kuat Tarik Lentur
- Lampiran E-1 Dokumentasi Pengujian Material
- Lampiran E-3 Dokumentasi Variasi Perendaman Benda Uji
- Lampiran E-4 Dokumentasi Pengujian Benda Uji
- Lampiran F Hasil Analisis Kimia dan Fisika Air Laut
- Lampiran G Kandungan Kimia Semen Portland Tipe V
- Lampiran H Hasil Uji Kandungan Klorida pada Benda Uji

## DAFTAR SINGKATAN

- AS = Variasi perendaman benda uji pada air suling
- AL = Variasi perendaman benda uji pada air laut yang bersumber dari Ancol, Jakarta Utara
- LS = Variasi perendaman benda uji pada larutan magnesium sulfat dengan konsentrasi 5%
- PS = Variasi perlakuan rendam-angkat (*wetting-drying cycle*) pada larutan magnesium sulfat dengan konsentrasi 5%



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG**

Beton merupakan salah satu material yang dikenal luas di dunia konstruksi dan tetap digunakan untuk konstruksi bangunan baik dalam skala kecil maupun besar hingga saat ini. Penggunaan material beton yang mendominasi industri konstruksi Indonesia sejak tahun 1960-an tidak hanya dikarenakan material penyusun beton yang mudah didapatkan, terutama di Indonesia, melainkan juga karena beton memiliki durabilitas yang tinggi.

Durabilitas beton yang tinggi memberikan fleksibilitas pada pemakaian material beton, sehingga dapat digunakan pada struktur bangunan yang terpapar cuaca dan lingkungan ekstrim dengan intensitas tinggi tanpa perlu dilakukan perawatan secara berlebihan. Namun akibat paparan cuaca dan lingkungan yang ekstrim, durabilitas beton dapat berkurang, sehingga dapat menyebabkan umur beton lebih singkat daripada yang direncanakan.

Berkurangnya durabilitas beton dapat disebabkan oleh faktor eksternal yang berasal dari lingkungan di mana struktur beton berdiri, dan oleh faktor internal yang berasal dari material beton itu sendiri. Faktor-faktor yang menyebabkan berkurangnya durabilitas antara lain: (1) Faktor fisik (pengaruh suhu ekstrim), (2) Faktor mekanik (abrasi pada beton), dan (3) Faktor kimia (serangan senyawa kimia seperti sulfat, asam, air laut, dan klorida) (Neville dan Brooks, 1994).

Salah satu struktur bangunan beton yang berpotensi tinggi untuk mengalami penurunan durabilitas adalah struktur bangunan tepi pantai yang secara intensif berinteraksi dengan air laut. Air laut mengandung senyawa kimia berupa garam, terutama garam sulfat. Interaksi beton dengan air laut memungkinkan garam-garam sulfat yang terlarut dalam air laut meresap melalui pori-pori beton, dan mengakibatkan serangan sulfat pada partikel-partikel penyusun beton.

Serangan sulfat terjadi ketika sulfat bereaksi dengan kalsium hidroksida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) pada semen terhidrasi sehingga membentuk kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ),

dan dengan kalsium aluminat hidrat ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ) yang kemudian membentuk kalsium sulfoaluminat. Kalsium sulfoaluminat ini memiliki volume yang sangat besar, yaitu diperkirakan 227% dari volume beton normal (Shetty, 2005). Volume kalsium aluminat yang lebih besar daripada volume beton solid ini membuat beton mengalami peningkatan volume, sehingga merusak ikatan antara agregat dan semen sebagai bahan pengikat. Hal ini dapat mengurangi kekuatan struktur beton serta memperpendek umur beton.

Mengingat kekuatan struktur beton yang menurun akibat serangan sulfat sehingga secara ekonomis pun merugikan, diperlukan teknologi yang diterapkan pada struktur beton yang terpapar sulfat dengan intensitas tinggi untuk mengurangi dampak serangan sulfat. Salah satu teknologi yang aplikatif dan mudah diperoleh adalah penggunaan *sulfate resisting cement* atau semen Portland tipe V pada campuran beton. Semen Portland tipe V mengurangi dampak serangan sulfat dengan mengurangi pembentukan kalsium sulfoaluminat pada semen. Semen Portland tipe V memiliki kadar  $\text{C}_3\text{A}$  dan  $\text{C}_4\text{AF}$  yang lebih rendah daripada *Ordinary Portland Cement* atau semen Portland tipe I sehingga mengurangi kalsium aluminat hidrat yang terbentuk pada reaksi hidrasi semen, yang dapat mengurangi terbentuknya kalsium sulfoaluminat sebagai salah satu unsur yang merupakan indikator terjadinya serangan sulfat.

Selain penggunaan semen Portland tipe V, perkembangan teknologi pada dunia konstruksi juga memungkinkan untuk memperoleh beton dengan sifat lebih mengalir dengan kelecakan tinggi tanpa mengurangi kekuatan beton. Teknologi yang dikembangkan di Jepang oleh Okamura ini biasa disebut dengan *Self-Compacting Concrete (SCC)*. Dengan kelecakan yang tinggi, SCC tidak memerlukan pemadatan secara khusus pada pelaksanaannya, dan dapat menghasilkan beton dengan rongga udara yang lebih sedikit dibandingkan dengan beton konvensional. Rongga udara yang lebih sedikit pada SCC dapat memperlambat penetrasi larutan sulfat ke dalam beton, sehingga memperlambat laju kerusakan beton yang terpapar sulfat.

Namun, meskipun menggunakan teknologi *Self-Compacting Concrete (SCC)* dengan semen Portland tipe V, beton yang terpapar sulfat dengan kadar tinggi tetap akan mengalami penurunan kekuatan akibat serangan sulfat secara

terus-menerus, terutama dalam jangka panjang. Karena itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui seberapa besar pengaruh serangan sulfat terhadap kekuatan beton dengan menggunakan semen Portland tipe V.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan masalah-masalah sebagai berikut:

- Bagaimana karakteristik kuat tekan, tarik belah, dan lentur, serta permeabilitas beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan semen tipe V?
- Seberapa besar pengaruh serangan sulfat pada beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan semen tipe V ditinjau dari kekuatan tekan, tarik, dan lentur, serta permeabilitasnya?

## 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur dan permeabilitas dari beton dengan semen Portland tipe V.
2. Mengetahui pengaruh sulfat terhadap kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur dan permeabilitas dari beton dengan semen Portland tipe V.
3. Mengetahui pengaruh variasi metode *curing* terhadap kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, dan permeabilitas beton dengan semen Portland tipe V.

## 1.4 BATASAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki beberapa batasan, yaitu:

- Mutu beton yang direncanakan ( $f_c'$ ) adalah 40 MPa.
- Penelitian yang dilakukan dibatasi pada pengujian kekuatan tekan, tarik, lentur, dan permeabilitas pada beton dengan semen Portland tipe V.
- Faktor air semen yang digunakan adalah 0,45
- Pengujian dilakukan dengan menggunakan beton SCC
- Penelitian dibatasi pada beton yang *dicuring* dengan air PDAM, larutan magnesium sulfat 5%, dan air laut.

- Variasi cara *curing* dilakukan pada beton yang direndam dengan larutan magnesium sulfat 5%, yaitu dengan merendam benda uji sepanjang waktu, sebelum dilakukan pengujian, dan dengan merendam dan mengangkat benda uji sebelum dilakukan pengujian.
- Pengujian tekan, tarik belah, dan tarik lentur pada benda uji dilakukan berdasarkan standar *American Society for Testing Material* (ASTM). Sementara pengujian permeabilitas dilakukan berdasarkan standar DIN.
- Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Pengujian dilakukan pada benda uji dengan umur 28, 42, dan 56 hari untuk uji tekan, tarik belah, dan tarik lentur, dan 42 hari untuk uji permeabilitas.

### 1.5 HIPOTESIS

- Beton yang *dicuring* pada lingkungan yang mengandung sulfat, yang bersumber dari air laut dan larutan magnesium sulfat memiliki kekuatan tekan, tarik, dan lentur yang lebih lemah daripada beton yang *dicuring* menggunakan air PDAM.
- Beton yang *dicuring* dengan sulfat memiliki penetrasi air pada uji permeabilitas yang lebih tinggi daripada beton yang *dicuring* dengan air PDAM.

### 1.6 METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan metode sebagai berikut:

#### 1. Studi Pustaka

Dengan cara mengumpulkan literatur yang berkaitan dengan topik penelitian, khususnya tentang beton, semen Portland tipe V, serangan sulfat pada beton, perhitungan *mix design*, dan metode pengujian beton.

#### 2. Studi Eksperimental

Dengan cara melakukan pembuatan benda uji, dan kemudian melakukan pengujian di laboratorium. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengujian terhadap material penyusun beton, uji tekan, uji tarik belah, uji lentur, dan permeabilitas.

### 3. Analisis

Dengan cara melakukan analisis terhadap hasil pengujian yang dilakukan di laboratorium.

## **1.7 SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistem penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Berisikan penjelasan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan

### **BAB 2 LANDASAN TEORI**

Berisikan literatur yang mengacu pada beberapa referensi mengenai sifat beton beserta bahan penyusunnya, serangan sulfat pada beton, dan kandungan kimia pada air laut.

### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Berisi tentang penjelasan pengujian laboratorium dan hal-hal yang dilakukan pada penelitian ini serta tahapan-tahapannya.

### **BAB 4 HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN**

Berisi tentang penjelasan kebutuhan proporsi perancangan campuran serta tahapan-tahapannya, data-data yang diperoleh, dan analisis dari data tersebut.

### **BAB 5 PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 BETON**

Beton merupakan campuran antara agregat halus dan kasar dengan semen sebagai bahan pengikat dan air serta dengan atau tanpa campuran bahan tambah (*admixture*) jika diperlukan yang membentuk massa yang padat dan keras. Beton juga didefinisikan sebagai material komposit yang merupakan campuran antara semen dengan agregat halus, agregat kasar, dan air.

Penggunaan beton sebagai material konstruksi dikarenakan kelebihan-kelebihan yang dimiliki beton dibandingkan dengan material lain, yaitu:

- a. Mudah dibentuk sesuai dengan kebutuhan konstruksi
- b. Mampu memikul beban yang berat
- c. Tahan terhadap temperatur yang tinggi
- d. Memerlukan biaya pemeliharaan yang kecil
- e. Kekuatannya dapat dirancang sesuai dengan peruntukan

Namun, di sisi lain, beton memiliki beberapa kekurangan, yaitu:

- a. Bentuk yang telah dibuat sulit untuk diubah
- b. Pelaksanaan pekerjaan membutuhkan ketelitian yang tinggi
- c. Memiliki berat jenis yang tinggi
- d. Memiliki daya pantul suara yang besar
- e. Tidak mampu menahan gaya tarik

#### **2.2 SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC)**

*Self-Compacting Concrete (SCC)* adalah tipe beton khusus yang dapat mengalir dengan bebas dan dapat memadat akibat berat sendiri tanpa bantuan *concrete vibrator*.

##### **2.2.1 Perkembangan SCC**

SCC dikembangkan di Jepang pada sekitar akhir 1980-an. Pada awal 1980-an, Jepang menghadapi permasalahan dalam dunia konstruksi, yaitu degradasi jumlah tenaga kerja ahli dalam memadatkan beton. Di sisi lain, beton

yang padat memegang peranan yang penting dalam meningkatkan durabilitas beton, sehingga struktur beton dapat bertahan lama.

Dilatarbelakangi oleh permasalahan tersebut, pada tahun 1986, Okamura, Ozawa, dan Maekawa mengembangkan teknologi berupa campuran beton yang dapat menjangkau setiap sudut bekisting tanpa perlu dilakukan pemadatan secara manual, sehingga jumlah pekerja pemadat yang semakin berkurang, tidak lagi menjadi suatu permasalahan yang berarti bagi dunia konstruksi di Jepang.

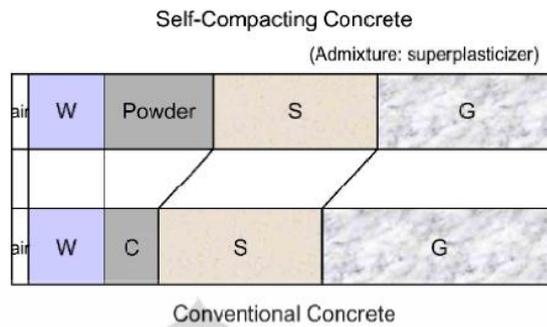
### 2.2.2 Kelebihan SCC

Penggunaan SCC yang semakin meluas pada dunia konstruksi dikarenakan kelebihan-kelebihan SCC dibandingkan dengan beton konvensional, antara lain yaitu:

1. Waktu pengecoran SCC yang lebih efisien dibandingkan pengecoran beton konvensional karena tidak diperlukan penggetaran dan perataan.
2. Secara arsitektural, SCC memiliki penampilan yang lebih menarik karena tidak banyak terdapat rongga udara pada beton.
3. Kemudahan dalam pengecoran daerah-daerah sempit dan sulit dijangkau.
4. Meningkatkan kepadatan pada daerah antara tulangan, sehingga meningkatkan ikatan beton dengan tulangan.
5. Mereduksi permeabilitas karena mekanisme pemadatan sendiri SCC memungkinkan rongga udara yang lebih sedikit dibandingkan dengan beton konvensional.

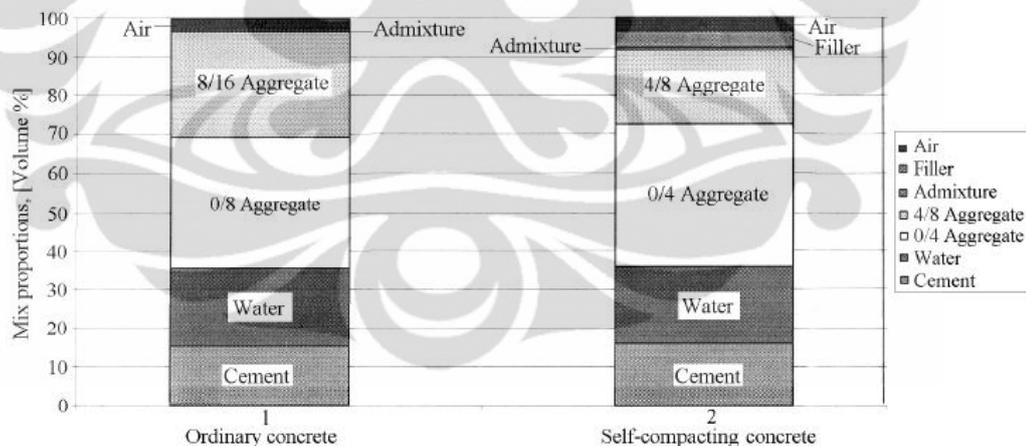
### 2.2.3 Komposisi SCC

SCC memiliki komposisi yang sama dengan beton normal, yaitu semen, agregat, air, namun SCC menggunakan *admixture* berupa *superplasticizer*, serta terkadang disertai penambahan *Viscosity Modifying Admixture* (VMA).



**Gambar 2.1.** Komposisi Bahan Penyusun SCC

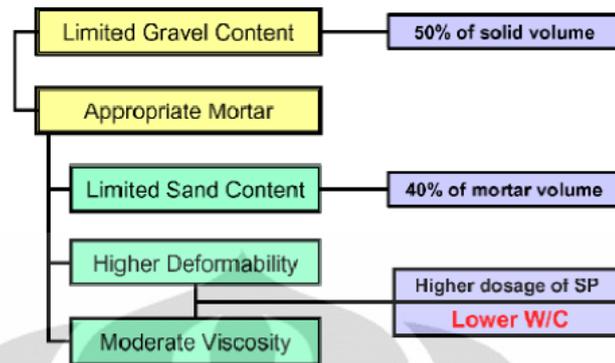
Perbedaan SCC dengan beton normal terletak pada komposisi material penyusunnya. SCC menggunakan semen atau material *cementitious* yang lebih banyak daripada beton normal. Di sisi lain, peningkatan volume *cementitious* menyebabkan volume agregat pada SCC menjadi lebih sedikit. Sementara, penambahan *admixture* berupa *High Range Water Reducer (HRWR)* atau *superplasticizer* berfungsi untuk meningkatkan kelecakan beton segar tanpa diperlukan penambahan air pada campuran.



**Gambar 2.2.** Proporsi Campuran Beton Normal dan SCC

#### 2.2.4 Mekanisme Pematatan Sendiri pada SCC

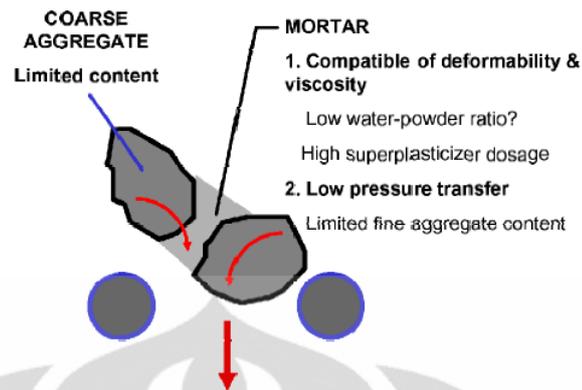
Untuk mendapatkan beton yang dapat memadat sendiri, terdapat beberapa sifat yang harus dimiliki oleh beton, yaitu pasta semen dengan *deformability* tinggi (mudah dibentuk) dan agregat dan mortar yang resisten terhadap segregasi. Untuk memenuhi kedua sifat ini, Okamura dan Ozawa merumuskan sebuah rumusan pada bagan berikut.



**Gambar 2.3.** Metode untuk Mencapai Pematatan Sendiri pada SCC

Pembatasan kadar agregat dilakukan untuk mengurangi energi yang timbul akibat gesekan, kontak, dan tumbukan antar agregat dalam campuran beton. Berdasarkan hasil riset, proporsi energi yang digunakan beton untuk dapat mengalir sebagian besar berkurang akibat timbulnya energi internal, yaitu gesekan antar agregat. Hal inilah yang menyebabkan beton konvensional memiliki kemampuan mengalir yang rendah. Berdasarkan prinsip tersebut, Okamura dan Ozawa membatasi proporsi agregat pada campuran beton, yaitu sebesar 50% sehingga dapat mengurangi konsumsi energi akibat tumbukan antar agregat. Energi tersebut kemudian dapat digunakan oleh beton untuk dapat mengalir dengan lebih bebas.

Campuran beton SCC juga harus memiliki viskositas yang tinggi agar agregat tidak mengalami segregasi dengan pasta semen ketika campuran beton menjangkau daerah-daerah sulit, seperti celah antar tulangan. Resistensi terhadap segregasi menjaga campuran beton SCC tetap mudah mengalir. Karena alasan inilah, SCC harus memiliki faktor air semen yang rendah. Namun, di sisi lain, faktor air semen yang terlalu rendah dapat mengurangi kelecakan beton dan mengakibatkan campuran beton sulit mengalir. Oleh karena itu, pada SCC digunakan *superplasticizer* untuk meningkatkan kelecakannya sehingga sifat *deformability* yang tinggi dapat terpenuhi.



**Gambar 2.4.** Skema Pemasakan Sendiri pada SCC

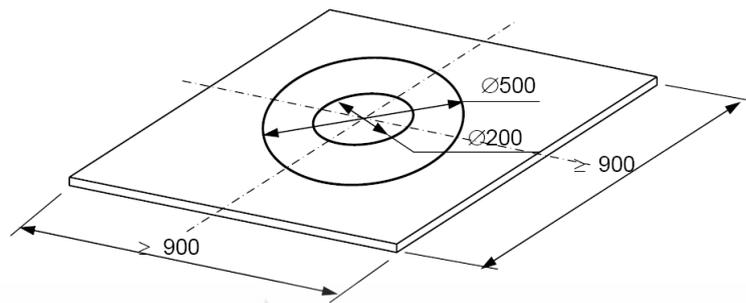
### 2.2.5 Karakteristik SCC

SCC memiliki sifat yang lebih mengalir daripada beton biasa, sehingga untuk mengetahui performa SCC, perlu diketahui karakteristik SCC yang mendukung performanya seperti kemampuan mengisi (*filling ability*), kemampuan lewat (*passing ability*), dan stabilitas. Karakteristik ini dapat diketahui melalui beberapa uji yang dilakukan pada SCC segar.

#### a. *Filling Ability*

*Filling ability* didefinisikan sebagai kemampuan SCC untuk mengalir dan mengisi ruang akibat beratnya sendiri tanpa dilakukan penggetaran. *Filling ability* pada SCC diukur dengan melakukan uji *slump flow* pada SCC segar. Prosedur pengujian *slump flow* pada dasarnya sama dengan prosedur pengujian *slump* pada beton normal. Namun pada pengujian *slump flow*, dilakukan pengukuran pada penyebaran SCC.

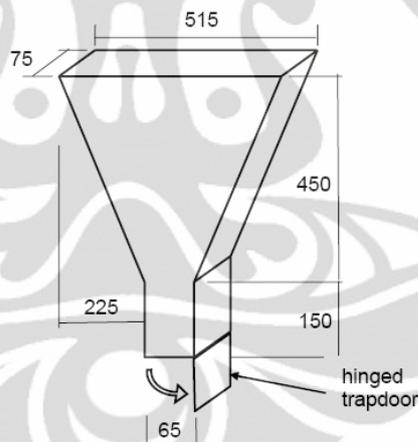
Peralatan yang digunakan pada uji *slump flow* adalah Abram's Cone, seperti yang digunakan pada uji *slump* pada beton normal, dan papan *slump flow* yang berfungsi untuk mengetahui penyebaran SCC.



**Gambar 2.5.** Papan *Slump Flow*

Sebagai pembatasan, EFNARC mensyaratkan *slump flow* minimum pada SCC sebesar 650-800 mm. Sementara menurut ASTM C143, SCC biasanya memiliki *slump flow* dengan *range* antara 560-760 mm.

Selain itu, untuk mengetahui *filling ability* SCC, juga dapat dilakukan pengujian *V-Funnel* yang juga ditujukan untuk mengetahui viskositas SCC.



**Gambar 2.6.** V-Funnel

Untuk mengetahui *filling ability* menggunakan V-Funnel, prosedurnya adalah dengan mengisi corong dengan SCC hingga penuh. Pada saat pengisian, bukaan di bagian bawah V-Funnel ditutup. Setelah V-Funnel terisi penuh, bukaan pada bagian bawah tersebut dibuka, dan dilakukan penghitungan waktu sejak bukaan dibuka hingga SCC pada corong habis mengalir. *Filling ability* diwakilkan oleh waktu yang diperlukan oleh SCC untuk mengalir seluruhnya.

b. *Passing Ability*

*Passing ability* adalah kemampuan SCC untuk mengalir melalui suatu celah berdasarkan ukuran agregat maksimumnya tanpa mengalami segregasi komposisi penyusunnya.

Untuk mengetahui *filling ability* sekaligus *passing ability* SCC, dilakukan pengujian L-Box. Pengujian L-Box dilakukan pada SCC segar, dengan cara menuangkan SCC ke dalam alat uji yang berkatup pada bagian pertemuan antara bidang horizontal dengan vertikal. Setelah SCC dituang, katup dibuka, sehingga SCC dapat mengalir ke bagian horizontal.

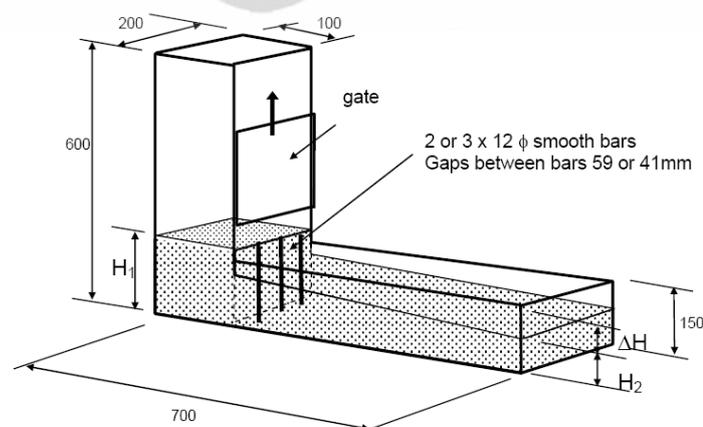
*Filling* dan *passing ability* SCC diperkirakan dengan mengukur ketinggian campuran beton pada sisi horizontal dan sisi vertikal alat uji, sehingga didapatkan nilai  $H_1$  dan  $H_2$ . Nilai *passing ability* diperhitungkan menggunakan persamaan berikut:

$$PA = \frac{H_2}{H_1}$$

Dengan  $H_1$  = Ketinggian SCC pada bagian vertikal

$H_2$  = Ketinggian SCC pada bagian horizontal

Air dijadikan sebagai standar penggunaan rumus ini. Pada air, nilai perhitungan tersebut akan sama dengan 1. Sehingga, semakin mendekati 1, SCC akan memiliki sifat yang semakin mengalir. Tim riset EU menyarankan nilai pengujian L-Box yang baik untuk SCC adalah sekitar 0,8 (*Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, EFNARC).



Gambar 2.7. L-Box

c. Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan SCC untuk tetap menjadi homogen selama pencampuran, distribusi, pengecoran, dan perawatan. Stabilitas SCC diwakilkan oleh nilai yang diperoleh pada pengujian *Visual Stability Index* (VSI). Pengujian VSI dilakukan setelah pengujian *slump flow* dengan menggunakan SCC segar yang diuji pada *slump flow*. Pengujian dilakukan dengan mengamati SCC secara visual setelah SCC tidak mengalir, kemudian menggolongkannya menjadi golongan 0-3. Semakin kecil nomor golongan, menunjukkan SCC yang semakin stabil, dengan distribusi agregat yang merata, serta tidak menunjukkan tanda-tanda terjadinya *bleeding* maupun segregasi.



**Gambar 2.8** Penggolongan SCC Berdasarkan VSI

### 2.2.6 Kriteria SCC

Untuk dapat mengontrol kualitas SCC, EFNARC membatasi properti SCC, baik dari segi jumlah material yang digunakan, maupun hasil pengujian *workability*.

**Tabel 2.1.** Kriteria SCC

<b>Properti</b>	<b>Parameter</b>	<b>Kriteria</b>
<i>Mix Design</i>	Agregat kasar	< 50%
	Faktor air semen	0,8 – 1,0
	<i>Cementitious</i>	400 – 600 kg/m <sup>3</sup>
	Agregat halus	> 40% volume mortar
		< 50% volume pasta
	Air	< 200 liter
Pasta	> 40% volume campuran	
<i>Workability</i>	<i>Slump flow</i>	650 – 800 mm
	T <sub>50</sub>	2 – 5 detik
	J-Ring	0 – 10 mm
	V-Funnel	8 – 12 detik
	L-Box	H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub> = 0,8 – 1,0

(EFNARC *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, 2002)

## 2.3 KOMPONEN PENYUSUN BETON

### 2.3.1 Semen Portland

Menurut ASTM C 160, semen Portland didefinisikan sebagai material yang mengalami pengerasan, dan membentuk produk yang tahan air akibat reaksi kimianya dengan air. Sementara, menurut SNI 15-2049-1994, semen Portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen Portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk Kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambah lain bersifat hidrolis dan gips sebagai bahan pembantu.

Pada proses hidrasi, yaitu reaksi kimia pada semen akibat air, semen mengalami perubahan komposisi kimia. Perubahan komposisi kimia ini juga disertai dengan perubahan semen secara fisik menjadi pasta semen, dan kemudian mengeras.

#### 2.3.1.1 Proses Pembuatan Semen

Terdapat dua jenis proses pembuatan semen, yaitu proses basah dan proses kering.

##### 1. Proses Basah

Proses basah cocok digunakan pada material mentah yang bersifat gembur, seperti kapur dan tanah liat, yang sudah siap terurai di dalam air untuk

membentuk lumpur (*slurry*). Air sebanyak 30% dari berat akan dibuang pada tahap awal proses kiln.

## 2. Proses Kering

Proses kering dilakukan pada material keras seperti batu kapur dan shale. Kelengasan dibuang sebagian pada tahap awal, umumnya ketika dilakukan penggilingan. Campuran yang relatif kering ini umumnya dilewatkan sistem *preheater* yang memanfaatkan gas buangan dari kiln.

### 2.3.1.2 Komposisi Kimia Semen

Material penyusun semen sebagian besar merupakan material kapur, silika, alumina, dan oksida besi. Pada saat proses pembuatan semen di dalam *kiln*, material-material tersebut berinteraksi satu sama lain sehingga membentuk produk yang lebih kompleks dan mencapai kesetimbangan kimia. Produk yang dihasilkan oleh interaksi antar material tersebut merupakan senyawa-senyawa utama pembentuk semen.

**Tabel 2.2.** Senyawa Utama Pembentuk Semen

Senyawa Utama	Rumus Oksida	Notasi Singkat	Kadar rata-rata (%)
Trikalsium silikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50
Dikalsium silikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	25
Trikalsium aluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	12
Tetrakalsium aluminoferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8
Kalsium sulfat dihidrat (Gypsum)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}\tilde{\text{S}}\text{H}_2$	3,5

(Nugraha, Paul, dan Antoni, Teknologi Beton, p. 31)

Senyawa-senyawa ini terdiri dari oksida-oksida dengan komposisi yang terdapat dalam Tabel 2.2.

**Tabel 2.3.** Oksida Pembentuk Semen

Oksida	Berat (%)
CaO	63
SiO <sub>2</sub>	22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5
MgO	2,6
K <sub>2</sub> O	0,6
Na <sub>2</sub> O	0,3
SO <sub>2</sub>	2,0
CO <sub>2</sub>	-
H <sub>2</sub> O	-

(Nugraha, Paul, dan Antoni, Teknologi Beton, p. 31)

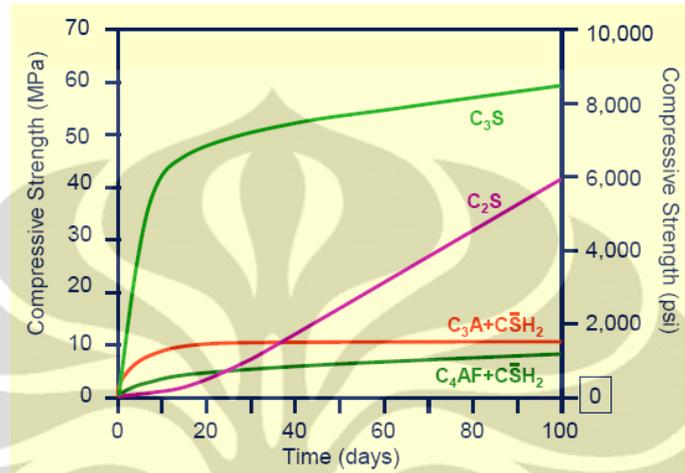
### 2.3.1.3 Hidrasi pada Semen Portland

Pada kondisi kering, senyawa-senyawa pembentuk semen Portland mengalami kesetimbangan beku. Namun, pada kesetimbangan beku, senyawa-senyawa tersebut tidak stabil secara termodinamis, sehingga memiliki kecenderungan untuk bereaksi dengan air dan membentuk produk hidrasi yang lebih stabil. Pada reaksi kimia semen Portland dengan air inilah semen mulai menjadi *bonding agent*, yaitu dengan membentuk produk hidrasi dari senyawa silikat dan aluminat menjadi sebuah massa yang lebih keras dan kuat, yaitu pasta semen.

C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S merupakan senyawa-senyawa pembentuk semen dengan kadar paling tinggi, sehingga produk-produk hidrasi dari kedua senyawa tersebut merupakan produk hidrasi yang dominan. Produk hidrasi C<sub>3</sub>S adalah C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> (kalsium silikat hidrat, biasa disebut dengan notasi singkat C-S-H) dalam bentuk hidrat mikrokristal dan Ca(OH)<sub>2</sub> dalam bentuk kristal. C<sub>3</sub>S terhidrasi secara cepat, dan mengeras secara cepat, sehingga produk hidrasi dari C<sub>3</sub>S menentukan kekuatan awal. Sementara C<sub>2</sub>S memiliki produk hidrasi yang sama dengan C<sub>3</sub>S, namun mengandung Ca(OH)<sub>2</sub> yang lebih sedikit. C<sub>2</sub>S, tidak seperti C<sub>3</sub>S, terhidrasi secara lambat, dan mengeras secara lebih lambat, sehingga produk hidrasinya menentukan kekuatan pada umur lebih dari 7 hari.

Selain C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S, senyawa lain yang terkandung dengan presentase kecil dalam semen adalah C<sub>3</sub>A. Reaksi dari C<sub>3</sub>A dengan air terjadi sangat cepat dan melepaskan energi panas yang tinggi, disebut juga dengan *flash set*. Untuk

menghindari terjadinya *flash set*, pada saat proses pembuatannya, semen ditambahkan gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , dengan notasi singkat  $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ). Namun, hidrasi  $\text{C}_3\text{A}$  tidak banyak berpengaruh terhadap perkembangan kekuatan beton.



**Gambar 2.9.** Perkembangan Kekuatan Senyawa Pembentuk Semen (Mindess et al, 2003)

Reaksi yang terjadi pada proses hidrasi adalah sebagai berikut:

1. Reaksi pada trikalsium silikat ( $\text{C}_3\text{S}$ )



2. Reaksi pada dikalsium silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ )



3. Reaksi pada trikalsium aluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ )



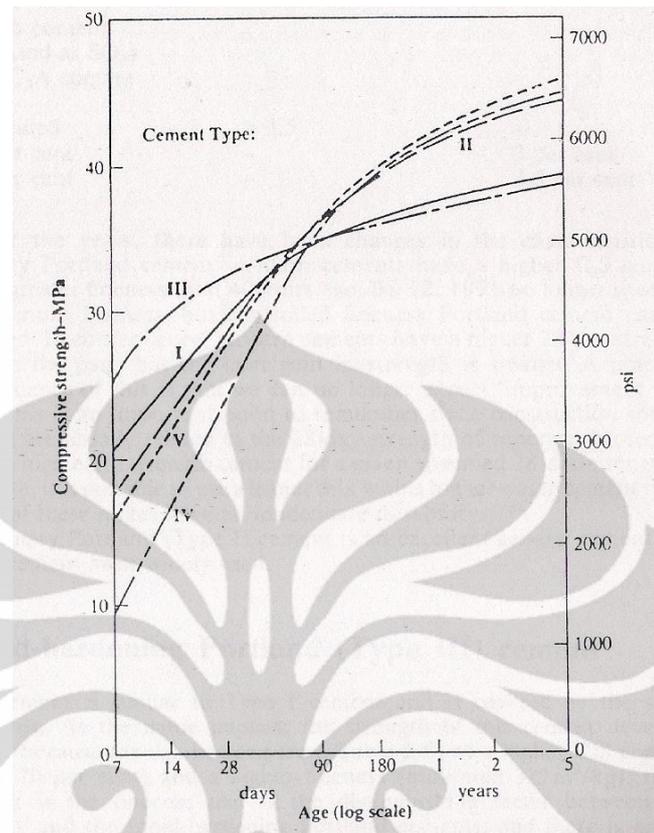
4. Reaksi pada tetrakalsium aluminoforit ( $\text{C}_4\text{AF}$ )



Tabel 2.4. Produk Hidrasi Senyawa Pembentuk Semen dan Sifatnya

Senyawa Pembentuk Semen	Produk Hidrasi	Sifat
C <sub>3</sub> S dan C <sub>2</sub> S	Kalsium Silikat Hidrat C-S-H	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Partikel berbentuk rongga</li> <li>- Merupakan 50-60% volume pasta semen terhidrasi</li> </ul>
	Kalsium Hidroksida Ca(OH) <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Merupakan 20-25% volume pasta semen terhidrasi</li> <li>- Mudah larut dalam air</li> <li>- Memiliki pH 12,4 – 13,5 sehingga dapat mencegah karat pada baja tulangan</li> <li>- Mendorong terjadinya serangan sulfat</li> </ul>
C <sub>3</sub> A + gypsum	Kalsium Sulfoaluminat (ettringite) C <sub>6</sub> A $\bar{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Merupakan 15 – 20% volume pasta semen terhidrasi</li> <li>- Kristal berbentuk jarum</li> <li>- Memperlambat terjadinya hidrasi</li> </ul>
C <sub>3</sub> A + air + CH	Kalsium Aluminat Hidrat C <sub>4</sub> AH <sub>19</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membentuk lapisan protektif</li> <li>- Tidak memberikan pengaruh besar terhadap kekuatan beton</li> </ul>
C <sub>4</sub> AF + air + CH	Kalsium Aluminoferrit Hidrat C <sub>6</sub> AFH <sub>12</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tidak memberikan pengaruh besar terhadap kekuatan beton</li> <li>- Memiliki resistensi sulfat yang lebih tinggi daripada C<sub>4</sub>AH<sub>19</sub></li> </ul>
C <sub>4</sub> AF + gypsum	Kalsium Sulfoferrit C <sub>6</sub> A $\bar{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mempercepat hidrasi silikat</li> </ul>

Sementara untuk setiap tipe semen, perkembangan kekuatan ditunjukkan oleh gambar berikut:



**Gambar 2.10.** Perkembangan Kekuatan Tekan pada Semua Tipe Semen (Neville, dan Brooks, *Concrete Technology*, 1994)

### 2.3.2 Agregat

Menurut ASTM C 125-03, agregat didefinisikan sebagai material berbutir seperti pasir, kerikil, batu pecah atau ampas pembakaran besi yang digunakan dengan media pengikat untuk membentuk mortar semen atau beton. Selain itu, agregat dapat didefinisikan sebagai material granular berdiameter tertentu yang keras dan kaku hasil disintegrasi alami dari batu atau hasil yang diperoleh dari industri pemecah batu.

Agregat merupakan material penyusun beton yang memiliki kontribusi terbesar dalam volume beton. Setidaknya 70-75% volume beton diisi oleh agregat, sehingga kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton, seperti stabilitas volume, ketahanan abrasi, dan durabilitas. Sesuai dengan ASTM, pada campuran beton, agregat normal yang digunakan harus memiliki berat isi yang tidak kurang dari  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.3.2.1 Jenis Agregat

Ukuran agregat yang digunakan dalam campuran beton sangat bervariasi, yaitu antara puluhan milimeter hingga sepersepuluh millimeter. Bila diklasifikasikan secara umum, berdasarkan ukurannya, agregat dapat dipisahkan menjadi dua jenis, yaitu agregat kasar dan agregat halus.

#### 1. Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan agregat yang butirannya tertahan pada saringan 4,75 mm atau saringan No.4 (ASTM C 125-03).

Berdasarkan ASTM C 33 – 03, standar gradasi agregat kasar adalah sebagai berikut

**Tabel 2.5.** Standar Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Nominal (mm)	Jumlah yang lebih halus dari setiap saringan (%)						
	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm
25-12,5	100	90-100	20-55	0-10	0-5		
25-9,5	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	
25-4,75	100	95-100		25-60		0-10	0-5
19-9,5		100	90-100	20-55	0-15	0-5	
19-4,75		100	90-100		20-55	0-10	0-5

(ASTM C 33 – 03)

#### 2. Agregat Halus

Agregat halus merupakan agregat yang butirannya lolos saringan 9,5 mm (saringan 3/8) dan hampir seluruhnya melewati saringan 4,75 mm (saringan No.4) (ASTM C 125-03). Sementara menurut SK SNI 03-2847-2002, agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu, dan memiliki ukuran butir sebesar 5,0 mm. Secara garis besar, agregat halus harus bebas dari bahan-bahan organik, lempung, dan partikel yang lebih kecil dari saringan no.100.

Standar gradasi agregat halus adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.6.** Standar Gradasi Agregat Halus

IS Sieve Design	IS 383 –1963				ASTM C 33 – 03
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	
9,5 mm	100	100	100	100	100
4,75 mm	90-100	90-100	90-100	95-100	95-100
2,36 mm	60-95	75-100	85-100	95-100	80-100
1,18 mm	30-70	55-90	75-100	90-100	50-85
600 µm	15-34	35-59	60-79	80-100	25-60
300 µm	5-20	8-30	12-40	15-50	5-30
150 µm	0-10	0-10	0-10	0-15	0-10

(Raju, N. Khrisna, *Design of Concrete Mixes*, 1987)

### 2.3.2.2 Karakteristik Agregat

Beberapa karakteristik fisik dan mekanik beton, seperti daya tahan, kekuatan dan *performance* sangat tergantung dari agregat yang digunakan, sehingga agregat harus benar-benar terikat dengan baik dengan agen pengikat (semen) dan juga mempertahankan kekuatan, bentuk, dan tekstur agregat sepanjang masa layannya.

Karakteristik agregat yang paling penting antara lain:

a. Berat Jenis

Berat jenis adalah rasio antara massa dengan volume dari material

$$\text{berat jenis} = \frac{\text{berat material}}{\text{volume material} \times \text{kepadatan air}}$$

b. Berat Isi

Berat isi adalah massa agregat dibagi volume agregat

c. Void

Void atau rongga udara menggambarkan jumlah udara yang terdapat pada spasi partikel agregat.

$$\text{rongga udara} = \text{volume total} - \text{volume agregat}$$

$$\text{rongga udara (\%)} = \frac{\text{berat jenis} \times \text{kepadatan air} - \text{berat isi}}{\text{berat jenis} \times \text{kepadatan air}}$$

d. Kelembaban

Agregat secara umum merupakan material yang berpori, sehingga dapat menyerap kelembaban.

$$\text{Kelembaban} = \frac{\text{berat agregat asli} - \text{berat kering oven}}{\text{berat kering oven}} \times 100\%$$

e. Gradasi dan Modulus Kehalusan (*Fineness Modulus*)

Gradasi adalah proporsi partikel agregat yang didistribusi pada *range-range* ukuran tertentu. Sementara Modulus Kehalusan adalah angka yang diperoleh dengan menjumlahkan persen tertahan dari setiap saringan dibagi 100. Modulus kehalusan agregat biasa berkisar antara 2,0 – 4,0. Semakin besar nilai modulus kehalusan, maka semakin kasar pula butiran agregat, dan sebaliknya.

### 2.3.3 Air

Air merupakan komponen yang penting dalam pembentukan beton. Karena tanpa penambahan air, semen tidak dapat terhidrasi menjadi pasta semen, sehingga tidak dapat mengikat agregat-agregat yang juga penting dalam menentukan kekuatan beton. Selain itu, pada campuran beton, air juga berperan dalam mempermudah beton untuk dikerjakan (meningkatkan *workability*).

Namun di sisi lain, penambahan air yang terlalu banyak juga dapat mengurangi kekuatan beton. Selain itu, air yang digunakan juga tidak selalu terbebas dari mineral, senyawa-senyawa terlarut, dan butiran tanah halus sehingga dikhawatirkan dapat mengganggu reaksi hidrasi yang terjadi pada semen.

Kedua hal di atas menyebabkan penambahan air pada beton tidak boleh terlalu banyak, maupun terlalu sedikit.

### 2.3.3.1 Kuantitas Air

Kuantitas air yang diperlukan untuk *workability* tertentu bergantung dari sifat material yang digunakan. Air yang diperlukan dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini:

a. Ukuran agregat maksimum

Semakin besar diameter agregat maksimum, maka semakin sedikit air yang harus ditambahkan karena jumlah pasta semen yang diperlukan untuk mengikat agregat semakin sedikit.

b. Bentuk butir

Bentuk agregat yang cenderung bulat menyebabkan semakin sedikit air yang ditambahkan.

c. Gradasi agregat

Untuk agregat dengan gradasi baik dan merata, kebutuhan air menurun untuk *workability* yang sama.

d. Kotoran pada agregat

Semakin banyak kotoran yang terkandung dalam agregat, maka kebutuhan air semakin meningkat.

### 2.3.3.2 Kualitas Air

Air yang mengandung kotoran dan senyawa kimia yang cukup banyak akan mengganggu proses pengerasan beton. Sehingga, secara umum dapat dikatakan bahwa *semua air yang dapat diminum dapat dipakai sebagai campuran beton*. Namun dengan pernyataan ini, parameter-parameter yang menyatakan kelayakan air sebagai campuran dalam beton tidak dapat didefinisikan dengan jelas sehingga diperlukan standar lain yang mewakili kandungan senyawa kimia dan kotoran organik yang diperbolehkan pada air campuran beton.

**Tabel 2.7.** Batas Toleransi Kotoran pada Air Campuran Beton

<b>Kotoran</b>	<b>Konsentrasi Maks (ppm)</b>
Suspensi	2.000
Ganggang	500-1.000
Karbonat	1.000
Bikarbonat	400-1.000
Sodium sulfat	10.000
Magnesium sulfat	40.000
Sodium klorida	20.000
Kalsium klorida	50.000
Magnesium klorida	40.000
Garam besi	40.000
Fosfat, Arsenat, Borat	500
Garam Zn, Cu, Mn, Sn	500
Asam inorganic	10.000
Sodium hidroksida	500
Sodium sulfide	100
Gula	500

(Nugraha, dan Paul, Antoni, 2007)

### 2.3.4 *Admixture*

Di samping menggunakan semen khusus, untuk mencapai target tertentu dalam rancang campur beton dapat digunakan *admixture* pada semen yang biasa digunakan. *Admixture* didefinisikan sebagai suatu material, selain semen, air, dan agregat, yang digunakan sebagai bahan penyusun beton yang ditambahkan pada saat pencampuran (Shetty, MS, 2005).

#### 2.3.4.1 Tipe *Admixture*

Menurut ASTM, *admixture* digolongkan menjadi tujuh golongan, yaitu:

1. Tipe A (*Water-reducing*)

Berfungsi untuk mengurangi kandungan air pada campuran, yaitu sekitar 5 – 10% pada beton dengan kelecakan normal, dan hingga 15% pada beton dengan kelecakan sangat tinggi.

2. Tipe B (*retarding*)

Berfungsi untuk menunda proses *setting* dan pengerasan pasta semen. *Retarder* cocok digunakan untuk pengecoran pada daerah yang panas.

3. Tipe C (*accelerating*)

Berfungsi untuk mempercepat perkembangan kekuatan awal beton, yaitu pada saat tahap *hardening*. *Accelerator* cocok digunakan pada pengecoran di daerah dengan suhu rendah, yaitu sekitar 2 – 4 °C.

4. Tipe D (*water-reducing and retarding*)

5. Tipe E (*water-reducing dan accelerating*)

6. Tipe F (*high-range water-reducing*)

7. Tipe G (*high-range water-reducing dan retarding*)

*Admixture* Tipe D, E, F, dan G merupakan kombinasi dari *admixture* tipe A, B, dan C. Fungsi dari masing-masing tipe *admixture* bervariasi berdasarkan kombinasinya.

#### 2.3.4.2 *Superplasticizer*

*Superplasticizer* merupakan bahan tambahan (*admixture*) yang ditambahkan pada campuran beton untuk mengurangi penambahan jumlah air, tanpa mengurangi *workability* campuran beton. *Superplasticizer* disebut juga *high range water reducers* (HRWR), dan berdasarkan ASTM, *admixture* ini digolongkan dalam Tipe F.

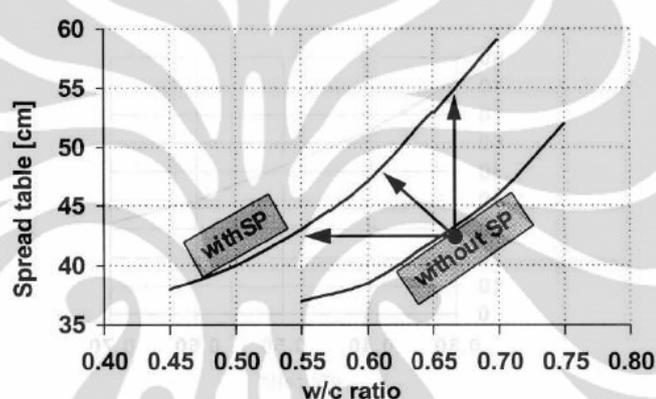
*Superplasticizer* adalah *admixture* yang penting dalam pembentukan *Self-Compacting Concrete* (SCC) karena dengan penambahan *superplasticizer* dengan kadar tertentu pada campuran beton, *workability* meningkat, sehingga didapatkan beton yang mudah mengalir dan tidak perlu dilakukan pemadatan secara manual maupun mekanis.

##### a. Dampak dan Fungsi *Superplasticizer*

Bahan tambahan ini digunakan untuk mendapatkan beton dengan sifat lebih mengalir, yang sangat berguna ketika pengecoran dilakukan pada daerah-daerah yang sempit dan sulit terjangkau. Selain itu, *superplasticizer* juga digunakan untuk mendapatkan beton dengan kekuatan dan performa tinggi. Pada rancangan campuran beton mutu tinggi, faktor air semen dikurangi, dan ditambahkan *superplasticizer* dalam campurannya, sehingga kekuatan beton meningkat. Namun, pengurangan jumlah air ini tidak mengurangi kelecakan beton

karena *superplasticizer* yang ditambahkan dapat mengurangi air yang digunakan hingga 25-35% (Nugraha and Antoni).

Penggunaan *superplasticizer* pada campuran beton memungkinkan beton memiliki faktor air semen yang lebih rendah, dibandingkan beton tanpa *superplasticizer* dengan faktor air semen yang sama. Sehingga beton dengan *superplasticizer* memiliki kuat tekan yang lebih tinggi. Namun penambahan *superplasticizer* yang terlalu banyak dapat mengakibatkan *bleeding* dan segregasi jika rancangan campuran tidak dikontrol dengan baik.



Gambar 2.11. Perbandingan Keleccakan dan Faktor Air Semen pada Beton dengan dan Tanpa *Superplasticizer*

#### b. Cara Kerja *Superplasticizer*

Penambahan *superplasticizer* pada campuran beton tidak menyebabkan reaksi kimia dengan semen ataupun material penyusun beton lainnya. Pengaruh *superplasticizer* hanya sebatas pengaruh secara fisik, yaitu mengurangi kekentalan campuran beton.

*Superplasticizer* bekerja dengan mendispersi antar partikel semen. Pada proses hidrasi semen, partikel-partikel semen memiliki kecenderungan untuk membentuk suatu kumpulan yang menyebabkan air terjebak di dalam kumpulan partikel semen tersebut. Terjebaknya air dalam semen mengakibatkan *flowability* beton menjadi berkurang, serta mengakibatkan terjadinya rongga-rongga udara yang mengurangi kekuatan beton.

*Superplasticizer* yang ditambahkan pada campuran beton menyebabkan partikel-partikel semen terdispersi, yaitu mengalami pemisahan antar partikel

semen yang berdekatan. Pemisahan ini memungkinkan partikel air tersebar merata antar partikel semen, sehingga beton lebih mudah mengalir tanpa penambahan air yang terlalu banyak.

#### 2.4 SEMEN PORTLAND TIPE V

Semen tipe V merupakan semen yang tahan sulfat. ASTM C 150-94 membatasi kadar  $C_3A$  pada semen tipe V dengan batas maksimum 5%, dan jumlah kadar  $C_4AF$  ditambah 2 kali kadar  $C_3A$  memiliki batas maksimum sebesar 25%.

**Tabel 2.8.** Pembatasan Kadar Senyawa Kimia pada Semua Tipe Semen Portland

Senyawa	Tipe Semen				
	I	II	III	IV	V
$C_3S$ maksimum	-	-	-	35	-
$C_2S$ minimum	-	-	-	40	-
$C_3A$ maksimum	-	8	15	7	5
$C_4AF + 2(C_3A)$ maksimum	-	-	-	-	25

Pembatasan kadar  $C_3A$  bertujuan agar mengurangi dampak serangan sulfat pada beton. Hidrasi  $C_3A$  menghasilkan produk berupa kalsium aluminat hidrat, yang rawan terhadap serangan sulfat. Reaksi sulfat dengan kalsium aluminat hidrat menghasilkan produk berupa kalsium sulfoaluminat yang biasa disebut *ettringite* ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ , dengan notasi singkat  $C_6AF\bar{S}_3H_{32}$ ) yang mengakibatkan peningkatan volume beton sebesar 227%.

Sementara, pembatasan kadar  $C_4F$  dimaksudkan mengurangi dampak serangan kalsium sulfat. Hal ini dikarenakan aksi kalsium sulfat terhadap semen yang terhidrasi semakin kecil seiring dengan rendahnya rasio  $Al_2O_3$  terhadap  $Fe_2O_3$ . Selain itu,  $C_4AF$  dapat melindungi kalsium aluminat bebas dengan cara membentuk lapisan protektif di sekitar kalsium aluminat bebas. Sementara, pembatasan kadar  $C_4AF$  dan  $C_3A$  juga bertujuan agar mengurangi serangan sulfat secara internal.

Pembatasan kadar  $C_3A$  dan  $C_4F$  pada semen Portland tipe V menjadikan  $C_3S$  dan  $C_2S$  senyawa yang dominan dalam semen, sehingga kadar silikat pada semen Portland tipe V tergolong tinggi. Karena itulah, semen Portland tipe V memiliki kekuatan yang relatif tinggi, namun kekuatan awalnya tergolong rendah.

**Universitas Indonesia**

Panas hidrasi yang dihasilkan oleh semen Portland tipe V tidak jauh berbeda dengan semen Portland tipe IV yang memiliki panas hidrasi rendah.

**Tabel 2.9.** Presentase Senyawa pada Seluruh Tipe Semen Portland

Tipe Semen	Komposisi (%)							
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	CaO	MgO	Ignition Loss
I	59	15	12	8	2,9	0,8	2,4	1,2
II	46	29	6 (maks.8)	12	2,8	0,6	3	1,0
III	56	15	12	8	3,9	1,4	2,6	1,9
IV	30 (maks. 35)	46 (min. 40)	5 (maks. 7)	13	2,9	0,3	2,7	1,0
V	43	36	4 (maks.5)	12	2,7	0,4	16	1,0

(Neville, dan Brooks, *Concrete Technology*, 1994)

Perkembangan kekuatan tekan pada semen Portland tipe V dapat dilihat pada Gambar 2.10., dimana semen Portland tipe V memiliki kekuatan awal yang relatif rendah. Namun ketika mencapai umur 5 tahun, kuat tekannya semakin meningkat, sehingga secara ideal memiliki kuat tekan yang paling tinggi di antara kelima tipe semen.

## 2.5 KARAKTERISTIK BETON KERAS

### 2.5.1 Kekuatan Tekan Beton

Kekuatan tekan beton merupakan kemampuan beton untuk menahan gaya aksial yang dibebankan langsung pada permukaan beton. Ketika beban yang diberikan melebihi kekuatan tekannya, maka beton akan mengalami kegagalan. Maka, dalam merancang campuran beton, kekuatan tekan merupakan target utama yang mewakili kualitas beton secara keseluruhan.

Tingkat kekuatan tekan penuh dari beton adalah besar kekuatan tekan beton pada hari ke-28 dihitung sejak dilakukan pengadukan. Sementara, untuk memperoleh nilai kekuatan tekan pada beton dengan umur kurang dari 28 hari, perlu dilakukan konversi berdasarkan korelasi yang tertera pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.10.** Faktor Konversi Kekuatan Tekan Beton

Umur Beton (hari)	3	7	14	21	28
Nilai Konversi	0,46	0,70	0,88	0,96	1,00

### 2.5.2 Kekuatan Tarik Belah Beton

Kekuatan tarik dalam beton merupakan suatu sifat yang penting yang mempengaruhi perambatan dan ukuran retak di dalam struktur. Metode yang digunakan dalam pengujian kekuatan tarik belah adalah ASTM C 496.

Kuat tarik beton harus cukup besar untuk menahan retak akibat susut dan perubahan temperatur.

Terdapat tiga buah pengujian yang dapat dilakukan pada beton keras untuk mengetahui kekuatan tarik pada beton, yaitu:

- a. Uji tarik langsung  
Dilakukan dengan menguji spesimen balok dengan gaya tarik langsung.
- b. Uji tarik belah  
Dilakukan dengan menguji sampel silinder dengan gaya tekan pada garis *diametral* sampel.
- c. Uji lentur  
Dilakukan dengan menguji balok pada pembebanan di dua titik sepanjang balok.

Uji tarik langsung menghasilkan data yang akurat, namun sangat sulit dilakukan, dan tidak biasa digunakan, sehingga pengujian yang dilakukan biasanya adalah pengujian tarik belah, dan uji lentur.

Untuk beton normal, berdasarkan pengujian yang telah dilakukan menurut *ACI Building Code 318 – 89*, didapatkan hubungan antara kuat tarik dengan kuat tekannya, yaitu:

$$f_t = 0,556 \times \sqrt{f_c'}$$

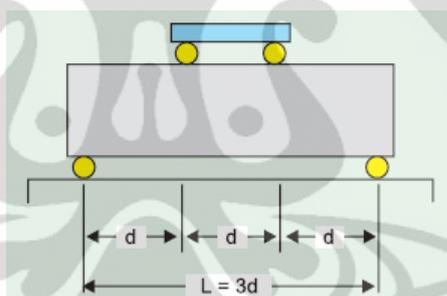
Dengan:  $f_t$  = kekuatan tarik (MPa)

$f_c'$  = kekuatan tekan (MPa)

### 2.5.3 Kekuatan Lentur Beton

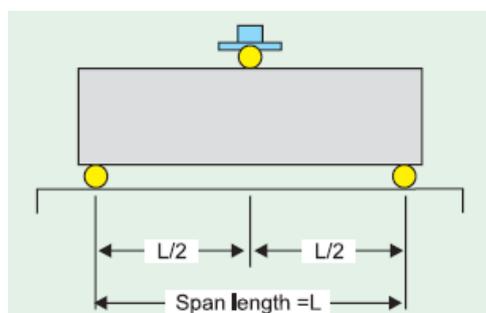
Kekuatan lentur merupakan salah satu hal yang mempengaruhi kekuatan beton ketika terjadi susut, tulangan baja yang berkarat, dan perubahan temperatur. Kekuatan lentur merupakan kekuatan yang secara dominan diperlukan dalam perencanaan beton untuk struktur tertentu, seperti perkerasan rigid, dan landasan pesawat terbang.

Kekuatan lentur diperkirakan dengan melakukan uji lentur pada sampel, dengan parameter berupa *Modulus of Rupture* (R), yaitu kuat lentur maksimum yang dialami oleh serat bawah balok beton. Terdapat dua metode pengujian lentur, yaitu *third-point loading* (ASTM C78) dan *central point loading* (ASTM C293). Pada metode *third-point loading*, pembebanan dibagi pada dua titik, dengan besar pembebanan setiap titik sebesar  $\frac{1}{2} P$ . Pada metode ini juga akan didapatkan nilai R yang lebih kecil daripada pengujian dengan metode *center-point loading*, dengan perbedaan sekitar 15%.



**Gambar 2.12.** Metode Pengujian *Third-Point Loading*

Sementara pada pengujian *center-point loading*, beban diletakkan di tengah bentang, dengan beban sebesar P.



**Gambar 2.13.** Metode Pengujian *Center-Point Loading*

Untuk keruntuhan yang terjadi pada bagian tengah bentang, *modulus of rupture* ( $R$ ) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$R = \frac{P \cdot L}{bd^2}$$

Sementara, jika keruntuhan terjadi pada bagian tarik di luar bagian tengah bentang, digunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{3P \cdot a}{bd^2}$$

Dengan:  $R$  = *modulus of rupture*

$P$  = beban maksimum

$L$  = panjang bentang

$b$  = lebar sampel

$d$  = tinggi sampel

$a$  = jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik sampel

Menurut ACI 318 – 83, nilai *modulus of rupture* pada beton adalah  $0,62 \sqrt{f_c'}$  MPa. Sementara menurut SNI 03-2847-2002, nilai *modulus of rupture* pada beton adalah  $0,7 \sqrt{f_c'}$  MPa.

#### 2.5.4 Permeabilitas Beton

Permeabilitas merupakan suatu ukuran yang menyatakan kemampuan fluida, baik cair maupun gas, untuk meresap ke dalam beton melalui pori-porinya, yang diakibatkan oleh tekanan luar. Beton dengan permeabilitas yang rendah umumnya memiliki kekuatan yang tinggi, dan tidak mudah bagi air maupun garam-garam yang terlarut dalam air untuk meresap melalui pori-pori beton.

Permeabilitas beton berkaitan erat dengan porositas, yaitu ukuran *void* atau rongga. *Void* dapat terjadi karena penguapan air yang terkandung dalam beton, maupun akibat pekerjaan penuangan beton ke dalam bekisting yang kurang merata. Melalui rongga-rongga tersebut, dapat terjadi rembesan zat cair yang berasal dari lingkungan eksternal beton.

Besarnya permeabilitas beton dapat dinilai berdasarkan koefisien permeabilitas beton (K) yang diperhitungkan berdasarkan persamaan Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta H A}{L \mu}$$

Dimana:  $dq/dt$  = debit alir  
 $\mu$  = viskositas  
 $\Delta H$  = perbedaan tekanan hidrolik  
 $A$  = luas permukaan  
 $L$  = ketebalan

## 2.6 SERANGAN SULFAT PADA BETON

Serangan sulfat merupakan sebuah istilah yang digunakan untuk menjelaskan serangkaian reaksi kimia dimana ion-ion sulfat yang berasal dari lingkungan luar beton menyerang komponen pasta semen (Skalny, *et al*, 2002). Serangan tersebut dapat terjadi bila beton mengalami kontak dengan garam sulfat yang terlarut dalam air. Namun, sulfat tidak dapat menyerang beton ketika berbentuk padat. Sulfat yang terlarut dalam air dapat hadir secara alamiah pada air tanah dan air laut. Keberadaan sulfat dalam air dapat juga dikarenakan oleh hadirnya bahan kimia, seperti pupuk, dan akibat pencemaran industri.

Faktor yang mempengaruhi tingkat serangan sulfat adalah:

- a. Permeabilitas beton  
 Permeabilitas merupakan ukuran yang menyatakan kemampuan fluida untuk meresap ke dalam beton. Sehingga, pada beton dengan permeabilitas tinggi, sulfat yang terdapat pada lingkungan sekitar beton muda meresap ke dalam beton, dan mempermudah terjadinya serangan sulfat.
- b. Konsentrasi sulfat yang terkandung dalam air  
 Semakin tinggi konsentrasi ion sulfat yang terkandung dalam air, akan semakin ganas pula serangan sulfat yang terjadi pada beton.
- c. Kadar  $C_3A$  pada semen  
 Hidrasi  $C_3A$  menghasilkan kalsium aluminat hidrat yang memiliki kecenderungan tinggi untuk mengalami serangan akibat natrium sulfat.
- d. Kadar  $Ca(OH)_2$  pada semen terhidrasi

Sama halnya dengan kalsium aluminat hidrat,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  memiliki kecenderungan tinggi untuk mengalami serangan akibat natrium dan magnesium sulfat.

### 2.6.1 Jenis Serangan Sulfat

Sulfat dapat menyerang beton melalui dua sumber, yaitu serangan sulfat internal, dan serangan sulfat eksternal.

#### 1. Serangan internal

Serangan internal terjadi jika sumber serangan sulfat berasal dari dalam beton. Sumber yang dimaksud bisa terdapat dalam *fly ash*, *slag*, agregat, bahan kimia tambahan. Selain itu, sulfat juga dapat terkandung dalam semen, yang berasal dari kalsium sulfat yang ditambahkan pada *clinker* pada saat proses pembuatan semen. Kalsium sulfat pada proses ini berfungsi untuk mengontrol karakteristik *setting* semen, dan mempercepat proses hidrasi pada *clinker*. Sebagian kecil kalsium sulfat yang ditambahkan tidak bereaksi pada saat proses pembuatan semen, sehingga pada semen terkandung sulfat dalam kadar yang kecil. Sulfat yang terkandung dalam semen dapat mengakibatkan *Delayed Ettringite Formation* (DEF).

#### 2. Serangan eksternal

Serangan eksternal bersumber dari larutan sulfat yang berasal dari lingkungan luar beton yang mengalami penetrasi pada beton. Larutan sulfat yang dimaksud dapat berasal dari air tanah, air laut, dan limbah industri. Selain itu, limbah industri dalam bentuk padat juga dapat menyebabkan terjadinya serangan sulfat. Limbah padat terpapar oleh presipitasi maupun air tanah, sehingga mencemari air hujan dan air tanah.

Pada penelitian ini, jenis serangan sulfat yang akan diteliti adalah serangan sulfat secara eksternal, yaitu serangan sulfat yang bersumber dari larutan pada lingkungan luar beton, yaitu air laut dan air sulfat murni.

### 2.6.2 Bentuk dan Mekanisme Serangan Sulfat

Menurut *ACI's Guide to Durable Concrete* (ACI 1992), terdapat dua mekanisme yang dapat dikategorikan sebagai serangan sulfat, yaitu pembedakan

gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dan pembentukan ettringite (kalsium sulfoaluminat,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

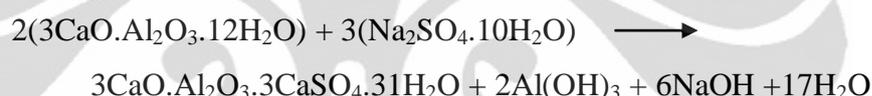
Senyawa sulfat biasa ditemui dalam bentuk kalsium, natrium, kalium, dan magnesium sulfat. Setiap senyawa sulfat tersebut memiliki pengaruh yang berbeda-beda pada beton, antara lain pembentukan ettringite dan gypsum.

#### a. Serangan Natrium Sulfat

Natrium sulfat dapat menyerang dua senyawa penyusun beton keras, yaitu kalsium hidroksida yang merupakan produk hidrasi  $\text{C}_2\text{S}$ , dan kalsium aluminat hidrat sebagai produk hidrasi  $\text{C}_3\text{A}$ . Reaksi yang terjadi pada serangan natrium sulfat terhadap kalsium hidroksida adalah sebagai berikut:



Sementara reaksi natrium sulfat terhadap kalsium aluminat hidrat adalah sebagai berikut:



Serangan natrium sulfat terhadap kalsium hidroksida membentuk gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) yang mengakibatkan penambahan volume pada beton.

#### b. Serangan Kalsium Sulfat

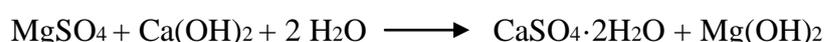
Selain natrium sulfat, garam kalsium sulfat juga dapat menyerang senyawa penyusun beton. Serangan kalsium sulfat merupakan serangan yang paling sering ditemui namun paling tidak agresif. Reaksi yang terjadi pada serangan kalsium sulfat adalah sebagai berikut:



#### c. Serangan Magnesium Sulfat

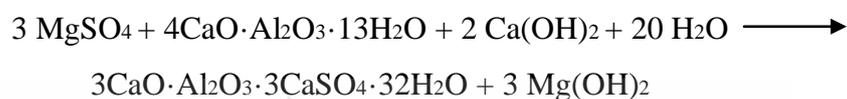
Magnesium sulfat merupakan senyawa yang memiliki sifat yang lebih merusak daripada senyawa sulfat yang lain karena reaksi serangan magnesium sulfat dapat mendekomposisi kalsium silikat hidrat, kalsium hidroksida  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dan kalsium aluminat hidrat.

Serangan magnesium sulfat terhadap kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat (C-S-H) mengakibatkan pembentukan gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).



$$3 \text{MgSO}_4 + 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 3 \text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

Sementara, serangan magnesium sulfat terhadap kalsium aluminat hidrat sehingga menghasilkan kalsium sulfoaluminat (ettringite).



### 2.6.3 Dampak Serangan Sulfat pada Beton

Secara umum, beton yang mengalami serangan sulfat memiliki karakteristik penampilan yang keputih-putihan, kerusakan terjadi pada sudut-sudut, dan kerusakan diikuti dengan keretakan (Neville dan Brooks, 1994). Kerusakan yang terjadi diakibatkan oleh pembentukan ettringite (kalsium sulfoaluminat) dan gypsum (kalsium sulfat) pada beton. Kedua produk serangan sulfat ini memiliki volume yang lebih besar daripada volume beton keras, sehingga mendesak, dan kemudian merusak beton.

Serangan sulfat mengakibatkan keretakan secara makro dan ekspansi beton yang dapat menyebabkan kekuatan struktur berkurang secara signifikan, maupun, secara ekstrim, kegagalan total pada struktur.

Keretakan dan kehancuran pada beton akibat serangan sulfat ini diakibatkan oleh dekomposisi produk hidrasi, seperti dekalsifikasi kalsium hidroksida  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dan dekomposisi kalsium silikat hidrat, C-S-H. Dekomposisi pada produk hidrasi ini menyebabkan ikatan kohesif antar partikel semen berkurang. Selain itu, ikatan antara semen dengan agregat juga melemah, sehingga memperbesar dampak yang terjadi.

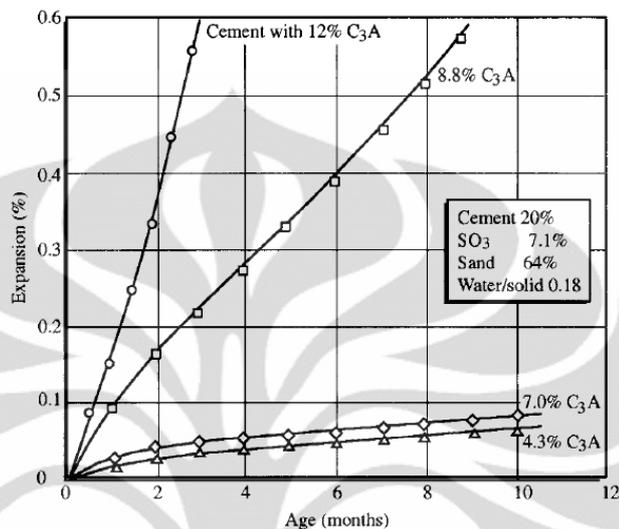
### 2.6.4 Pencegahan Serangan Sulfat

Untuk meminimalisir dampak serangan sulfat pada beton, dapat diterapkan beberapa teknologi, maupun modifikasi terhadap teknologi lama, seperti:

a. Penggunaan semen tahan sulfat

Semen tahan sulfat, seperti semen Portland tipe II dan tipe V mengandung  $\text{C}_3\text{A}$  dengan kadar rendah, sehingga mengurangi kadar kalsium sulfoaluminat

(*ettringite*) pada beton. Semakin kecil kadar  $C_3A$  dan kalsium sulfoaluminat yang terbentuk sebagai konsekuensinya, semakin kecil pula ekspansi yang terjadi pada beton ketika terjadi serangan sulfat.



**Gambar 2.14.** Ekspansi pada Mortar dengan Variasi Kadar  $C_3A$  (Ouyang, et al, 1988)

Namun, menurut Neville dan Brooks (1994), tipe semen yang digunakan bukan merupakan suatu prioritas utama untuk memitigasi serangan sulfat, kecuali beton memiliki permeabilitas yang rendah atau beton memiliki faktor air semen yang rendah.

b. Penggunaan *Supplementary Cementitious Material* (SCM)

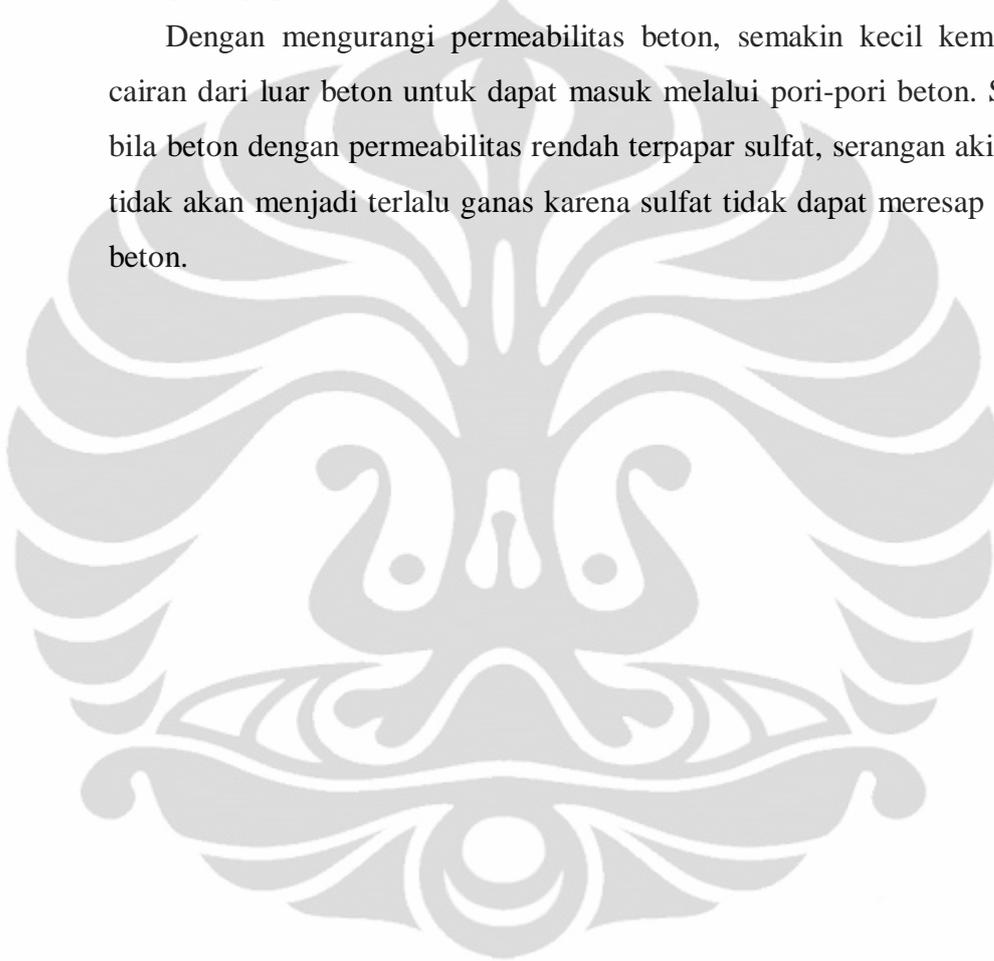
*Supplementary Cementitious Material* merupakan material yang digunakan sebagai pengganti semen pada komposisi campuran beton. SCM yang digunakan dapat berupa *fly ash*, *blast furnace slag* (kerak tanur tinggi), *silica fume*, metakaolin, dan pozzolan.

Seperti telah disebutkan pada bagian sebelumnya, kadar  $Ca(OH)_2$  merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi terjadinya serangan sulfat. Pozzolan pada semen akan bereaksi dengan  $Ca(OH)_2$ , sehingga mengurangi jumlah  $Ca(OH)_2$  bebas pada beton, sehingga mengurangi keganasan serangan sulfat yang terjadi.

Selain itu, dibandingkan dengan semen Portland biasa, semen Portland pozzolan memproduksi  $\text{Ca(OH)}_2$  yang lebih sedikit sebagai produk hidrasinya, sehingga dapat mengurangi dampak serangan sulfat dua kali lipat dibandingkan semen Portland biasa (*Ordinary Portland Cement*).

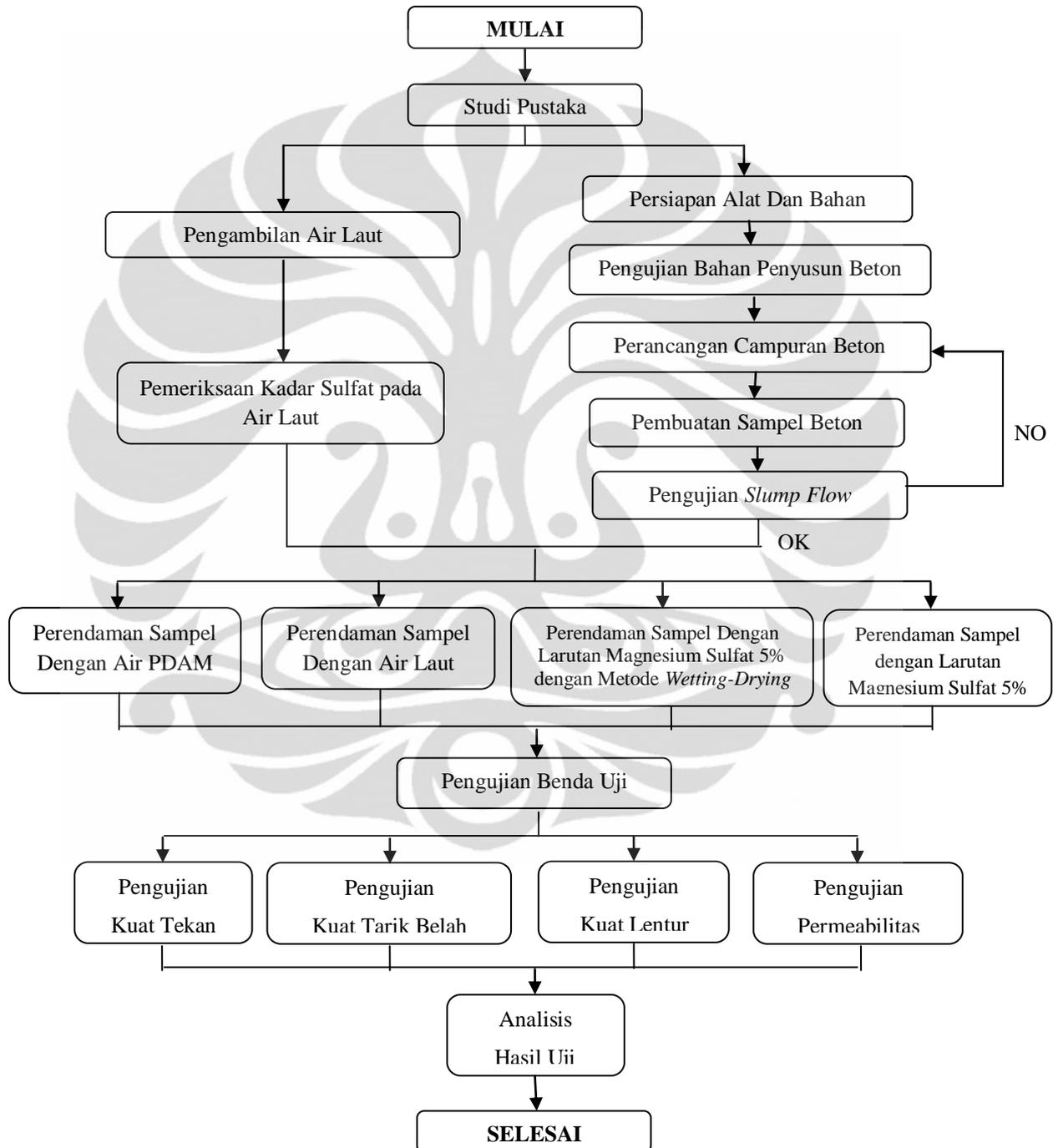
c. Mengurangi permeabilitas beton

Dengan mengurangi permeabilitas beton, semakin kecil kemungkinan cairan dari luar beton untuk dapat masuk melalui pori-pori beton. Sehingga, bila beton dengan permeabilitas rendah terpapar sulfat, serangan akibat sulfat tidak akan menjadi terlalu ganas karena sulfat tidak dapat meresap ke dalam beton.



**BAB 3**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 ALUR PENELITIAN**



**Gambar 3.1.** Alur Penelitian

## 3.2 PERENCANAAN JUMLAH SAMPEL

Jumlah sampel yang akan diuji bergantung pada variabel penelitian, dan pengujian yang dilakukan pada sampel. Pada penelitian ini, variabelnya adalah metode *curing*.

### 3.2.1 Variasi Metode *Curing*

Pada penelitian ini, akan dilakukan 4 jenis uji pada sampel, yaitu pengujian kuat tekan, pengujian kuat tarik belah, pengujian kuat lentur, dan pengujian permeabilitas, dengan variasi cara *curing* beton. Beton akan di-*curing* dengan 4 cara yang berbeda, yaitu dengan menggunakan:

a. Air PDAM

Air PDAM digunakan sebagai standar sampel beton yang tidak terendam oleh sulfat. Sampel standar ini kemudian digunakan sebagai pembanding kekuatan dan permeabilitas beton dengan beton yang direndam dengan air laut dan sulfat.

b. Air laut

Air laut mengandung sulfat yang dapat merusak beton. Untuk mengetahui pengaruh sulfat terhadap beton, sampel direndam dalam air laut dengan pengujian kadar sulfat dan garam-garam kimia lain pada air laut sebelum dilakukan perendaman.

Air laut yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari daerah Ancol, Jakarta Utara, dengan kadar sulfat sebesar 0,2% (2000 mg/l) dan klorida sebesar 0,9% (9200 mg/l).

c. Larutan sulfat

Garam klorida merupakan garam yang mendominasi komposisi garam pada air laut (dengan kadar sekitar 19,8%). Sementara garam sulfat terkandung dalam air laut dengan kadar sekitar 2,7% (RILEM Technical Comitee 32-RCA). Kadar garam klorida yang lebih besar daripada kadar garam sulfat ini dikhawatirkan mendominasi kerusakan yang terjadi pada sampel yang direndam dengan air laut, sehingga pengaruh serangan sulfat yang akan dipelajari tidak dapat terlihat dengan jelas. Oleh karena itu, selain

direndam dengan air laut, sampel juga akan direndam dengan larutan sulfat, sehingga dapat diamati kerusakan sampel akibat serangan garam sulfat saja.

Pada penelitian ini, larutan sulfat yang akan digunakan sebagai variasi *curing* adalah larutan magnesium sulfat. Alasan pemilihan larutan magnesium sulfat sebagai larutan perendam adalah karena garam magnesium sulfat menyerang beton dengan cara membentuk gypsum dan ettringite, sehingga memiliki sifat serangan yang ekspansif dan lebih berbahaya daripada senyawa sulfat lainnya. Pada penelitian ini, digunakan larutan magnesium sulfat dengan kadar 5%.

d. Larutan sulfat dengan metode *wetting-drying*

Beton yang mengalami perendaman dan pengangkatan dalam dan dari air laut secara bergantian akan mengalami serangan sulfat yang lebih ganas daripada beton yang secara terus-menerus direndam dalam air laut.

Tujuan dari perendaman beton dengan alternatif perendaman dan pengangkatan secara bergantian adalah untuk mengetahui ketahanan beton dengan semen Portland tipe V terhadap serangan sulfat. Hal ini dilakukan sebagai salah satu bentuk simulasi bangunan tepi pantai yang terpapar air laut secara pasang surut. Pada perendaman dengan metode ini, digunakan larutan magnesium sulfat dengan konsentrasi 5%.

Metode yang digunakan dalam mensimulasikan pasang-surut ini adalah dengan merendam dan mengangkat larutan yang digunakan sebagai media perendaman setiap dua hari sekali.

### 3.2.2 Pengujian Sampel

Sampel diuji dengan 4 pengujian, yaitu pengujian kuat tekan, pengujian kuat tarik belah, pengujian kuat lentur, dan pengujian permeabilitas. Perencanaan jumlah sampel dapat dituangkan dalam tabel berikut

**Tabel 3.1.** Perencanaan Jumlah Sampel

Metode Curing	Pengujian		Kuat Tekan		Kuat Lentur			Kuat Tarik Belah			Permeabilitas
	Umur Benda Uji										
	28		42	56	28	42	56	28	42	56	42
	Kecil	Besar									
<b>Air PDAM</b>	5	3	5	5	3	3	3	5	5	5	3
<b>Air Laut</b>	-	-	5	5	-	3	3	-	5	5	3
<b>Larutan Sulfat (wetting-drying)</b>	-	-	5	5	-	3	3	-	5	5	3
<b>Larutan Sulfat</b>	-	-	5	5	-	3	3	-	5	5	3
<b>TOTAL</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>12</b>



### 3.4 STANDAR PENGUJIAN

Dalam penelitian di laboratorium dilakukan pemeriksaan terhadap bahan-bahan pembentuk beton, khususnya terhadap agregat halus dan agregat kasar, pengujian terhadap beton segar dan pengujian terhadap beton yang telah mengeras. Sebagai standar dalam pemeriksaan dan pengujian ini berdasarkan ASTM Standard (*American Society for Testing and Materials*) dan DIN. Beberapa metode standar yang digunakan antara lain:

- a. Standar Pengujian Material Penyusun Beton
  - Agregat Kasar
 

Pemeriksaan Berat Isi	ASTM C – 29
Analisis <i>Specific Gravity</i> dan Absorpsi	ASTM C – 127
Analisis Saringan	ASTM C – 136
  - Agregat Halus
 

Pemeriksaan Berat Isi	ASTM C – 29
Analisis <i>Specific Gravity</i> dan Absorpsi	ASTM C – 128
Analisis Saringan	ASTM C – 136
Pemeriksaan Bahan Lewat Saringan No.200	ASTM C – 177
Pemeriksaan Kotoran Organik	ASTM C – 40
- b. Standar Pengujian Beton SCC Segar
 

Pengujian <i>Slump Flow</i>	EFNARC
-----------------------------	--------
- c. Standar Pembuatan Benda Uji
 

Pembuatan dan <i>Curing</i> Benda Uji di Laboratorium	ASTM C – 192
---	--------------
- d. Standar Pengujian Beton Keras
 

Pengujian Kuat Tekan	ASTM C – 39
Pengujian Kuat Tarik Belah	ASTM C – 496
Pengujian Kuat Lentur	ASTM C – 78 – 02
Pengujian Permeabilitas	DIN 1048

### 3.5 PENGUJIAN MATERIAL PENYUSUN BETON

#### 3.5.1 Pengujian Agregat Kasar

##### 1. Pemeriksaan Berat Isi

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan berat isi dan rongga udara dalam agregat kasar. Pengujian dilakukan berdasarkan ASTM C29 / C29M-97.

##### a. Peralatan

- Timbangan dengan ketelitian 0.1% berat contoh
- Talam kapasitas cukup besar untuk mengeringkan contoh agregat
- Tongkat pemadat diameter 15 mm, panjang 60 cm dengan ujung bulat sebaiknya terbuat dari baja tahan karat.
- Mistar perata (*straight edge*).
- Wadah baja yang cukup kaku berbentuk silinder dengan alat pemegang, dengan kapasitas wadah sebagai berikut:

**Tabel 3.3.** Kapasitas Wadah Untuk Pengujian Berat Isi Agregat Kasar

Kapasitas (liter)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Tebal wadah minimum (mm)		Ukuran butir maksimum (mm)
			Dasar	Sisi	
2,832	152,4 ± 2,5	154,9 ± 2,5	5,08	2,54	12,7
9,435	203,2 ± 2,5	292,1 ± 2,5	5,08	2,54	25,4
14,158	254,0 ± 2,5	279,4 ± 2,5	5,08	3,00	38,1
28,316	355,6 ± 2,5	284,4 ± 2,5	5,08	3,00	101,6

##### b. Prosedur

##### Berat isi lepas

1. Menimbang dan mencatat berat wadah ( $w_1$ )
2. Memasukkan benda uji dengan hati-hati agar tidak terjadi pemisahan butir-butir dari ketinggian maksimum 5 cm diatas wadah dengan menggunakan sendok atau sekop sampai penuh
3. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata

4. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji ( $w_1$ )
5. Menghitung berat benda uji ( $w_3 = w_2 - w_1$ )

Berat Isi padat agregat dengan cara Penusukan

1. Menimbang dan mencatat berat wadah ( $w_1$ )
2. Mengisi wadah dengan agregat halus dalam tiga lapis yang sama tebal. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tusukan secara merata. Pada pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah tiap-tiap lapisan.
3. Meratakan permukaan agregat halus dengan menggunakan perata.
4. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta agregat kasar ( $w_2$ ).
5. Menghitung berat benda uji ( $w_3 = w_2 - w_1$ )

**2. Analisis *Specific Gravity* dan Absorpsi**

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan *bulk* dan *apparent specific gravity* dan absorpsi dari agregat kasar, guna menentukan volume agregat dalam beton.

a. Peralatan

- Timbangan
- Panjang besi 8 inci dan tinggi 2,5 inci.
- Alat Penggantung Keranjang.
- Oven, dengan ukuran yang mencukupi dan dapat mempertahankan suhu  $[110 \pm 5]^\circ\text{C}$ .
- Handuk.
- Bahan: 10kg (2 x 5 kg) agregat kasar dalam kondisi SSD, diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempatan. Bahan benda uji lewat saringan no. 4 dibuang.

b. Prosedur

1. Merendam benda uji selama 24 jam
2. Menggulung benda uji dengan handuk, sampai air permukaannya habis, tetapi harus masih tetap lembab (kondisi SSD), lalu timbang benda uji.
3. Memasukkan benda uji ke keranjang dan direndam kembali dalam air, dan ditimbang. Sebelum ditimbang, container diisi benda uji, lalu digoyang-goyangkan dalam air untuk melepaskan udara yang terperangkap.
4. Mengeringkan benda uji dalam oven, mendinginkan, kemudian menimbang.

**3. Analisa Saringan**

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat kasar dengan menggunakan saringan dan untuk menentukan *Fineness Modulus* agregat kasar tersebut.

a. Peralatan

- Timbangan dan neraca.
- Satu set saringan: 25 mm (1"); 19.1 mm (3/4"); 12.5 mm (1/2"); 9.5 mm (1/4"); 4.76 mm (saringan no.4)
- Oven yang dilengkapi dengan pengukur suhu untuk memanasi sampai  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ .
- Alat pemisah contoh (*Sample Splitter*).
- Mesin penggetar saringan.
- Talam-talam.
- Kuas, sikat kuningan, sendok, dan alat-alat lainnya.

b. Bahan

Benda uji diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempat sebanyak:

- Ukuran maksimum 3.5"; berat minimum 35 kg.
- Ukuran maksimum 3"; berat minimum 30 kg.

- Ukuran maksimum 2.5"; berat minimum 25 kg.
- Ukuran maksimum 2"; berat minimum 20 kg.
- Ukuran maksimum 1.5"; berat minimum 15 kg.
- Ukuran maksimum 1"; berat minimum 10 kg.
- Ukuran maksimum  $\frac{3}{4}$ "; berat minimum 5 kg.
- Ukuran maksimum  $\frac{1}{2}$ "; berat minimum 2.5 kg.
- Ukuran maksimum  $\frac{1}{4}$ "; berat minimum 1 kg.

c. Prosedur

1. Mengeringkan benda uji di dalam oven dengan suhu  $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  sampai berat tetap.
2. Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran saringan paling besar ditempatkan paling atas, diguncangkan dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 (lima belas) menit.
3. Menimbang agregat yang tertahan dalam tiap saringan.

### 3.5.2 Pengujian Agregat Halus

#### 1. Berat Isi

Pengujian ini dimaksudkan untuk untuk menentukan berat isi dan rongga udara dalam agregat halus.

a. Peralatan

- Timbangan
- Talam kapasitas cukup besar untuk mengeringkan contoh agregat
- Tongkat pemadat diameter 15 mm, panjang 60 cm dengan ujung bulat sebaiknya terbuat dari baja tahan karat.
- Mistar perata [*straight edge*].
- Wadah baja yang cukup kaku berbentuk silinder dengan alat pemegang, dengan kapasitas wadah sebagai berikut:

b. Benda uji

Agregat halus sebanyak kapasitas wadah yang telah dikeringkan dalam oven dengan suhu  $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  dalam waktu semalam

c. Prosedur

Berat isi lepas

1. Menimbang dan mencatat berat wadah ( $w_1$ )
2. Memasukkan benda uji dengan hati-hati agar tidak terjadi pemisahan butir-butir dari ketinggian maksimum 5 cm diatas wadah dengan menggunakan sendok atau sekop sampai penuh
3. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata
4. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji ( $w_1$ )
5. Menghitung berat benda uji ( $w_3 = w_2 - w_1$ )

Berat Isi padat agregat dengan cara Penusukan

1. Menimbang dan mencatat berat wadah ( $w_1$ )
2. Mengisi wadah dengan agregat halus dalam tiga lapis yang sama tebal. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tusukan secara merata. Pada pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah tiap-tiap lapisan.
3. Meratakan permukaan agregat halus dengan menggunakan perata.
4. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta agregat kasar ( $w_2$ ).
5. Menghitung berat benda uji ( $w_3 = w_2 - w_1$ )

**2. Analisis *Specific Gravity* dan Absorpsi**

Pengujian ini dimaksudkan untuk mencari nilai bulk dan apparent specific gravity dan absorpsi dari agregat halus guna menentukan volume agregat dalam beton.

## a. Peralatan

- Neraca/Timbangan
- Piknometer kapasitas 500 gram.
- Cetakan Kerucut Pasir.
- Tongkat Pematik [*Tamper*] dari logam untuk cetakan kerucut pasir.
- Wadah penampung campuran pasir dan air ketika di oven.
- Oven, dengan ukuran yang mencukupi dan dapat mempertahankan suhu  $[110 \pm 5]^{\circ}\text{C}$ .

## b. Bahan

1000 gram [2 x 500 gram] agregat halus (pasir), diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempat.

## c. Prosedur

1. Agregat halus (pasir) dikeringkan [kering udara]  $\pm 1$  hari sampai diperoleh keadaan kering merata. Agregat halus disebut kering merata jika telah dapat tercurah [*Free Flowing Condition*].
2. Pengujian *Free Flowing Condition* dilakukan dengan memasukkan sebagian benda uji pada metal *sand cone mold*. Kemudian benda uji dipadatkan dengan tongkat pemadat 25 kali tumbukan. Kondisi SSD [*Saturated Surface Dry*] diperoleh jika ketika cetakan diangkat, agregat halus runtuh atau longsor.
3. Timbang berat piknometer yang berisi air, catat.
4. 500 gram agregat halus dalam kondisi SSD dimasukkan ke dalam piknometer, kemudian ditambahkan air sampai 90% kapasitas piknometer.
5. Gelembung-gelembung udara dari benda uji campuran (pasir dan air) dihilangkan dengan cara menggoyang-goyangkan piknometer.

6. Biarkan agregat halus mengendap selama  $\pm 1$  hari. Kemudian tambahkan air lagi sampai 90% kapasitas piknometer kembali terpenuhi.
7. Timbang piknometer yang berisi benda uji campuran tersebut, catat. Kemudian keluarkan benda uji campuran dari piknometer ke dalam wadah penampung dan keringkan di oven pada temperatur  $[110 \pm 5]^{\circ}\text{C}$  selama  $\pm 1$  hari .
8. Keluarkan benda uji dari oven, timbang dan catat hasilnya.
9. Bersihkan wadah penampung benda uji campuran dan timbang beratnya.

### **3. Analisis Saringan**

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dengan menggunakan saringan dan untuk menentukan Fineness Modulus agregat kasar tersebut.

- a. Peralatan
  - Timbangan dan neraca
  - Satu set saringan: Saringan No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200, dan Pan
  - Oven yang dilengkapi dengan pengukur suhu untuk memanasi sampai  $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ .
  - Mesin penggetar saringan.
  - Talam-talam.
  - Kuas, sikat kuning, sendok, dan alat-alat lainnya.
- b. Bahan

Benda uji diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempat sebanyak:

  - Ukuran maksimum nomor 4 ; Berat minimum 500 gram
  - Ukuran maksimum nomor 8 ; Berat minimum 100 gram
- c. Prosedur
  1. Mengeringkan benda uji di dalam oven dengan suhu  $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  sampai berat tetap.

2. Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran saringan paling besar ditempatkan paling atas, diguncangkan dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 (lima belas) menit.
3. Menimbang agregat yang berada dalam setiap saringan.

#### **4. Pemeriksaan Bahan Lewat Saringan No. 200**

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan adanya bahan organik dalam pasir alam yang digunakan sebagai bahan campuran mortar atau beton. Kotoran organik adalah bahan-bahan organik yang terdapat di dalam pasir dan menimbulkan efek merugikan terhadap mutu mortar beton.

##### **a. Peralatan**

- Saringan no.16 dan no.200.
- Wadah pencucian benda uji berkapasitas cukup besar sehingga pada waktu diguncang-guncang benda uji dan atau air pencuci tidak tumpah.
- Oven yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanaskan sampai  $[110 \pm 5]^{\circ}\text{C}$ .
- Timbangan
- Talam berkapasitas cukup besar sebagai wadah tempat dikeringkannya contoh agregat di dalam oven.

##### **b. Bahan**

- Berat contoh agregat kering minimum tergantung pada ukuran agregat maksimum sesuai tabel 2.2.
- Persiapan benda uji
  - Masukkan contoh agregat lebih kurang 1,25 kali berat benda uji ke dalam talam, keringkan dalam oven dengan suhu  $[110 \pm 5]^{\circ}\text{C}$  sampai berat tetap.
  - Siapkan benda uji dengan berat  $[w_1]$  sesuai tabel berat contoh agregat kering minimum.

**Tabel 3.4.** Berat Contoh Agregat Kering Minimum

Ukuran Agregat Maksimum		Berat Contoh Agregat Kering Minimum (gram)
(mm)	(inci)	
2,36	No. 8	100
1,18	No. 4	500
9,5	¼	2000
19,1	¾	2500
38,1	1 ½	5000

## c. Prosedur

1. Siapkan benda uji yang telah dipanaskan di dalam oven selama  $\pm 1$  hari sebanyak 500 gram.
2. Masukkan benda uji ke dalam wadah, dan diberi air pencuci secukupnya sehingga benda uji terendam.
3. Guncang-guncangkan wadah dan tuangkan air cucian ke dalam susunan saringan no.16 dan no.200. Pada waktu menuangkan air cucian, usahakan agar tidak ada sedikitpun benda uji yang terbang.
4. Alirkan air pada susunan saringan no.16 dan no.200 sambil membersihkannya dengan bantuan tangan sampai air cucian menjadi jernih.
5. Semua bahan yang tertahan saringan no.16 dan no.200 dikembalikan ke dalam satu wadah; kemudian masukkan seluruh bahan tersebut ke dalam talam yang telah diketahui beratnya  $[w_2]$  dan keringkan dalam oven dengan suhu  $[110 \pm 5]^{\circ}\text{C}$  sampai berat tetap, kira-kira  $\pm 1$  hari.
6. Setelah kering timbang dan catatlah beratnya  $[w_3]$ .
7. Hitunglah berat bahan kering tersebut  $[w_4 = w_3 - w_2]$ .

**5. Pemeriksaan Kotoran Organik**

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan adanya bahan organik dalam pasir alam yang akan digunakan sebagai bahan campuran beton. Kotoran organik adalah bahan-bahan organik yang terdapat di dalam pasir dan menimbulkan efek merugikan terhadap mutu beton.

- a. Peralatan
  - Botol gelas tidak berwarna mempunyai tutup dari karet, gabus atau lainnya yang tidak larut dalam larutan NaOH, dengan isi sekitar 500 ml.
  - Standar warna (Organic Plate).
  - Larutan NaOH.
- b. Bahan

pasir 500gr ( Kira-kira 1/3 isi botol ).
- c. Prosedur
  1. Benda uji dimasukkan kedalam botol.
  2. Tambahkan larutan NaOH 3% dari jumlah volume air, setelah dikocok isinya harus mencapai kira-kira 2/3 isi botol
  3. Tutuplah botol, kocok lagi kuat-kuat dan biarkan selama 24 jam.
  4. Setelah 24 jam bandingkan warna cairan yang terlihat diatas benda uji dengan warna standar no. 3 pada *organic plate*.

### 3.6 PERANCANGAN CAMPURAN

Metode yang digunakan untuk memperhitungkan campuran beton adalah metode dengan standar ACI (*American Concrete Institute*), yaitu standar ACI 211.1-91. Parameter yang diperlukan dalam perhitungan rancangan campuran beton dengan metode ACI adalah:

- a. Kekuatan Beton

Pada penelitian ini, kekuatan tekan beton rencana adalah 40 MPa.
- b. *Maximum Size of Agregat*

Untuk beton SCC, ukuran agregat kasar maksimum tidak boleh terlalu besar, karena dapat mengurangi *filling ability* dari SCC. Pada penelitian ini, digunakan nilai MSA sebesar 20 mm.
- c. *Slump* beton

Keleccakan beton SCC tidak diukur dengan menggunakan *slump* beton konvensional, melainkan dengan menggunakan *slump flow*. Penelitian ini

menggunakan SCC dengan *slump flow* 650 mm. Namun, sebagai acuan perancangan campuran, digunakan nilai *slump* sebesar 100 mm.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan campuran, dengan prosedur sebagai berikut:

1. Mengestimasi air campuran yang digunakan

Air campuran yang digunakan diestimasi berdasarkan nilai *slump* dan nilai MSA yang digunakan.

**Tabel 3.5.** Estimasi Air Campuran Berdasarkan Slump dan MSA

Slump (mm)	Mixing Water Quantity (kg/m <sup>3</sup> ) for the listed Nominal Maximum Aggregate Size (mm)							
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	100
<b>Non-Air-Entrained PCC</b>								
30 – 50	205	200	185	180	160	155	145	125
80 - 100	225	215	200	195	175	170	160	140
150 - 180	240	230	210	205	185	180	170	-
Typical entrapped air (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
<b>Air-Entrained PCC</b>								
30 – 50	180	175	165	160	145	140	135	120
80 - 100	200	190	180	175	160	155	150	135
150 - 180	215	205	190	185	170	165	160	-
<b>Recommended Air Content (percent)</b>								
Mild Exposure	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Moderate Exposure	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
Severe Exposure	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

(Shetty, M.S., *Concrete Technology*, 2005)

Berdasarkan tabel tersebut, didapatkan jumlah air campuran yang akan digunakan pada campuran beton.

2. Menghitung Faktor Air Semen

Jumlah semen yang dibutuhkan dalam campuran bergantung pada kekuatan yang diinginkan dan jumlah air yang dibutuhkan. Hubungan antara kuat tekan beton rata-rata dengan *water-cement ratio* dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.6.** Faktor Air Semen Berdasarkan Kekuatan Tekan

Average compressive strength at 28 days*		Effective water / cement ratio (by mass)	
Mpa	Psi	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
45	-	0,38	-
-	6000	0,41	-
40	-	0,43	-
35	5000	0,48	0,4
30	-	0,55	0,46
-	4000	0,57	0,48
25	-	0,62	0,53
-	3000	0,68	0,59
20	-	0,7	0,61
15	-	0,8	0,71
-	2000	0,82	0,74

(Neville, dan Brooks, *Concrete Technology*, 1994)

## 3. Menentukan jumlah agregat kasar

Jumlah agregat kasar yang digunakan dihitung berdasarkan *fineness modulus* berdasarkan tabel berikut.

**Tabel 3.7.** Volume Agregat Kasar yang Diperlukan Berdasarkan FM dan MSA

Nominal Maximum Aggregate Size (mm)	Fineness Modulus of Fine Aggregate			
	2,4	2,6	2,8	3
10	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,6
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
70	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

(Shetty, M.S., *Concrete Technology*, 2005)

#### 4. Menentukan jumlah agregat halus

Jumlah agregat halus diperhitungkan dengan metode volume, yaitu:

$$V_{beton} = V_{air} + V_{udara} + V_{CA} + V_{semen} + V_{FA}$$

$$\frac{m_{beton}}{\rho_{beton}} = \frac{m_{air}}{\rho_{air}} + \text{presentase udara} + \frac{m_{CA}}{SG_{CA}} + \frac{m_{semen}}{SG_{semen}} + V_{FA}$$

#### 5. Menentukan jumlah *superplasticizer* yang digunakan

*Superplasticizer* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebanyak 1% volume dari berat semen.

### 3.7 PEMBUATAN ADUKAN DAN BENDA UJI BETON

Umumnya dalam pembuatan adukan dan benda uji beton ditempuh tiga tahap pekerjaan, yaitu tahap persiapan, di mana dipersiapkan semua bahan sesuai dengan proporsi yang direncanakan juga alat yang diperlukan telah dipersiapkan. Tahap kedua adalah tahap pengecoran, di mana perlu diperhatikan adukan beton supaya tercampur secara merata dan homogen. Sementara tahap ketiga merupakan tahap pencetakan.

#### 3.7.1 Tahap Persiapan

1. Mempersiapkan semen, agregat kasar, agregat halus, dan air dengan berat masing-masing yang telah diperhitungkan dalam perhitungan campuran beton dengan metode *American Concrete Institute (ACI)*.
2. Agregat kasar dan agregat halus harus memenuhi kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*)
3. Mempersiapkan mesin pengaduk
4. Melapisi cetakan dengan oli agar beton mudah dibuka dari cetakannya setelah beton mengeras.

#### 3.7.2 Tahap Pelaksanaan Pengecoran

Berikut ini adalah langkah-langkah yang dilakukan pada saat pencampuran material untuk pembuatan benda uji:

1. Memasukkan sebagian agregat halus dan semen ke dalam mesin pengaduk, kemudian diaduk hingga merata.

2. Memasukkan sebagian air yang telah bercampur dengan *superplasticizer* secara perlahan-lahan ke dalam campuran.
3. Mengaduk campuran hingga merata.
4. Memasukkan agregat kasar dan agregat halus serta air secara bergantian dan sedikit demi sedikit hingga habis sembari dilakukan pengadukan campuran.
5. Menghentikan mesin pengaduk.
6. Menugji *slump flow*.

### 3.7.3 Tahap Pencetakan

Tahap pencetakan bertujuan untuk mencetak benda uji beton, dan melakukan perawatan (*curing*) beton. Pencetakan dilakukan dengan menuangkan beton segar pada alat cetak (*mould*). Alat cetak yang digunakan bergantung pada pengujian yang dilakukan. Dimensi dan bentuk alat cetak yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.8.** Bentuk dan Dimensi Alat Cetak yang Digunakan pada Penelitian

Pengujian	Bentuk Alat Cetak	Dimensi
Kuat Tekan	Silinder	Diameter 15 cm; tinggi 30 cm
		Diameter 10 cm; tinggi 20 cm
Kuat Tarik Belah	Silinder	Diameter 15 cm; tinggi 30 cm
Kuat Lentur	Balok	15 x 15 x 60 cm
Permeabilitas	Kubus	15 x 15 x 15 cm

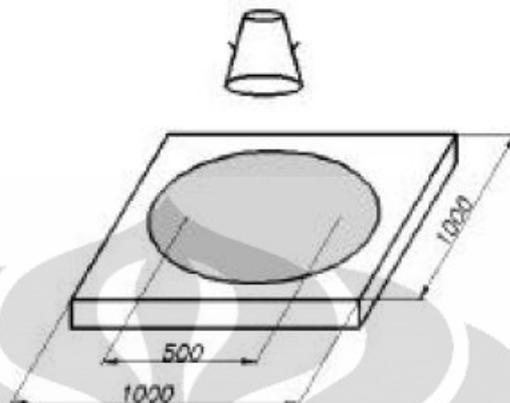
## 3.8 PENGUJIAN BETON SEGAR

Untuk mengetahui nilai *workability* dari SCC, dilakukan pengujian pada beton SCC segar, yaitu pengujian *slump flow*.

### A. Peralatan

- Kerucut terpancung (*slump cone*) dari logam dengan ukuran tinggi 30 cm, diameter lingkaran bawah 20 cm, dan lingkaran atas 10 cm.
- Papan *slump* dengan ukuran 100 x 100 cm

- Meteran
- Sekop kecil dan perata material



**Gambar 3.2.** Alat Uji *Slump Flow*

#### B. *Prosedur*

1. Basahi *slump cone* dan letakkan di tempat yang datar, lembab, tidak menyerap permukaan.
2. Isi *cone* dengan menggunakan sekop tanpa dilakukan pemadatan.
3. Ratakan permukaan sampel dengan menggunakan *tamping rod* sambil diulirkan.
4. Bersihkan kelebihan sampel beton di sekitar *slump cone*.
5. Angkat segera *cone* dengan arah vertikal perlahan-lahan dan biarkan beton mengalir dengan bebas.
6. Ukur diameter akhir dari beton yang telah mengalir dari dua arah yang berlawanan. Catat hasil hasil ukuran *slump*.
7. Rata-ratakan pengukuran diameter dari dua arah tersebut.

#### C. *Perhitungan*

Semakin besar nilai *slump flow*, semakin besar kemampuan beton untuk mengisi dengan sendirinya ke dalam perancah. Nilai *flow spread* sedikitnya 650 mm dibutuhkan untuk mendapatkan beton SCC. Toleransi sebesar  $\pm 50$  mm diberikan.

### 3.9 PENGUJIAN BETON KERAS

#### 3.9.1 Pengujian Kuat Tekan

Kuat tekan beton adalah beban per satuan luas yang menyebabkan beton hancur. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton yang telah mengeras dengan benda uji berbentuk silinder. Pengujian ini dilakukan pada umur beton 28, 42, dan 56 hari. Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian kuat tekan beton adalah timbangan, mesin uji tekan dan satu set alat *capping*.

##### A. Peralatan dan Bahan

- Mesin uji tekan Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- Pelat baja
- Benda uji silinder (diameter 15 cm, tinggi 30 cm)

##### B. Prosedur pengujian

1. Silinder beton yang akan diuji sesuai dengan umur perawatan diambil dari tempat perawatan satu hari sebelum pengujian dilaksanakan.
2. Permukaan benda uji silinder diratakan dengan mortar belerang dengan cara sebagai berikut:
  - a. Lelehkan mortar belerang sampai suhu kira-kira 130°C
  - b. Tuang belerang cair ke dalam cetakan pelapis (*capping plate*)
  - c. Letakkan benda uji tegak lurus pada cetakan pelapis sampai mortar belerang cair menjadi keras
  - d. Mengangkat benda uji dari cetakan pelapis setelah mortar belerang mengeras.
  - e. Mendinginkan benda uji selama satu jam
3. Masing-masing silinder beton ditimbang beratnya
4. Meletakkan benda uji pada mesin tekan secara sentris
5. Jalankan mesin, tekan dengan penambahan beban yang konstan, berkisar antara 2-4 kg/m<sup>2</sup> per detik
6. Lakukan pembebanan sampai benda uji menjadi hancur dan catatlah beban maksimum yang terjadi selama pemeriksaan benda uji.

### C. Perhitungan

Kuat tekan beton diperhitungkan berdasarkan rumus berikut:

$$f = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{1}{4}\pi D^2}$$

Dimana:  $f$  = Tegangan tekan beton (kg/cm<sup>2</sup>)

$P$  = Gaya tekan (kg)

$A$  = Luas penampang silinder beton (cm<sup>2</sup>)

$D$  = Diameter silinder beton (cm)

### 3.9.2 Pengujian Kuat Lentur

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui *Modulus of Rupture*, yaitu kuat lentur maksimum yang ditahan oleh serat tarik balok pada beton. Percobaan dilakukan dengan metode *third-point-loading*. Benda uji yang digunakan adalah beton ukuran 15 x 15 x 60 cm dengan umur benda uji 28, 42, dan 56 hari.

#### A. Peralatan dan Bahan

- Mesin uji lentur (*flexural strength testing machine*) beton kapasitas 100 kN Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- Benda uji *beam mold* 15 x 15 x 55 cm

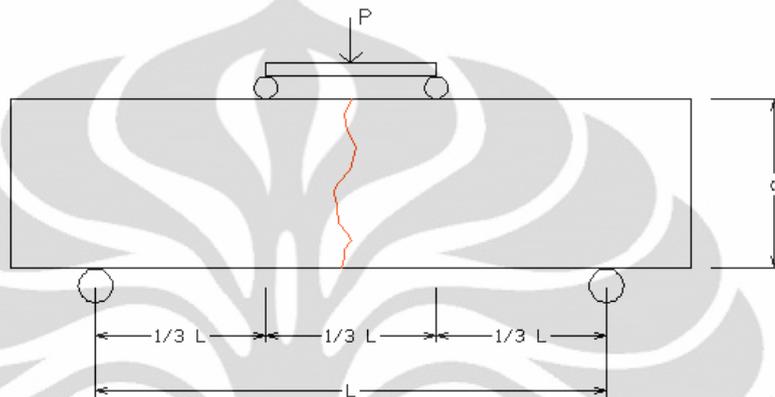
#### B. Prosedur pengujian

1. Benda uji balok yang sudah mengalami proses perawatan dan pengeringan disiapkan, diukur dimensinya (juga untuk mengetahui balok tersebut memenuhi persyaratan keseragaman sampel)
2. Tentukan panjang bentang yaitu tiga kali tinggi balok pada posisi simetris memanjang dan mengatur posisi roda baja bagian bawah untuk meletakkan benda uji
3. Balok diletakkan di kedua perletakan mesin uji lentur secara simetris dan diberi beban garis sejarak 1/3 bagian dari perletakan secara simetris.
4. Hidupkan mesin dan berikan beban secara tetap dan berkesinambungan tanpa ada beban kejut sampai keruntuhan terjadi.
5. Catat besar beban maksimum yang terjadi untuk perhitungan.

### C. Perhitungan

Untuk keruntuhan yang terjadi pada bagian tengah bentang, *modulus of rupture* ( $R$ ) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

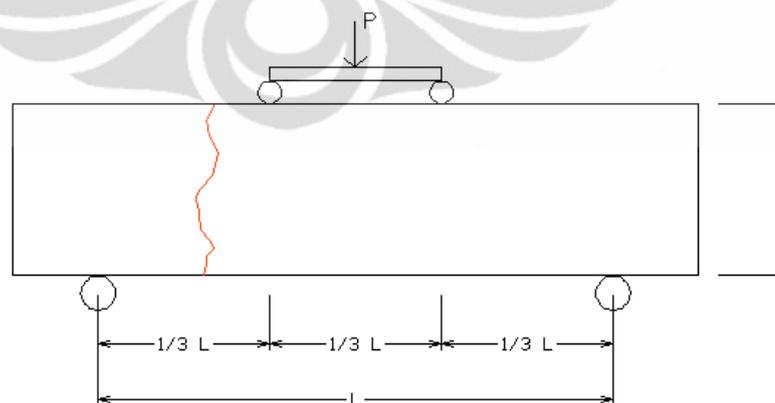
$$R = \frac{PL}{bd^2}$$



**Gambar 3.3.** Keruntuhan Benda Uji Lentur pada Bagian Tengah Bentang

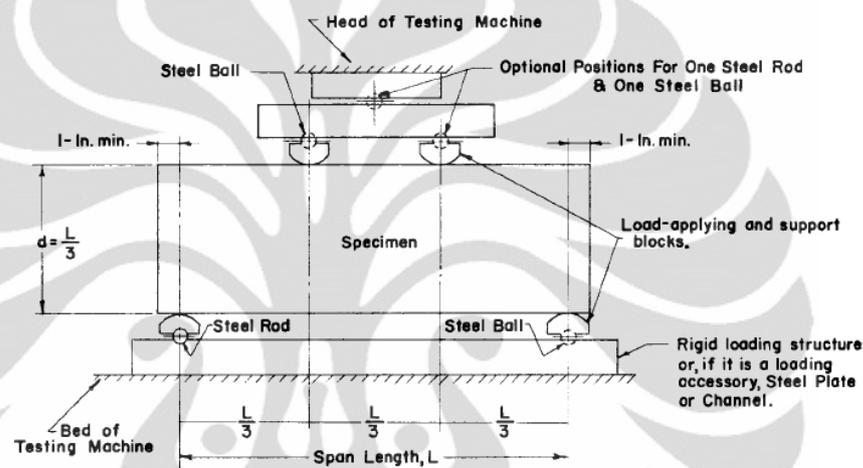
Sementara, jika keruntuhan terjadi pada bagian tarik di luar bagian tengah bentang, digunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$



**Gambar 3.4.** Keruntuhan Benda Uji Lentur Di Luar Bagian Tengah Bentang

- Dengan:  $R$  = modulus of rupture (MPa)  
 $P$  = beban maksimum (N)  
 $L$  = panjang bentang (mm)  
 $b$  = lebar sampel (mm)  
 $d$  = tinggi sampel (mm)  
 $a$  = jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik sampel (mm)



Gambar 3.5. Alat Uji Kuat Lentur

### 3.9.3 Pengujian Kuat Tarik Belah

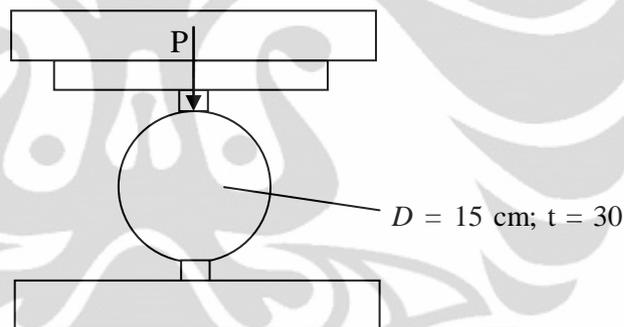
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik di sepanjang tinggi dari benda uji beton silinder. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan dimensi diameter 15 cm dengan tinggi 30 cm, dan umur benda uji adalah 28, 42, dan 56 hari.

#### A. Peralatan dan Bahan

- Mesin uji tarik Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Benda uji silinder  $D = 15$  cm,  $t = 30$  cm
- Pelat baja

### B. *Prosedur pengujian*

1. Siapkan peralatan untuk uji tarik belah. Alat yang digunakan sama dengan alat untuk uji kuat tekan.
2. atur alat uji sedemikian sehingga memiliki ruang yang cukup untuk perletakan sampel yang akan diuji.
3. timbang sampel beton yang akan diuji
4. sampel beton yang akan diuji diberi tanda berupa garis menlintang pada bagian atas dan bawahnya, kemudian dengan garis melintang di sisi sampingnya.
5. posisikan sampel beton pada alat yang sudah tersedia
6. Bebani sampel dengan beban konstan (689 sampai 1389 kPa/menit) tanpa beban kejut sampai sampel beton terbelah, dan catat beban maksimumnya.



**Gambar 3.4.** Permodelan Uji Tarik Belah

### C. *Perhitungan*

Nilai kuat tarik belah sampel diperhitungkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T = \frac{2P}{\pi LD}$$

Dimana:  $T$  = Kuat tarik belah (kPa)

$P$  = Beban maksimum berdasarkan hasil pembacaan (kN)

$L$  = Tinggi sampel (m)

$D$  = Diameter sampel (m)

### 3.9.4 Pengujian Permeabilitas

Pengujian bertujuan untuk mengetahui jumlah perembesan air ke dalam beton dan jarak penetrasi beton pada spesimen silinder beton yang dinyatakan dalam angka permeabilitas.

#### A. Peralatan dan Bahan

- Peralatan permeabilitas InfarTest
- Kompresor
- Waterpass
- Alat tulis
- Benda uji berbentuk kubus dengan dimensi 15 x 15 x 15 cm dengan umur 42 hari

#### B. Prosedur

1. Menyiapkan benda uji kubus berumur 42 hari dengan dimensi 15 x 15 x 15 cm.
2. Mengasarkan salah satu permukaan benda uji.
3. Meletakkan 3 buah sampel pada alat uji dengan sisi yang dikasarkan pada bagian bawah, kemudian mengencangkan dan mengunci benda uji pada alat uji.
4. Mengisi tabung air dengan air sebanyak 750 ml.
5. Mengoperasikan alat dengan cara memberikan tekanan air pada benda uji, dengan tekanan sebesar 3 bar selama 3 x 24 jam.

#### C. Pengukuran

Pengukuran dilakukan dengan cara membelah benda uji yang telah selesai diuji dengan alat *splitting*, kemudian dilakukan pengukuran terhadap kedalaman penetrasi air ke dalam beton. Menurut DIN, kedalaman penetrasi maksimum yang diperbolehkan adalah sejauh 50 mm.

### 3.10 PENGKODEAN BENDA UJI

Pengkodean benda uji bermanfaat untuk mempermudah pelaksanaan penelitian, yaitu mempermudah dalam mengidentifikasi sampel. Selain itu, pengkodean juga bermanfaat untuk mempermudah penulisan, dan memudahkan pembaca untuk mengerti acuan benda uji yang dideskripsikan.

Pada penelitian ini, format yang digunakan dalam pengkodean benda uji adalah sebagai berikut:

SP5 – XX – XX – XX

Dimana:

1. Variabel 'SP5' menunjukkan bahwa benda uji menggunakan semen Portland tipe V pada campurannya
2. Variabel kedua menunjukkan jenis pengujian yang dilakukan benda uji, yaitu:
  - T untuk uji tekan,
  - TB untuk uji tarik belah,
  - TL untuk uji tarik lentur, dan
  - P untuk uji permeabilitas.
3. Variabel ketiga menunjukkan umur benda uji
  - 7 untuk umur 7 hari,
  - 14 untuk umur 14 hari, dan
  - 28 untuk umur 28 hari.
4. Variabel keempat menunjukkan metode perlakuan benda uji pada saat *curing*.
  - AS untuk benda uji yang direndam dalam air suling
  - AL untuk benda uji yang direndam dalam air laut
  - PS untuk benda uji yang direndam dalam air laut dengan metode perendaman *wetting and drying*.
  - LS untuk benda uji yang direndam dalam larutan sulfat.

Contoh: benda uji SP5 – TL – 28 – AS, berarti benda uji menggunakan semen Portland tipe V yang direndam dengan air suling untuk dilakukan pengujian kuat lentur pada umur 28 hari.

## BAB 4

### ANALISIS DAN HASIL PENELITIAN

Pada bab ini akan dipaparkan analisis pengujian material penyusun beton, dan pembuatan beton. Selain itu, bab ini akan membahas mengenai pembuatan hasil pengujian beton segar dan beton keras serta analisisnya.

#### 4.1 ANALISIS HASIL PENGUJIAN MATERIAL PENYUSUN BETON

Sebelum dilakukan pembuatan benda uji, terlebih dahulu dilakukan pengujian terhadap material penyusun beton. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dan spesifikasi material yang akan digunakan dalam penelitian.

##### 4.1.1 Agregat Kasar

Pengujian agregat kasar dilakukan berdasarkan standar-standar yang tercantum dalam Bab 3. Berdasarkan pengujian tersebut, didapatkan hasil sebagai berikut:

**Tabel 4.1.** Hasil Pengujian Agregat Kasar

Pengujian	Standar Pengujian	Hasil	Nilai Standar
SSD Specific Gravity	ASTM C – 127	2,922 kg/dm <sup>3</sup>	
Absorpsi	ASTM C – 127	3,48%	
Berat isi	ASTM C – 29	1,451 kg/dm <sup>3</sup>	
<i>Void</i>	ASTM C – 29	49,73%	30-50%
Analisis Saringan	ASTM C – 136	(Lampiran)	(Lampiran)

Nilai absorpsi agregat kasar yang digunakan dalam penelitian tidak melebihi standar absorpsi sebesar 4%. Agregat dengan nilai absorpsi lebih dari standar tidak diperkenankan digunakan karena agregat memiliki kemampuan penyerapan yang tinggi dan dikhawatirkan dapat mengurangi volume air yang seharusnya difungsikan sebagai pereaksi hidrasi semen.

Sementara berdasarkan perhitungan, *void* pada agregat kasar adalah sebesar 49,73%. Nilai *void* tersebut memenuhi standar, yaitu 30-50%. Selain itu, SG dalam kondisi SSD kemudian akan digunakan sebagai salah satu parameter dalam perhitungan rancang campur beton. Penggunaan SSD SG dikarenakan kondisi SSD merupakan kondisi ideal dimana air yang terkandung dalam pori pada agregat tidak berpartisipasi dalam hidrasi semen.

Pada penelitian ini, digunakan ukuran agregat maksimum sebesar 20 mm. Oleh karena itu, sebelum dilakukan persiapan material untuk campuran beton, dilakukan penyaringan terhadap agregat yang tersedia. Agregat yang digunakan dalam campuran adalah agregat yang lolos saringan  $\frac{3}{4}$  dan tertahan saringan no.200.

#### 4.1.2 Agregat Halus

Pengujian agregat halus dilakukan berdasarkan standar-standar yang tercantum dalam Bab 3. Berdasarkan pengujian tersebut, didapatkan hasil sebagai berikut:

**Tabel 4.2.** Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian	Standar Pengujian	Hasil	Nilai Standar
SSD Specific Gravity	ASTM C – 128	2,513 kg/dm <sup>3</sup>	
Absorpsi	ASTM C – 128	1,1%	
Berat isi	ASTM C – 29	1515,39 gr/dm <sup>3</sup>	
<i>Void</i>	ASTM C – 29	38,9%	30-50%
Analisis Saringan	ASTM C – 136	(Lampiran)	
Fineness Modulus	ASTM C – 136	2,356	
Kadar Material Lolos Saringan No.200	ASTM C – 117	2,7%	
Kandungan organik	ASTM C – 40	Standard Plate No.1	< No.3

Berdasarkan hasil pengujian, gradasi agregat halus memenuhi standar ASTM C-33 – 03, dan termasuk dalam gradasi Zona I menurut SNI 03-2834-1992. Pengujian kadar organik menunjukkan warna yang lebih terang daripada

Standard Plate No.3, yaitu setara dengan Standard Plate No.1, sehingga kadar organik pada agregat halus masih memenuhi standar.

Nilai SG dalam kondisi SSD serta *fineness modulus* (FM) selanjutnya digunakan dalam perhitungan rancang campur beton.

#### 4.2 ANALISIS PENGUJIAN *SLUMP FLOW*

Keleccakan *Self-Compacting Concrete* dinilai berdasarkan uji *slump flow* yang dilakukan setelah proses pengecoran, sebelum campuran beton segar dimasukkan ke dalam cetakan.

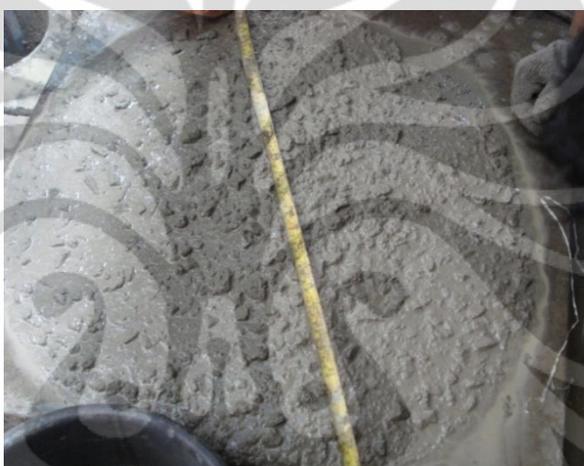
Pada penelitian ini, nilai *slump flow* berkisar antara 450 – 650 mm. Nilai *slump flow* dipengaruhi oleh lamanya waktu pencampuran. Waktu pencampuran yang relatif lama (di atas 15 menit) menyebabkan pasta semen mengalami *setting* sebelum dilakukan pengujian *slump flow*, sehingga ketika diuji, campuran beton telah mengental dan *slump flow* tidak memenuhi standar EFNARC ( $650 \pm 50$  mm). Menurut Soroka (1993), efek *superplasticizer* dalam mempermudah pengerjaan campuran beton hanya bertahan dalam waktu singkat, yaitu sekitar 30-60 menit. Sehingga semakin lama waktu pencampuran sejak *superplasticizer* ditambahkan ke dalam campuran, semakin kecil pula *slump flow* yang akan didapatkan. Sementara, Sika menyatakan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk Viscocrete-10 untuk dapat bekerja dengan optimal setelah *superplasticizer* dicampurkan ke dalam campuran adalah selama 5 menit.

Selain itu, besarnya nilai *slump flow* juga dipengaruhi oleh suhu dan ketika pengecoran dilakukan. Ketika suhu tinggi (berkisar antara 28-31°C), probablilitas nilai *slump flow* untuk mencapai standar cukup rendah. Hal ini dikarenakan *setting time* semen dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Selain itu, menurut Soroka (1993), pada suhu yang lebih tinggi, *superplasticizer* mempengaruhi keleccakan beton dalam waktu yang lebih singkat lagi.

Bila nilai *slump flow* tidak memenuhi standar, maka dilakukan penambahan air. Volume air yang ditambahkan bervariasi pada setiap pengecoran. Namun, volume air yang ditambahkan pada campuran ditetapkan maksimal 500 ml agar tidak mengurangi kekuatan benda uji secara drastis.



(a)



(b)

**Gambar 4.1.** (a) *Slump Flow* Tidak Memenuhi Standar EFNARC;  
(b) *Slump Flow* Memenuhi Standar EFNARC

#### 4.3 ANALISIS MASSA JENIS *SELF-COMPACTING CONCRETE*

Berdasarkan pengertian *Self-Compacting Concrete* (SCC), yaitu beton yang dapat memadat akibat massanya sendiri, dan berdasarkan studi pustaka, dapat dikatakan bahwa SCC memiliki rongga udara yang lebih sedikit karena viskositasnya yang lebih rendah, sehingga bersifat lebih kompak. Berdasarkan pernyataan tersebut, dapat dikatakan bahwa SCC memiliki massa jenis yang lebih besar dibandingkan dengan beton normal.

Pada penelitian ini, dilakukan pendataan massa untuk benda uji kuat tekan, yaitu silinder 10 x 20 cm, dan 15 x 30 cm untuk keempat variasi perendaman, yaitu air suling (AS), air laut (AL), larutan magnesium sulfat 5% (LS), dan larutan magnesium sulfat 5% dengan perlakuan rendam-angkat (PS).

Tabel 4.3. Massa Jenis Benda Uji

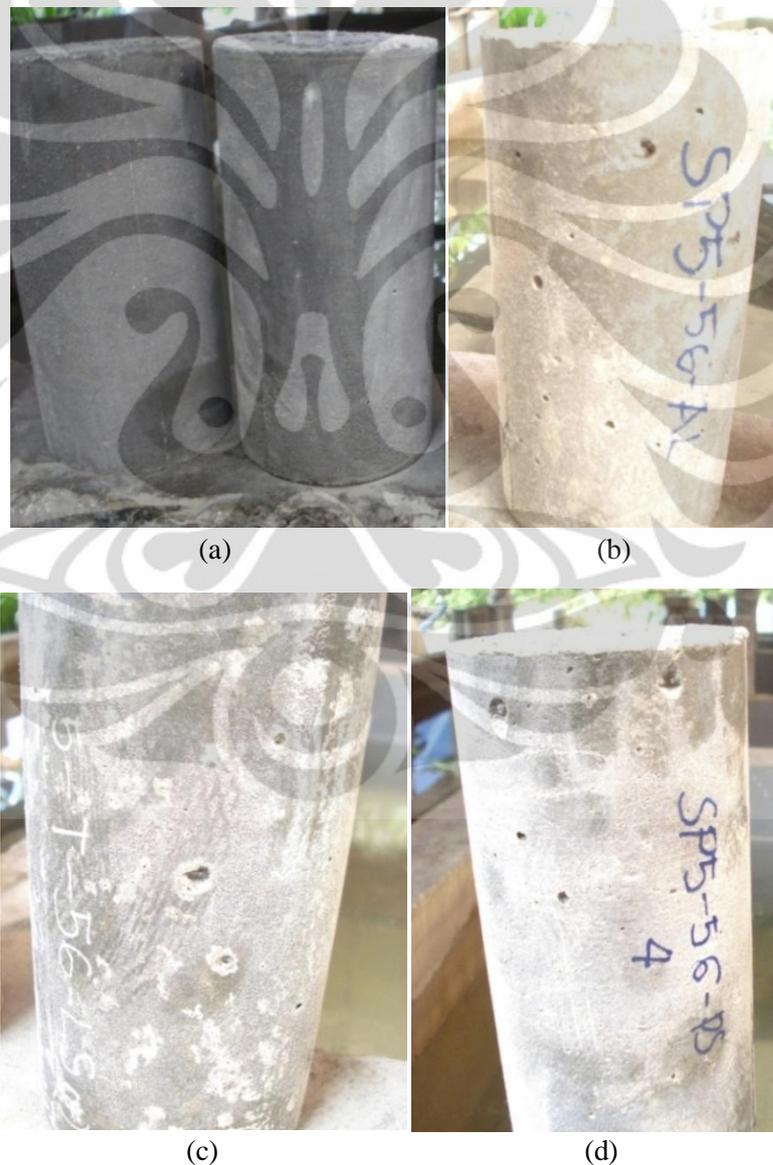
Metode Perendaman	Umur Benda Uji (hari)	Volume Benda Uji (cm <sup>3</sup> )	Rata-Rata Massa (gr)	Rata-Rata Massa Jenis (gr/cm <sup>3</sup> )	Rata-Rata Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )		Kenaikan Massa Jenis (%)
Air Suling	28	5303,571	12593,3	2,375	2374,501	2422,95	0,00
		1571,429	3815,6	2,428	2428,109		
	42	1571,429	3819,6	2,431	2430,655		
	56	1571,429	3863,4	2,459	2458,527		
Air Laut	42	1571,429	3858,0	2,455	2455,091	2453,88	1,28
	56	1571,429	3854,2	2,453	2452,673		
Larutan Sulfat	42	1571,429	3835,0	2,440	2440,455	2452,61	1,22
	56	1571,429	3873,2	2,465	2464,764		
Pasang-Surut	42	1571,429	3837,0	2,442	2441,727	2443,13	0,83
	56	1571,429	3841,4	2,445	2444,527		

Berdasarkan hasil pendataan massa benda uji, didapatkan massa jenis rata-rata untuk SCC dengan variasi perendaman air suling adalah sebesar 2422,95 kg/m<sup>3</sup>. Sementara, variasi perendaman pada lingkungan yang lebih ekstrim tidak mempengaruhi nilai massa jenis SCC, dikarenakan akibat variasi perendaman tersebut, massa jenis benda uji tidak memiliki perbedaan yang jauh dengan massa jenis benda uji yang direndam pada air suling. Nilai massa jenis masing-masing untuk variasi perendaman air laut, larutan magnesium sulfat 5%, dan larutan magnesium sulfat 5% dengan perlakuan rendam-angkat adalah 2453,88 kg/m<sup>3</sup>, 2452,61 kg/m<sup>3</sup>, dan 2443,13 kg/m<sup>3</sup> dengan persentase kenaikan massa jenis terhadap benda uji yang direndam pada air suling masing-masing sebesar 1,28%, 1,22%, dan 0,83%.

Nilai massa jenis tersebut lebih besar daripada massa jenis beton normal, yaitu 2400 kg/m<sup>3</sup>. Namun, perbedaan massa jenis SCC terhadap massa jenis beton normal tersebut tidaklah terlalu signifikan, sehingga dapat dikatakan bahwa massa jenis SCC sama dengan massa jenis beton normal.

#### 4.4 ANALISIS SERANGAN SULFAT SECARA VISUAL

Pada penelitian ini, benda uji mengalami perbedaan perlakuan pada saat perendaman (*curing*). Terdapat 4 variasi perendaman yang diterapkan pada benda uji, yaitu perendaman dengan menggunakan air suling, air laut yang bersumber dari daerah Ancol, Jakarta Utara dengan kadar sulfat selama 0,2%, larutan magnesium sulfat 5%, dan proses rendam-angkat pada larutan magnesium sulfat 5%. Dengan keempat variasi metode perendaman tersebut, secara visual tampak perbedaan fisik dari benda uji.



**Gambar 4.2.** Karakteristik Fisik Benda Uji Akibat Variasi Perendaman  
(a) Air Suling; (b) Air Laut; (c) Larutan Sulfat; (d) Rendam-Angkat

Berdasarkan pengamatan, dapat terlihat bahwa pada setiap benda uji dengan semua variasi perendaman dijumpai karakteristik penampilan keputih-putihan (*whitish appearance*). Namun pada benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat dan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat karakteristik keputih-putihan ini tampak sangat jelas, terutama pada benda uji yang berpori cukup besar pada permukaannya.

Penampilan keputih-putihan ini merupakan penumpukan deposit kapur hasil hidrasi semen. Hal ini secara normal terjadi pada beton. Namun pada lingkungan dengan kadar sulfat tinggi, deposit yang terbentuk lebih banyak akibat adanya reaksi produk-produk hidrasi semen seperti kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat dengan sulfat. Sehingga benda uji dengan variasi perendaman pada larutan sulfat memiliki lebih banyak deposit pada permukaannya.

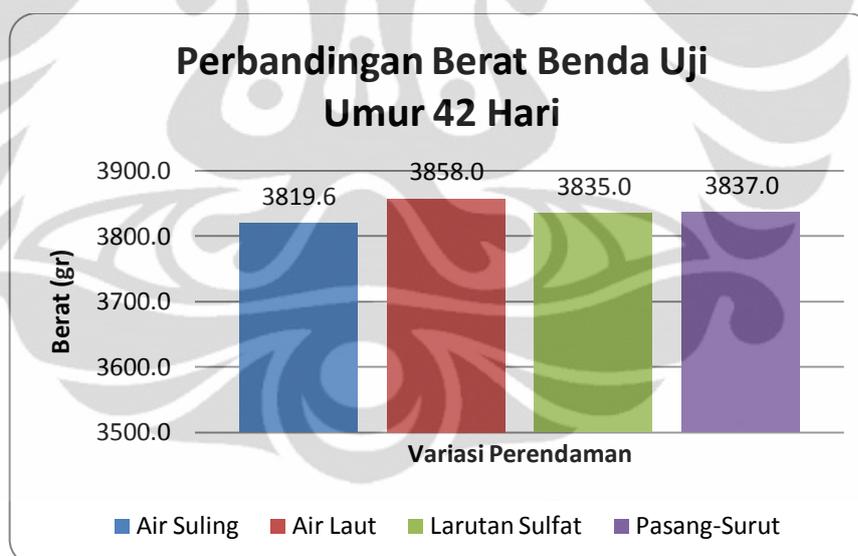
Dalam jangka pendek, penguraian kalsium hidroksida ini tidak berbahaya. Namun pada jangka panjang akan menyebabkan *void* pada beton semakin besar sehingga mengurangi kekuatan beton.

#### **4.5 ANALISIS PENURUNAN BERAT BENDA UJI**

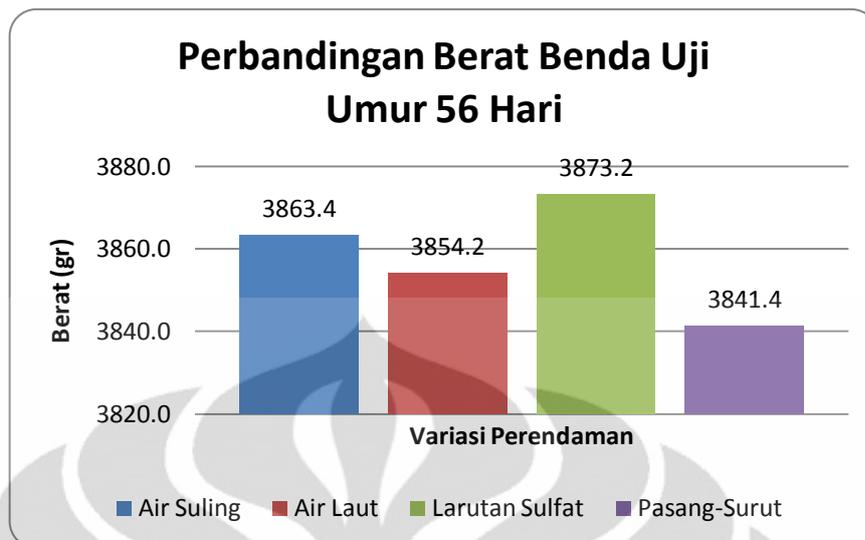
Serangan sulfat pada beton memungkinkan terjadinya reaksi antara magnesium sulfat dengan pasta semen, sehingga menyebabkan disolusi komponen  $\text{Ca(OH)}_2$  pada pasta semen. Hal ini dapat menyebabkan penurunan massa semen. Oleh karena itu, dilakukan pencatatan dan perbandingan massa antara benda uji untuk setiap macam variasi perendaman.

Tabel 4.4. Perbandingan Berat Benda Uji

Umur Benda Uji (hari)	Metode Perendaman	Volume Benda Uji (cm <sup>2</sup> )	Rata-Rata Berat (gr)	Rata-Rata Penurunan Berat (%)
28	AS	1571.429	3815.6	0
42	AS	1571.429	3819.6	0
	AL	1571.429	3858.0	-1.005
	LS	1571.429	3835.0	-0.403
	PS	1571.429	3837.0	-0.456
56	AS	1571.429	3863.4	0
	AL	1571.429	3854.2	0.238
	LS	1571.429	3873.2	-0.254
	PS	1571.429	3841.4	0.569



**Gambar 4.3.** Grafik Perbandingan Berat Benda Uji Umur 42 Hari untuk Semua Variasi Perendaman



**Gambar 4.4.** Grafik Perbandingan Berat Benda Uji Umur 56 Hari untuk Semua Variasi Perendaman

Berdasarkan perbandingan pada tabel dan grafik, benda uji umur 42 hari dengan 4 variasi perendaman memiliki berat yang bervariasi. Benda uji dengan variasi perendaman pada air suling, air laut, larutan sulfat 5%, dan larutan sulfat 5% dengan perlakuan pasang-surut memiliki berat masing-masing sebesar 3819,6 gr, 3858 gr, 3835 gr, dan 3837 gr.

Seperti pada benda uji umur 42 hari, benda uji umur 56 hari juga memiliki berat yang bervariasi berdasarkan variasi perendaman. Benda uji dengan variasi perendaman pada air suling, air laut, larutan sulfat 5%, dan larutan sulfat 5% dengan perlakuan pasang-surut memiliki berat masing-masing sebesar 3863,4 gr, 3854,2 gr, 3873,2 gr, dan 3841,4 gr.

Berdasarkan Gambar 4.3. dan Gambar 4.4., tidak terlihat adanya tren penurunan berat benda uji akibat keempat variasi perendaman, baik selama 42 hari maupun 56 hari. Grafik tersebut tidak menunjukkan hubungan tertentu antara variasi perendaman dengan berat benda uji.

Menurut Erna Septiandini (2001), perendaman beton dalam larutan magnesium sulfat 5% selama 84 hari tidak menyebabkan kerusakan fisik pada beton. Sehingga, dapat dikatakan bahwa perendaman beton dalam larutan magnesium sulfat 5% selama masa yang lebih singkat, yaitu 28 hari yang dilakukan pada penelitian ini tidak menunjukkan terjadinya kerusakan fisik pada

benda uji. Perubahan berat yang terjadi pada benda uji diakibatkan oleh perbedaan penyerapan air oleh benda uji.

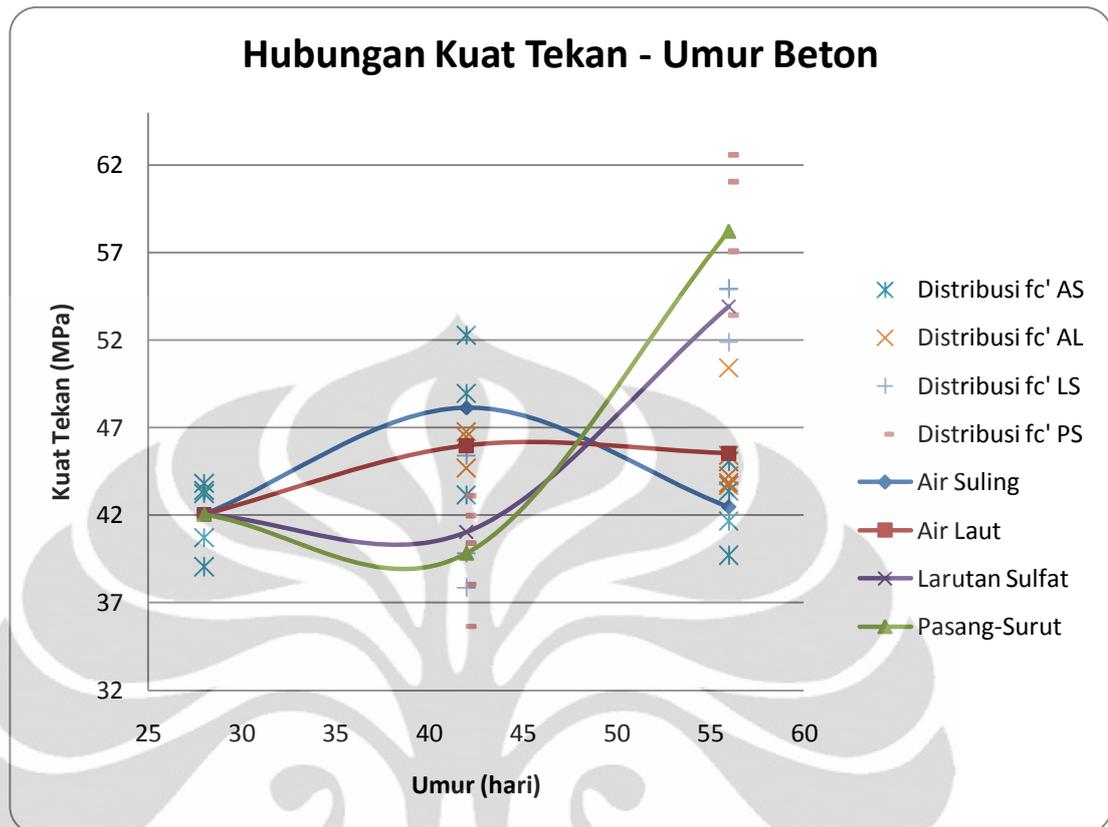
#### 4.6 ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP KUAT TEKAN

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui ketahanan SCC dengan semen Portland tipe V terhadap serangan sulfat. Pengujian ini dilakukan pada benda uji dengan umur 28, 42, dan 56 hari dengan 4 variasi perendaman, yaitu perendaman dengan air suling (AS), air laut dengan kadar sulfat 0,2% (AL), larutan magnesium sulfat 5% (LS) dan perendaman dengan larutan magnesium sulfat 5% dengan perlakuan rendam-angkat (PS) setelah sebelumnya dilakukan perendaman selama 28 hari dalam air suling. Nilai target desain ( $f_c'$ ) beton umur 28 hari adalah 40 MPa.

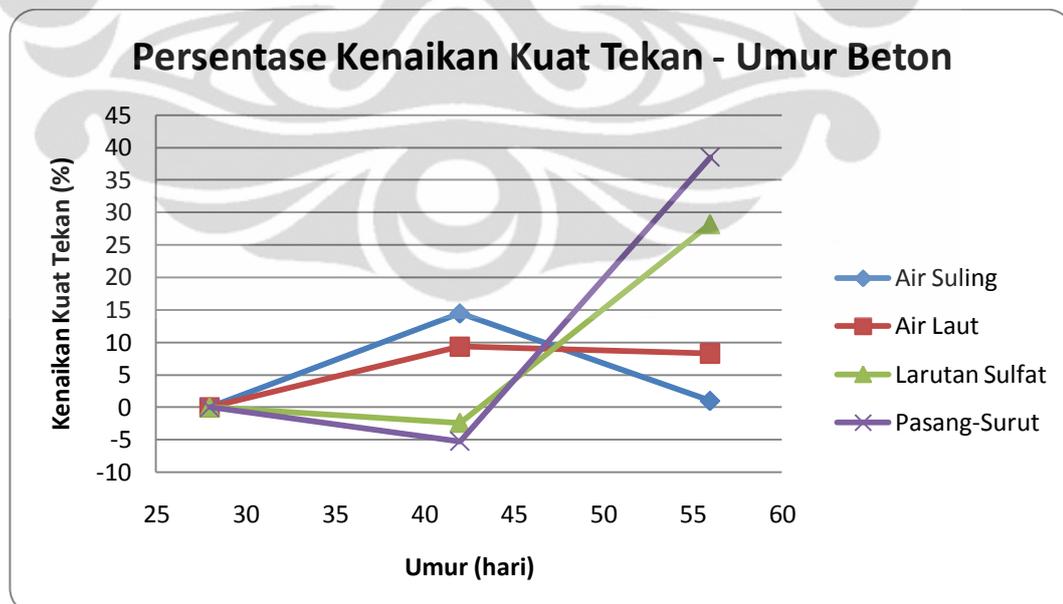
**Tabel 4.5.** Hasil Uji Kuat Tekan

Umur Benda Uji (hari)	Metode Perendaman	Rata-Rata Berat (gr)	Rata-Rata Kuat Tekan (MPa)	Kenaikan Kuat Tekan (%)
28	AS	3815,6	42,047	0
42	AS	3819,6	48,135	14,48
	AL	3858,0	45,974	9,34
	LS	3835,0	41,042	-2,39
	PS	3837,0	39,840	-5,25
56	AS	3863,4	42,462	0,99
	AL	3854,2	45,534	8,29
	LS	3873,2	53,922	28,24
	PS	3841,4	58,236	38,50

\*<sup>)</sup> kenaikan kuat tekan relatif terhadap benda uji umur 28 hari



**Gambar 4.5.** Grafik Hubungan Kuat Tekan dengan Umur Beton untuk Setiap Variasi Perendaman



**Gambar 4.6.** Grafik Kenaikan Kuat Tekan Benda Uji untuk Setiap Variasi Perendaman

Gambar 4.5. dan Gambar 4.6. menunjukkan bahwa untuk benda uji dengan variasi perendaman air suling, kuat tekan akan meningkat hingga umur 42 hari, kemudian menurun pada hari ke-56, tren tersebut juga terjadi pada variasi perendaman air laut. Sementara pada variasi perendaman dengan larutan sulfat 5% dan larutan yang sama dengan metode rendam-angkat, Gambar 4.5 menunjukkan penurunan kuat tekan pada umur ke 42, kemudian kuat tekan mengalami kenaikan pada hari ke-56.

Peningkatan kuat tekan pada umur ke-42, dan penurunan kuat tekan pada umur ke-56 pada benda uji dengan variasi perendaman air suling tidak sesuai dengan teori perkembangan kuat tekan beton dengan semen Portland tipe V menurut US Bureau of Reclamation, dimana kuat tekan akan terus meningkat secara logaritmik seiring dengan meningkatnya umur beton.

Penurunan kekuatan tekan pada benda uji dengan variasi perendaman air suling dan air laut pada umurnya yang ke-56 hari disebabkan oleh kesalahan-kesalahan yang terjadi pada saat pembuatan benda uji, seperti:

1. Pada saat proses pembuatan benda uji variasi perendaman air suling dan air laut umur 56 hari, kadar *superplasticizer* yang digunakan adalah sebesar 1%. Sedangkan, untuk benda uji umur 42 hari dengan variasi perendaman yang sama, digunakan *superplasticizer* sebesar 1,1%.

Menurut Nourma Yunita (2008), besarnya kadar *superplasticizer* mempengaruhi besar kuat tekan pada SCC. Berdasarkan penelitian ini, kadar *superplasticizer* optimum adalah antara 1-1,2%.

Sedangkan berdasarkan penelitian Antoni dan H. Sugiharto (2007), untuk *superplasticizer* tipe *polycarboxylate*, semakin tinggi kadar *superplasticizer* yang digunakan, semakin tinggi pula kuat tekan pada mortar. Pada penelitian ini, kuat tekan maksimum dicapai ketika digunakan *superplasticizer* sebanyak 1,5%.

2. Pada proses pembuatan benda uji AS dan AL umur 56 hari, hasil pengujian *slump flow* pada SCC segar tidak memenuhi persyaratan, sehingga mengurangi kecacakan beton segar. Sedangkan, pada proses pembuatan benda uji AS dan AL umur 42 hari, kadar *superplasticizer* yang digunakan lebih tinggi, sehingga hasil pengujian *slump flow* memenuhi persyaratan.

Hal tersebut memungkinkan benda uji AS dan AL umur 56 hari memiliki rongga udara yang lebih besar dibandingkan dengan benda uji umur 42 hari dengan variasi perendaman yang sama, terutama jika pemadatan tidak dilakukan dengan baik. Tingginya *void ratio* mengakibatkan ikatan antar molekul semen, maupun ikatan antara semen dengan agregat menjadi lebih lemah, sehingga mengurangi kekuatan tekan benda uji.

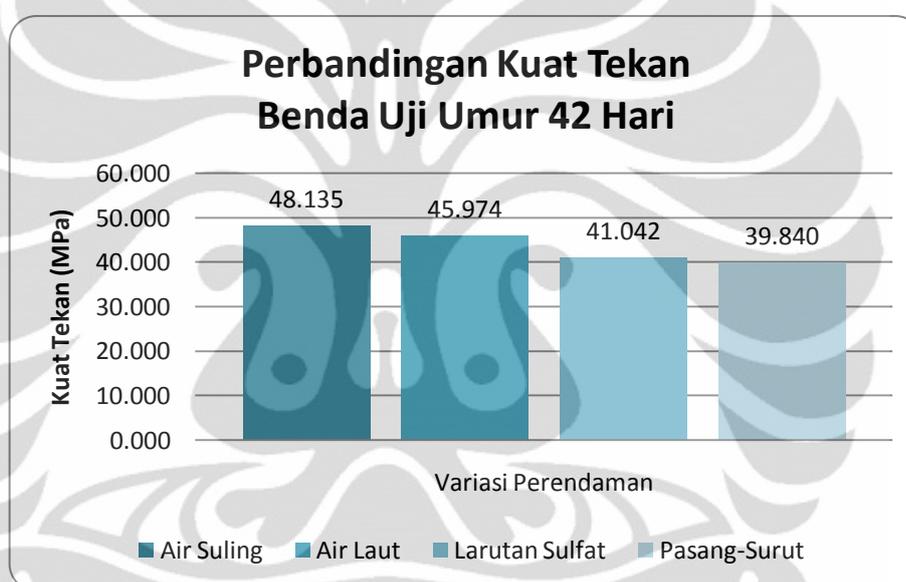
Sementara, penurunan kuat tekan pada benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat dan larutan sulfat dengan metode rendam-angkat pada umurnya yang ke-42 juga merupakan suatu hal yang tidak sewajarnya. Masa perendaman benda uji pada larutan sulfat masih sangat singkat, yaitu hanya 14 hari sehingga diperkirakan ion sulfat yang terkandung dalam media perendam belum menyerang beton.

Salah satu penyebab terjadinya ketidakwajaran di atas terjadi pada proses pembuatan benda uji. Pada saat pembuatan benda uji umur 28 hari, volume air yang ditambahkan dalam campuran kurang dari yang telah diperhitungkan dalam perhitungan rancang campur beton. Hal ini mengakibatkan penurunan faktor air semen dari angka semula, yaitu 0,45, di mana pada penelitian ini faktor air semen bersifat mengikat, artinya setiap benda uji seharusnya memiliki faktor air semen yang sama. Penurunan faktor air semen inilah yang memungkinkan benda uji dengan umur 28 hari memiliki kuat tekan lebih dari yang seharusnya, sehingga benda uji umur 42 dengan variasi perendaman larutan sulfat dan larutan sulfat dengan perlakuan rendam angkat memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan kuat tekannya pada umur 28 hari.

**Tabel 4.6.** Hasil Uji Kuat Tekan untuk Benda Uji Umur 42 Hari

Variasi Perendaman	Rata-Rata Berat (gr)	Rata-Rata Kuat Tekan (MPa)	Penurunan Kuat Tekan (%)
AS	3819,6	48,135	0
AL	3858,0	45,974	4,49
LS	3835,0	41,042	14,74
PS	3837,0	39,840	17,23

\*) penurunan kuat tekan relatif terhadap benda uji variasi perendaman air suling

**Gambar 4.7.** Grafik Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton Umur 42 Hari

Berdasarkan Gambar 4.7., pada benda uji umur 42 hari dengan variasi perendaman pada lingkungan yang lebih ekstrem, seperti perendaman benda uji pada air laut, larutan sulfat, dan larutan sulfat dengan metode rendam-angkat terjadi pengurangan kekuatan tekan beton. Berdasarkan gambar, dapat dilihat bahwa penurunan kuat tekan akibat perendaman dengan air laut tidak begitu signifikan, yaitu sebesar 4,49%. Sementara pada benda uji yang direndam pada larutan sulfat mengalami penurunan kuat tekan yang cukup signifikan, yaitu sebesar 14,74%. Variasi perendaman larutan sulfat dengan metode rendam angkat menyebabkan penurunan kuat tekan sebesar 17,23%.

Berdasarkan Gambar 4.7., dan Tabel 4.6.dapat dinyatakan bahwa:

1. Terjadi penurunan kuat tekan yang tidak begitu signifikan antara variasi perendaman air suling dengan air laut. Hal ini diakibatkan oleh kadar sulfat pada air laut yang sangat kecil, yaitu 0,2%. Sementara, pada benda uji dengan konsentrasi sulfat yang lebih tinggi, yaitu 5%, penurunan kuat tekan terlihat lebih signifikan dibandingkan dengan penurunan kuat tekan pada benda uji yang direndam dengan air laut.

Penurunan kuat tekan pada benda uji dengan variasi perendaman air laut, larutan sulfat, dan larutan sulfat dengan metode rendam-angkat diakibatkan oleh serangan sulfat pada beton, dimana sulfat menyerang kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai produk hidrasi kalsium silikat. Reaksi sulfat dengan kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat membentuk gypsum yang merupakan salah satu senyawa penyebab kerusakan beton akibat sifatnya yang ekspansif, sehingga mendesak dan merusak ikatan antar partikel penyusun beton.

2. Penurunan kuat tekan akibat perendaman dengan air laut juga menunjukkan bahwa serangan akibat klor ( $\text{Cl}$ ) yang terkandung pada air laut dengan kadar 0,9% diketahui tidak mempengaruhi kuat tekan SCC secara signifikan.
3. Di sisi lain, terjadi penurunan kuat tekan yang cukup signifikan antara benda uji dengan variasi perendaman air laut dengan benda uji dengan variasi perendaman larutan magnesium sulfat 5%. Pernyataan tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi sulfat yang terkandung pada larutan perendam mempengaruhi kuat tekan beton. Semakin tinggi konsentrasi sulfat yang terkandung, semakin rendah pula kuat tekan beton. Hal ini dikarenakan, dengan konsentrasi larutan sulfat yang lebih tinggi, pembentukan senyawa yang bersifat ekspansif dan merusak seperti gypsum dan ettringite lebih cepat, sehingga mempertinggi penurunan kuat tekan.
4. Terjadi perbedaan penurunan kuat tekan akibat variasi perendaman dengan larutan sulfat, dan larutan sulfat dengan metode rendam-angkat. Namun, perbedaan penurunan antara kedua variasi ini tidak begitu besar dikarenakan periode perendaman yang singkat dan perlakuan rendam-angkat dilakukan

pada tempat yang tidak terkena cahaya matahari secara langsung sehingga mengurangi efek penguapan pada saat pengangkatan.

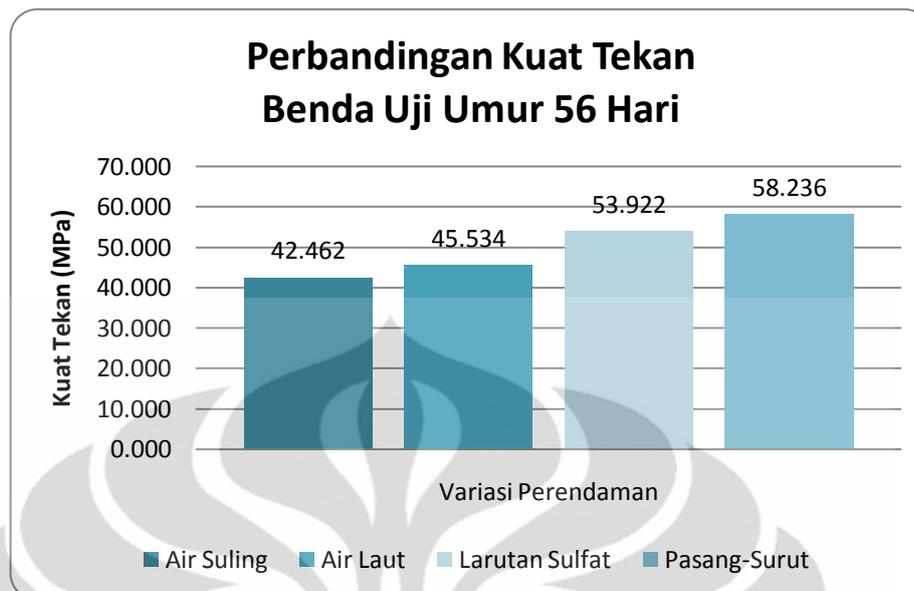
Tetapi, di sisi lain dapat dikatakan bahwa perlakuan rendam-angkat pada benda uji memiliki pengaruh terhadap penurunan kuat tekan beton, meskipun pengaruh yang diberikan tidak cukup signifikan.

Penurunan kuat tekan yang lebih tinggi akibat metode rendam-angkat ini diakibatkan oleh kristalisasi garam sulfat yang telah memasuki rongga-rongga dalam beton. Pada saat perendaman, larutan magnesium sulfat akan memasuki beton melalui pori-pori pada permukaan beton. Sehingga ketika diangkat, larutan tersebut telah berdifusi ke dalam beton. Ketika beton diangkat, air, sebagai media pelarut magnesium sulfat, menguap, sehingga meninggalkan magnesium sulfat dalam bentuk padat di dalam rongga-rongga pada beton. Selanjutnya, hal tersebut akan terus berulang dan meninggalkan deposit magnesium sulfat dalam jumlah yang lebih banyak sehingga mempercepat terjadinya serangan sulfat.

**Tabel 4.7.** Hasil Uji Kuat Tekan untuk Benda Uji Umur 56 Hari

<b>Variasi Perendaman</b>	<b>Rata-Rata Berat (gr)</b>	<b>Rata-Rata Kuat Tekan (MPa)</b>	<b>Penurunan Kuat Tekan (%)</b>
AS	3863,4	42,462	0
AL	3854,2	45,534	-7,23
LS	3873,2	53,922	-26,99
PS	3841,4	58,236	-37,15

\*) penurunan kuat tekan relatif terhadap benda uji variasi perendaman air suling



**Gambar 4.8.** Grafik Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton Umur 56 Hari

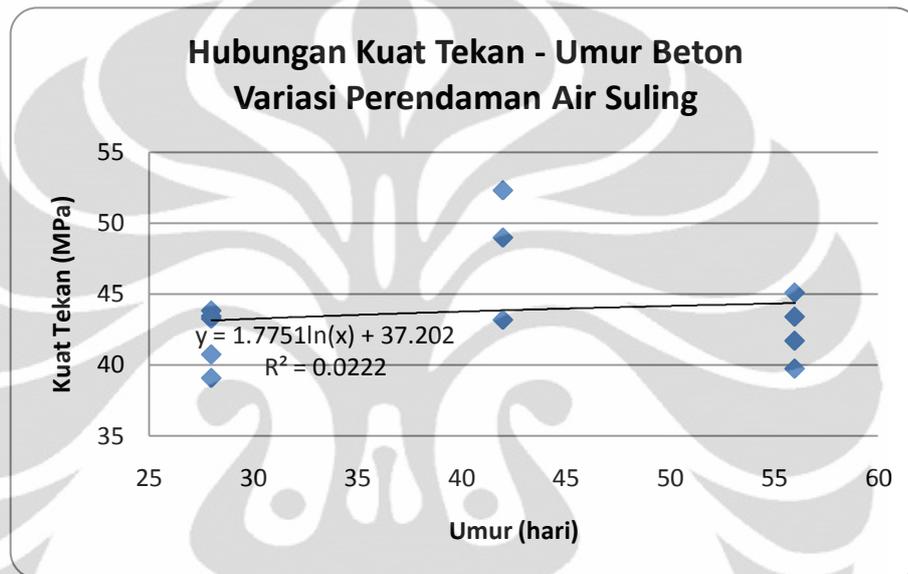
Sementara, pada benda uji umur 56 hari, variasi perendaman pada lingkungan yang lebih ekstrim justru mengakibatkan meningkatnya kekuatan tekan beton. Benda uji dengan variasi perendaman air laut mengalami kenaikan kuat tekan sebesar 7,23% terhadap benda uji dengan variasi perendaman air suling dengan umur yang sama. Sementara, kenaikan kuat tekan pada benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat dan larutan sulfat dengan metode pasang-surut masing-masing adalah sebesar 26,99% dan 37,14%.

Tren kuat tekan akibat variasi perendaman pada benda uji umur 56 hari ini berbeda dengan tren dengan variasi perendaman yang sama pada benda uji umur 42 hari, dimana tren kuat tekan akibat variasi perendaman mendekati tren ideal. Hal ini merupakan suatu keganjilan, dimana benda uji umur 56 hari seharusnya memiliki tren yang cenderung sama dengan tren pada umur 42 hari, mengingat waktu perendaman benda uji umur 56 hari pada air laut dan sulfat lebih lama. Keganjilan ini diakibatkan oleh beberapa perbedaan yang terjadi dalam proses pembuatan benda uji umur 56 hari, yaitu sebagai berikut:

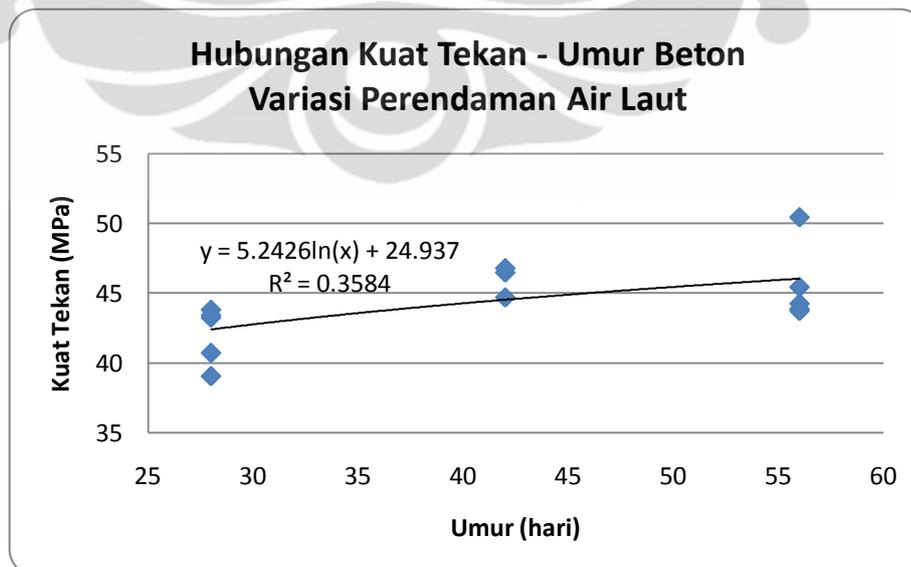
1. Pada saat pembuatan benda uji umur 56 hari variasi perendaman air suling dan air laut, kadar *superplasticizer* yang digunakan adalah 1%. Sementara untuk benda uji umur 56 hari dengan variasi perendaman LS dan PS digunakan *superplasticizer* sebanyak 1,05%. Perbedaan kadar

*superplasticizer* yang ditambahkan ini memungkinkan terjadinya perbedaan kuat tekan pada benda uji, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

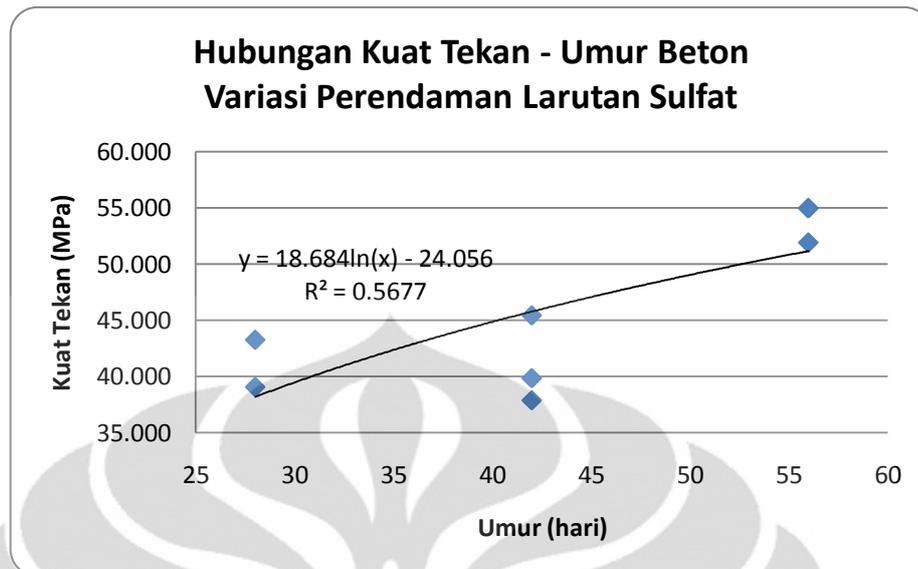
2. Benda uji umur 56 hari dengan variasi perendaman AS dan AL mengalami *bleeding* dan segregasi pada proses pembuatannya. Hal ini mempengaruhi kekuatan seluruh benda uji yang dibuat secara bersamaan, baik benda uji tekan, tarik belah, maupun tarik lentur.



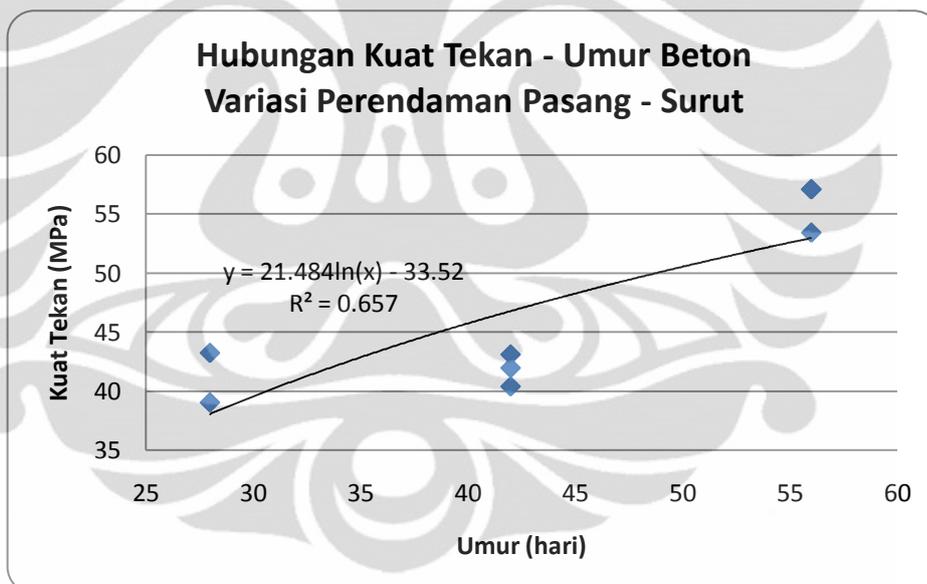
**Gambar 4.9.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Suling



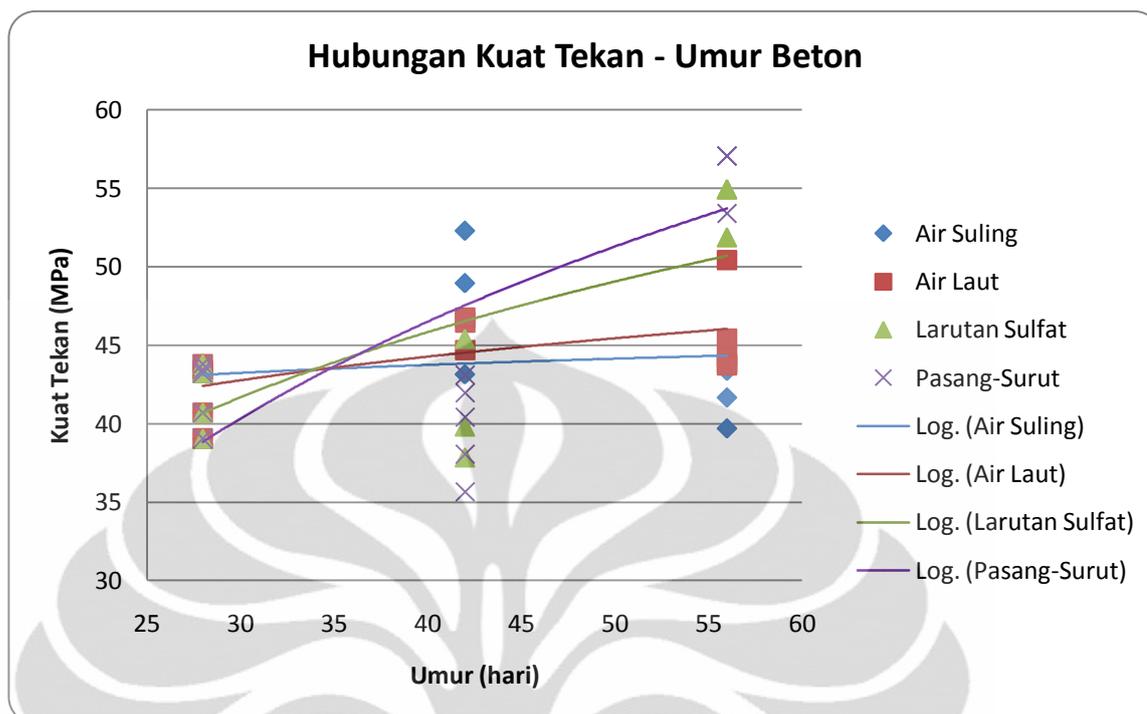
**Gambar 4.10.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Laut



**Gambar 4.11.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Larutan Sulfat



**Gambar 4.12.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tekan pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Pasang-Surut



**Gambar 4.13.** Grafik Tren Perkembangan Kuat Tekan untuk Semua Variasi Perendaman

Berdasarkan *trendline* untuk masing-masing variasi perendaman, dapat dikatakan secara umum bahwa secara logaritmik, kuat tekan pada setiap variasi perendaman akan mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya umur beton.

Pada benda uji dengan variasi perendaman benda uji dengan air suling, kenaikan tegangan tekan yang terjadi tidak sedrastis jika dibandingkan dengan variasi perendaman lain. Hal ini dikarenakan pada umur ke-56 hari, kuat tekan benda uji mengalami penurunan, yang merupakan suatu keganjilan dan telah dilakukan analisis sebelumnya. Sementara, benda uji dengan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat memiliki kenaikan kuat tekan yang tertinggi dari keempat variasi perendaman. Hal ini dikarenakan pada umur ke-56, benda uji memiliki kuat tekan yang tinggi.

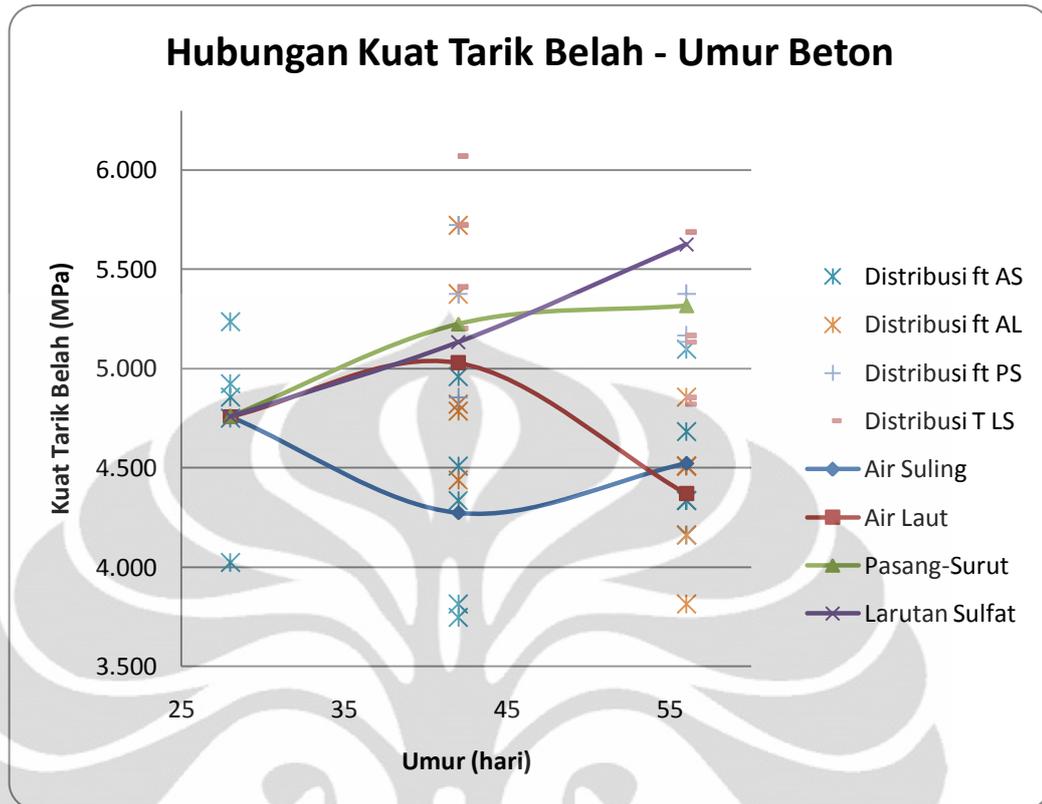
#### 4.7 ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP KUAT TARIK BELAH

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada benda uji dengan umur 28, 42, dan 56 hari dengan variasi perendaman dengan air suling (AS), air laut (AL), larutan magnesium sulfat 5% (LS) dan perendaman dengan larutan magnesium sulfat 5% dengan metode rendam-angkat (PS), setelah sebelumnya dilakukan perendaman pada air suling selama 28 hari.

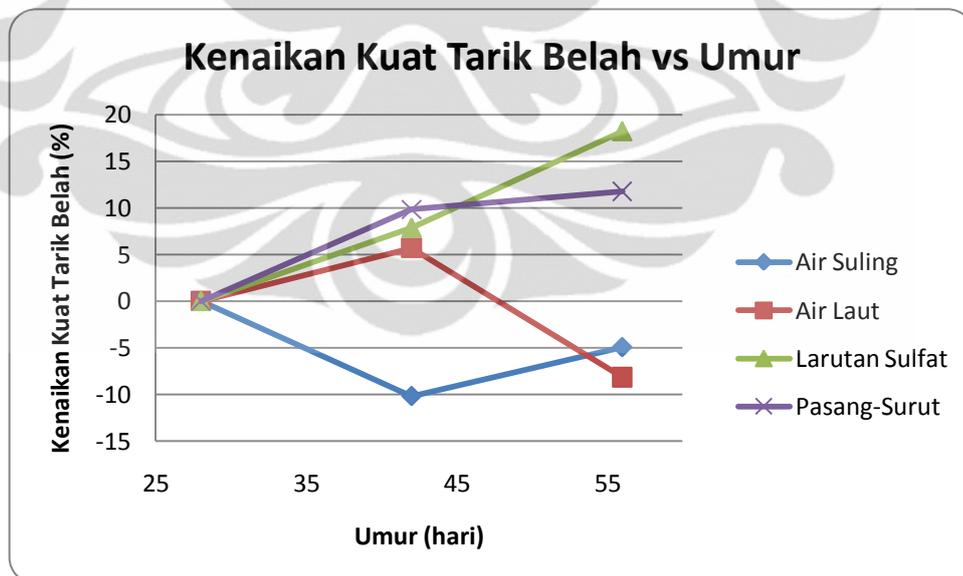
**Tabel 4.8.** Hasil Uji Kuat Tarik Belah

Umur Benda Uji (hari)	Metode Perendaman	Rata-Rata Kuat Tarik Belah (MPa)	Kenaikan Kuat Tarik Belah (%)
28	AS	4.758	0
42	AS	4.273	-10.20
	AL	5.029	5.69
	LS	5.133	7.87
	PS	5.225	9.82
56	AS	4.523	-4.96
	AL	4.370	-8.16
	LS	5.625	18.22
	PS	5.318	11.76

\*) kenaikan kuat tekan relatif terhadap benda uji umur 28 hari



**Gambar 4.14.** Grafik Hubungan Kuat Tarik Belah dengan Umur Beton untuk Setiap Variasi Perendaman

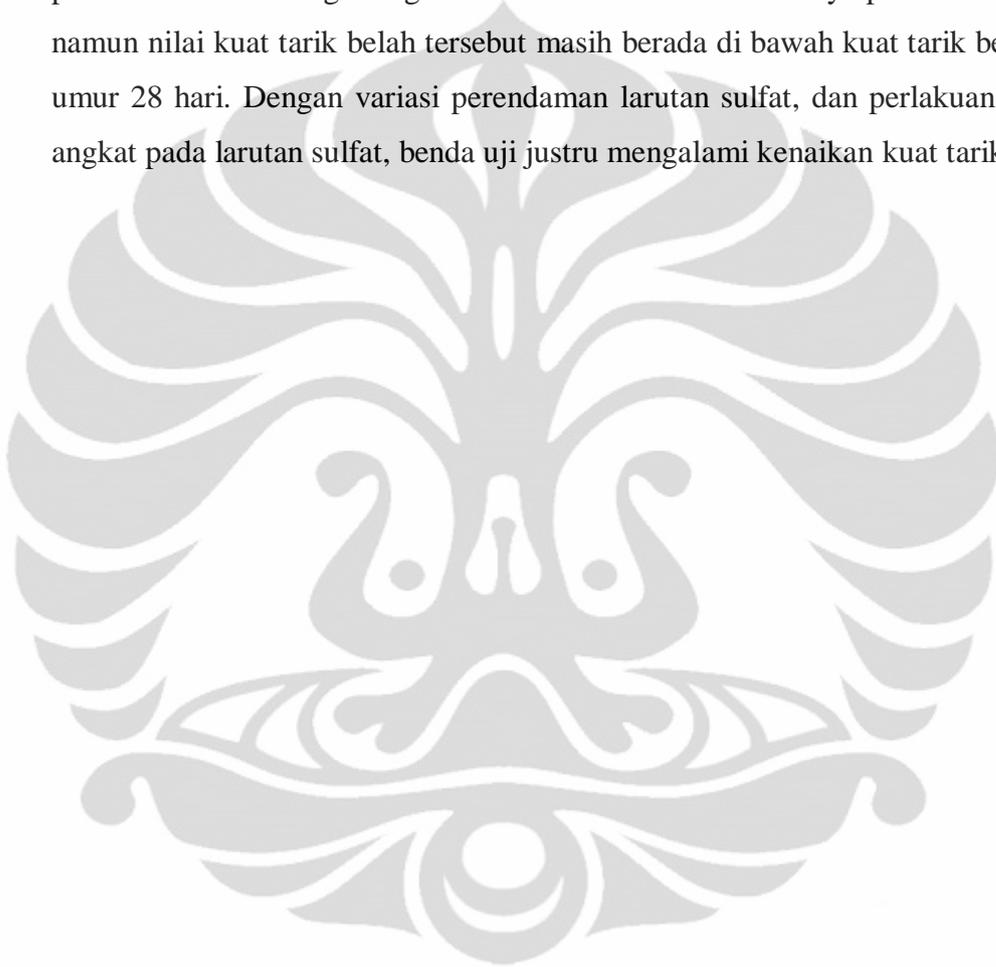


**Gambar 4.15.** Grafik Persentase Kenaikan Kuat Tarik Belah Benda Uji untuk Setiap Variasi Perendaman

Berdasarkan Gambar 4.13. dan 4.14., dapat dilihat bahwa pada umur 42 hari, kuat tarik belah benda uji untuk variasi perendaman air laut, larutan sulfat

dan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat mengalami peningkatan. Sementara, pada air suling, kuat tarik belah benda uji justru mengalami penurunan.

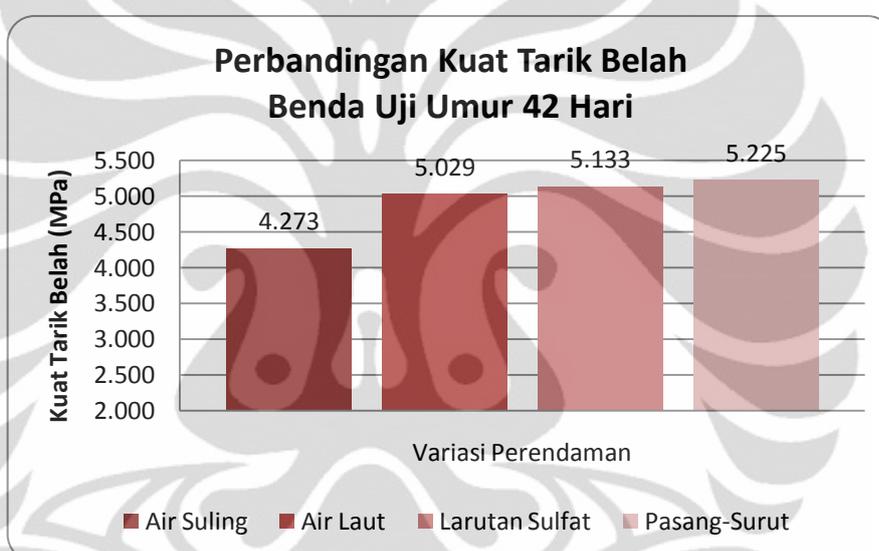
Pada umur 56 hari, kuat tarik belah benda uji variasi perendaman air laut justru mengalami penurunan yang cukup signifikan. Sementara, benda uji variasi perendaman air suling mengalami kenaikan dari kuat tariknya pada umur 42 hari, namun nilai kuat tarik belah tersebut masih berada di bawah kuat tarik belah pada umur 28 hari. Dengan variasi perendaman larutan sulfat, dan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat, benda uji justru mengalami kenaikan kuat tarik belah.



**Tabel 4.9.** Hasil Uji Kuat Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 42 Hari

Variasi Perendaman	Rata-Rata Kuat Tarik Belah (MPa)	Penurunan Kuat Tarik Belah (%)
AS	4.273	0
AL	5.029	-17.69%
LS	5.133	-20.13%
PS	5.225	-22.29%

\*) penurunan kuat tarik belah relatif terhadap benda uji variasi perendaman air suling



**Gambar 4.16.** Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 42 Hari

Berdasarkan Gambar 4.15, pada benda uji umur 42 hari, variasi perendaman menyebabkan kenaikan kuat tarik belah. Benda uji dengan variasi perendaman air suling memiliki kuat tarik belah sebesar 4,273. Sedangkan, pada benda uji dengan variasi perendaman air laut, terjadi kenaikan kuat tarik belah, yaitu sebesar 17,69%. Pada benda uji dengan variasi perendaman yang lebih ekstrim, yaitu larutan magnesium sulfat 5%, dan larutan magnesium sulfat 5% dengan metode rendam-angkat, kuat tarik belah mengalami kenaikan berturut-turut sebesar 20,13% dan 22,29%. Tren penurunan kuat tarik pada benda uji umur 42 hari ini tidak sama dengan tren penurunan kuat tekan pada benda uji dengan umur yang sama.

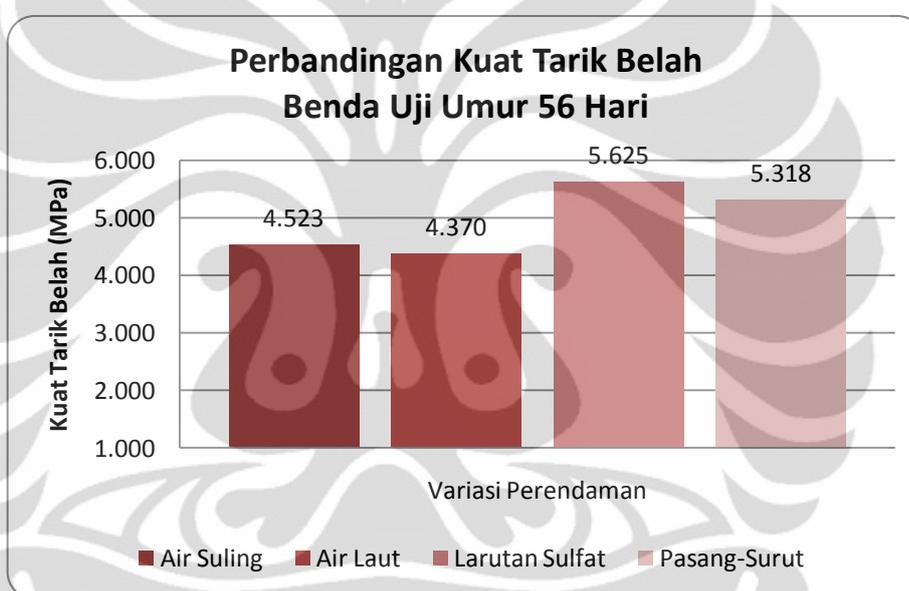
Hal ini dimungkinkan karena pada awal serangan sulfat, terjadi pembentukan *brucite* ( $Mg(OH)_2$ ) akibat reaksi kalsium hidroksida pada pasta semen dengan magnesium sulfat. Menurut Rasheeduzzafar (1994) dan Al-Amoudi (1992), pada serangan sulfat, *brucite* bertindak sebagai agen yang memperlambat terjadinya serangan magnesium sulfat terhadap kalsium silikat hidrat, produk hidrasi semen.

Selain itu, secara teknis, perendaman benda uji baik pada air laut maupun larutan sulfat dilakukan setelah dilakukan perendaman pada air suling selama 28 hari. Perendaman pada air laut dan larutan sulfat ini dilakukan langsung setelah benda uji diangkat dari air suling, sehingga pada saat perendaman dengan air laut dan larutan sulfat, benda uji jenuh oleh air suling. Periode perendaman yang cukup singkat, yaitu selama 14 hari memungkinkan air suling yang sebelumnya berada di dalam beton tidak dapat berdifusi ke luar dari benda uji, sehingga menghambat infusi larutan sulfat ke dalam benda uji.

**Tabel 4.10.** Hasil Uji Kuat Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 56 Hari

Variasi Perendaman	Rata-Rata Kuat Tarik Belah (MPa)	Penurunan Kuat Tarik Belah (%)
AS	4.523	0
AL	4.370	3.37%
LS	5.625	-24.39%
PS	5.318	-17.59%

\*) penurunan kuat tarik belah relatif terhadap benda uji variasi perendaman air suling

**Gambar 4.17.** Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Belah untuk Benda Uji Umur 56 Hari

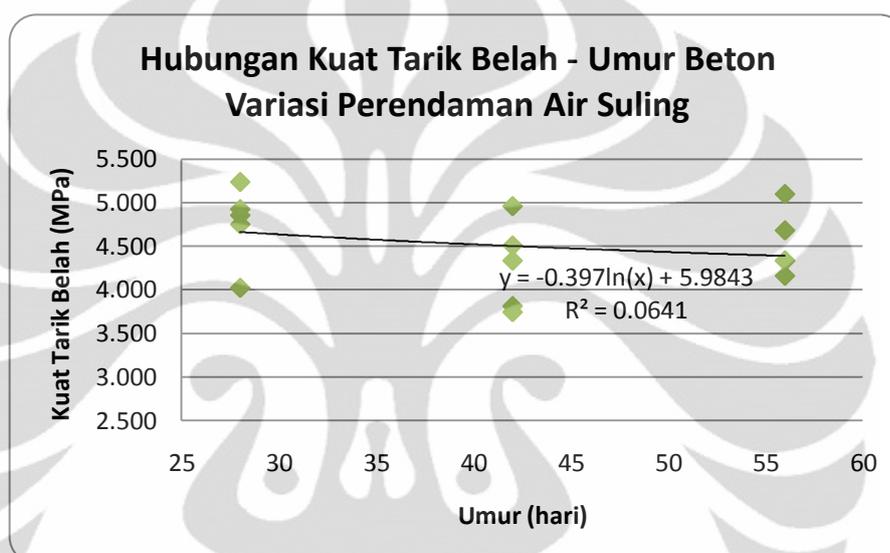
Pada benda uji umur 56 hari, besar kuat tarik belah benda uji dengan variasi perendaman air suling adalah 4,523. Sementara benda uji dengan variasi perendaman air laut mengalami penurunan kuat tarik belah sebesar 3,37%. Benda uji yang dikondisikan pada larutan magnesium sulfat 5% dan pada larutan magnesium sulfat 5% dengan metode rendam-angkat mengalami kenaikan kekuatan tarik belah masing-masing sebesar 24,39% dan 17,59%.

Berdasarkan grafik tersebut, dapat dinyatakan beberapa hal sebagai berikut:

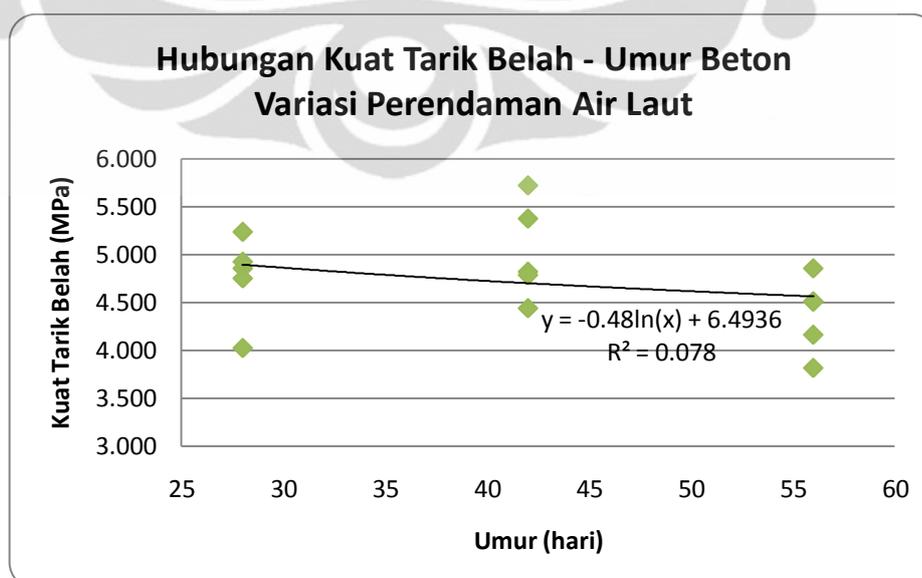
1. Terjadi penurunan kekuatan tarik belah akibat variasi perendaman air laut terhadap kuat tarik belah pada benda uji dengan variasi perendaman air suling. Hal ini menunjukkan bahwa variasi perendaman air laut berpengaruh

terhadap kekuatan tarik belah beton, meskipun pengaruh variasi perendaman tersebut cenderung tidak signifikan.

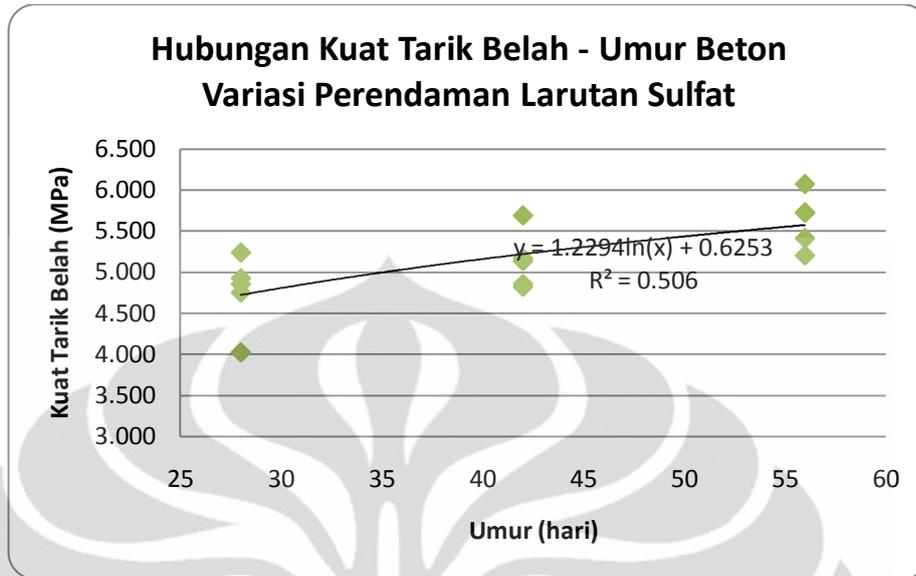
2. Terjadi penurunan kekuatan tarik belah akibat variasi perendaman larutan sulfat dengan metode rendam-angkat dibandingkan dengan benda uji akibat variasi perendaman larutan sulfat. Hal ini menunjukkan bahwa variasi perendaman larutan sulfat dengan metode rendam-angkat mempengaruhi kekuatan tarik belah beton.



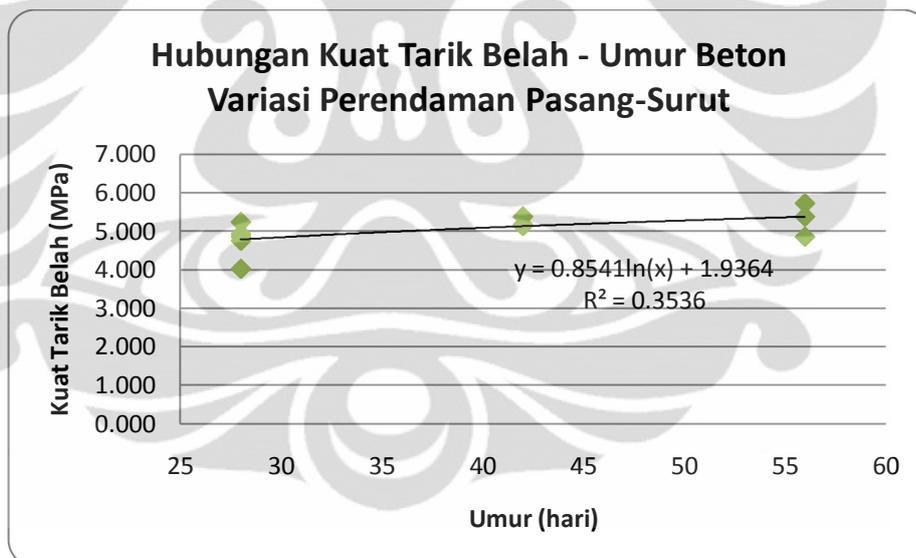
**Gambar 4.18.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Suling



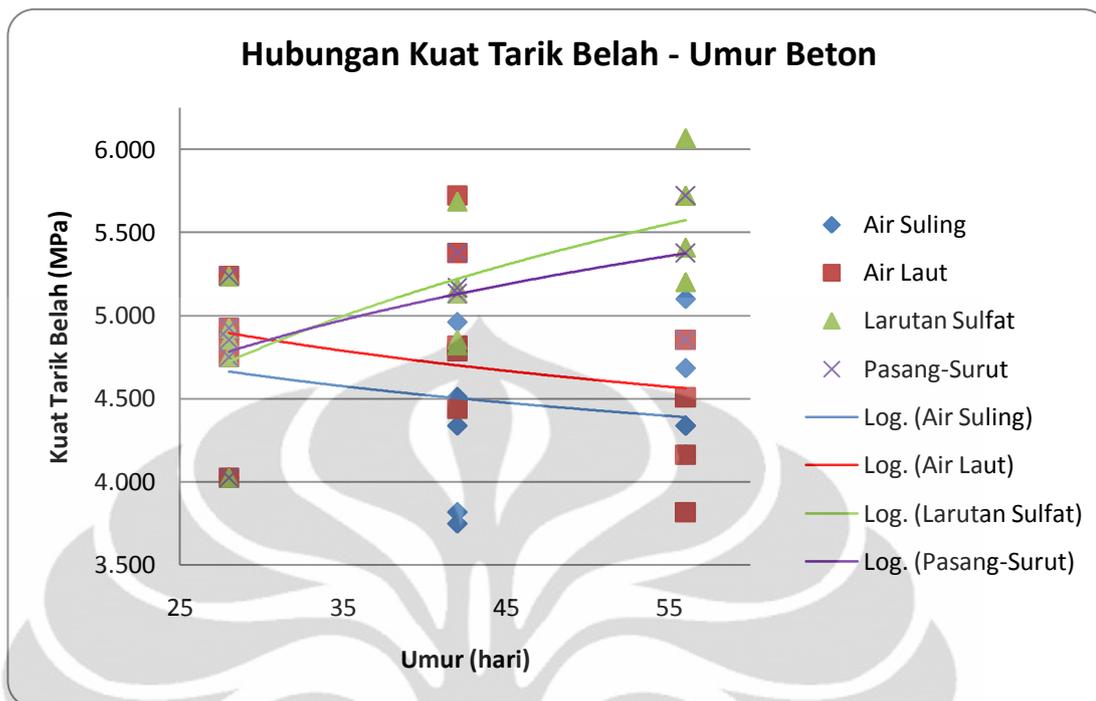
**Gambar 4.19.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Laut



**Gambar 4.20.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Larutan Sulfat



**Gambar 4.21.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Belah pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Pasang-Surut



**Gambar 4.22.** Tren Perkembangan Kuat Tarik Belah untuk Semua Variasi Perendaman

Berdasarkan grafik, tegangan tarik belah benda uji dengan variasi perendaman air suling dan air laut mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya umur beton. Hal ini dikarenakan pada umur 56 hari, nilai kuat tarik belah benda uji dengan kedua variasi perendaman tersebut mengalami penurunan.

Sementara, pada benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat dan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat, kuat tarik belah akan mengalami kenaikan. Kedua hal ini dapat dilihat dari *trendline* logaritmik untuk variasi perendaman air suling dan air laut yang cenderung menurun, sementara *trendline* logaritmik untuk variasi perendaman larutan sulfat dan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat cenderung meningkat. Selain itu, hal ini dapat disimpulkan juga melalui persamaan logaritmik dari *trendline* pada keempat variasi perendaman.

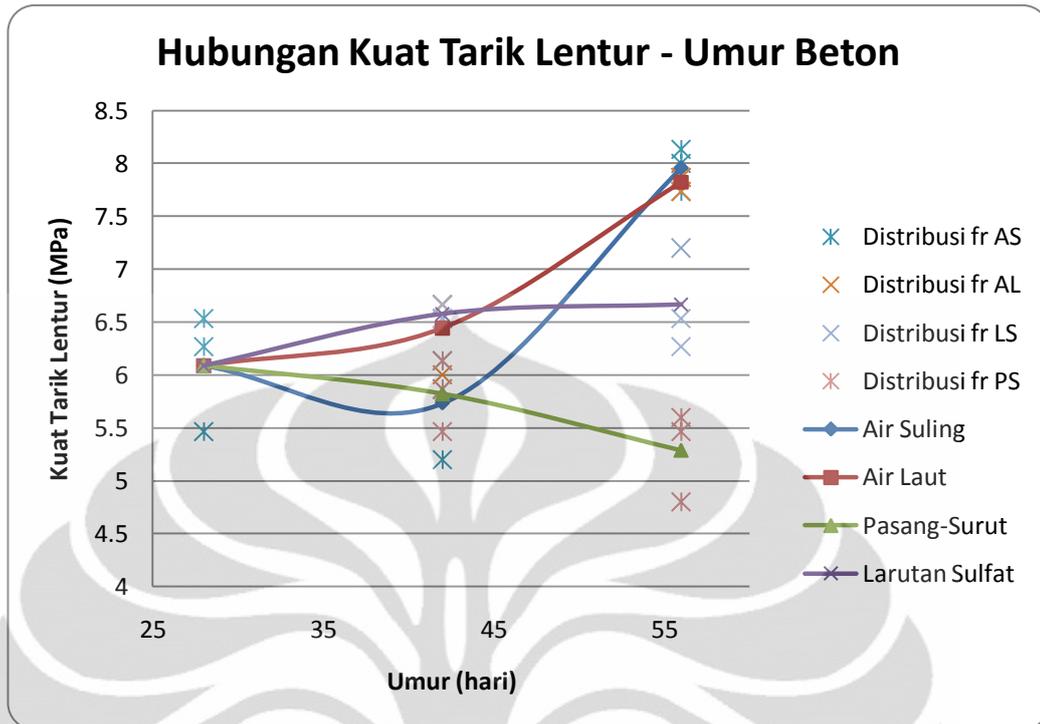
#### 4.8 ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP KUAT TARIK LENTUR

Pengujian kuat tarik lentur dilakukan pada benda uji dengan umur 28, 42, dan 56 hari dengan variasi perendaman dengan air suling (AS), air laut (AL), larutan sulfat (LS) dan perendaman dengan larutan sulfat secara rendam-angkat (PS) setelah dilakukan perendaman selama 28 hari pada air suling.

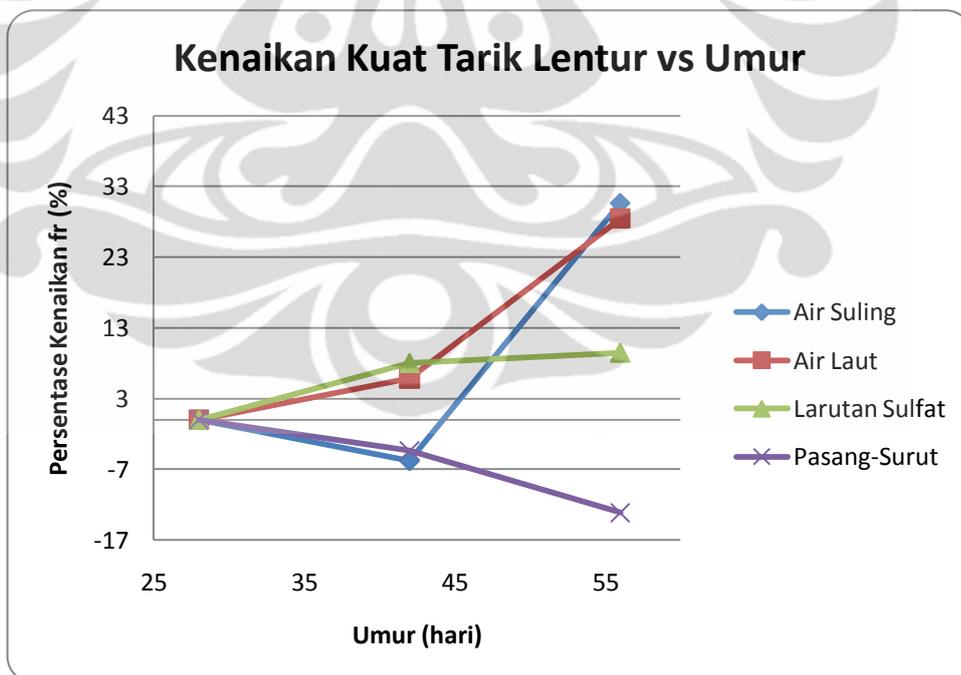
**Tabel 4.11.** Hasil Uji Kuat Tarik Lentur

Umur Benda Uji (hari)	Variasi Perendaman	Rata-Rata Kuat Tarik Lentur (MPa)	Kenaikan Kuat Tarik Lentur (%)
28	AS	6.089	0
42	AS	5.733	-5.84
	AL	6.444	5.84
	LS	6.578	8.03
	PS	5.822	-4.38
56	AS	7.956	30.66
	AL	7.822	28.47
	LS	6.667	9.49
	PS	5.289	-13.14

\*<sup>1</sup>) kenaikan kuat tarik lentur relatif terhadap benda uji umur 28 hari



**Gambar 4.23.** Grafik Perkembangan Kuat Tarik Lentur untuk Setiap Variasi Perendaman



**Gambar 4.24.** Grafik Persentase Kenaikan Kuat Tarik Lentur Benda Uji untuk Setiap Variasi Perendaman

Berdasarkan Gambar 4.21. dan Gambar 4.22., dapat terlihat bahwa benda uji dengan variasi perendaman air suling mengalami penurunan kuat lentur pada

umur 42 hari, kemudian kuat lentur kembali mengalami kenaikan pada umur 56 hari. Sementara, pada benda uji dengan variasi perendaman air laut dan larutan sulfat, pada umur 42 hari terjadi kenaikan kuat lentur, begitu juga pada umur 56 hari. Benda uji yang mengalami perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat 5% mengalami penurunan kuat lentur, baik pada umur 42 hari maupun 56 hari.

Tren perkembangan kuat tarik lentur seharusnya sejalan dengan tren perkembangan kuat tekan, yaitu kuat tarik lentur akan meningkat sejalan dengan umur benda uji yang juga semakin meningkat. Sehingga, penurunan kuat tarik lentur pada benda uji dengan variasi perendaman air suling merupakan suatu keganjilan.

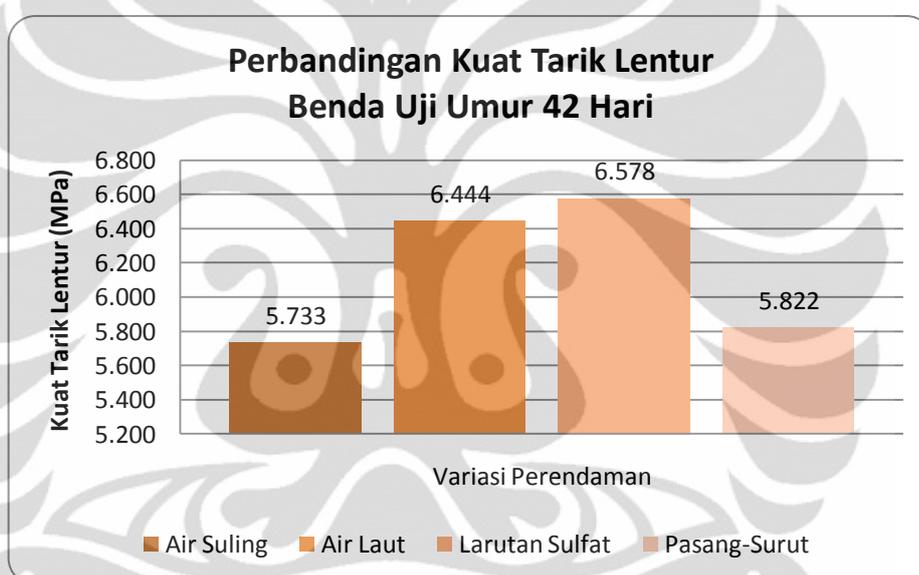
Berdasarkan catatan pengecoran dan pengujian terlampir, salah satu penyebab turunnya kuat tarik lentur benda uji dengan variasi air suling pada umur 42 hari adalah karena benda uji tidak dibuat dalam hari yang sama, sehingga memungkinkan terjadinya benda uji yang tidak homogeny satu sama lain. Selain itu, seperti telah dijelaskan sebelumnya, pembuatan benda uji umur 28 hari menggunakan air kurang dari yang direncanakan, hal tersebut mengurangi faktor air semen yang seharusnya sama untuk semua benda uji sehingga mengakibatkan peningkatan nilai kuat tarik lentur pada benda uji umur 28 hari.

Sementara, pada benda uji dengan variasi perendaman pasang-surut juga terjadi penurunan kekuatan pada umur 42 hari. Hal ini dimungkinkan karena dampak perendaman dan pengangkatan dalam larutan sulfat. Namun, berdasarkan literatur yang ada, perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat dalam waktu yang cukup singkat, yaitu selama 14 hari tidak menyebabkan kerusakan yang cukup berarti untuk dapat mengurangi kuat tarik lentur.

**Tabel 4.12.** Hasil Uji Kuat Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 42 Hari

Variasi Perendaman	Rata-Rata Kuat Tarik Lentur (MPa)	Penurunan Kuat Tarik Lentur (%)
AS	5.733	0
AL	6.444	-12.403
LS	6.578	-13.103
PS	5.822	-1.351

\*) penurunan kuat tarik belah relatif terhadap benda uji variasi perendaman air suling

**Gambar 4.25.** Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 42 Hari

Pada umur 42 hari, benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat memiliki kuat lentur tertinggi yaitu sebesar 6,578 MPa, disusul dengan benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat, pasang-surut, dan benda uji dengan variasi perendaman air suling justru memiliki kuat tarik lentur yang terendah. Sehingga berdasarkan benda uji dengan variasi perendaman air suling, benda uji dengan variasi perendaman air laut, larutan sulfat dan perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat mengalami kenaikan kuat lentur masing-masing sebesar 12,403%, 13,103%, dan 1,351%.

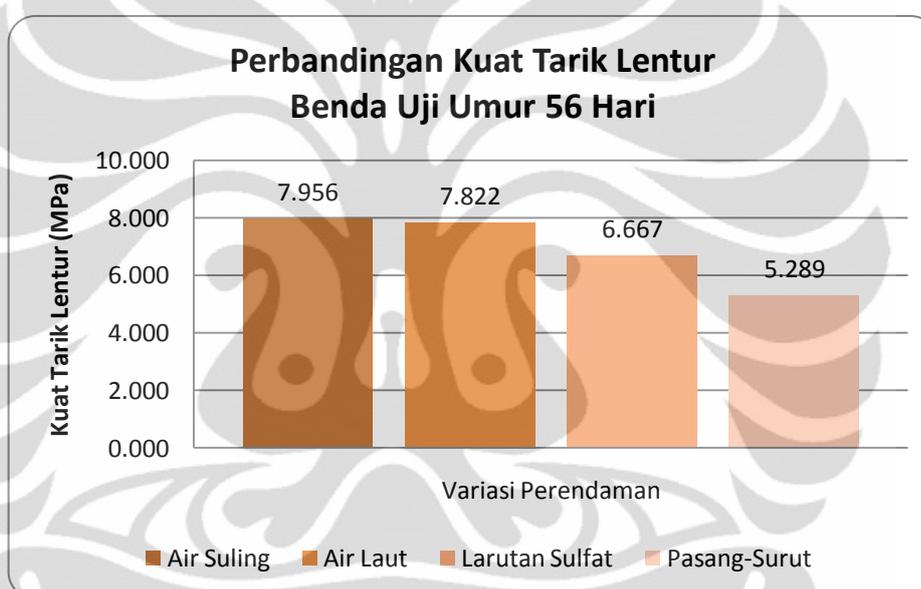
Kenaikan kuat tarik lentur pada benda uji yang dikondisikan pada lingkungan yang lebih ekstrim merupakan suatu keganjilan. Namun, keganjilan tersebut dimungkinkan karena alasan-alasan berikut ini:

1. Pada proses pengecoran benda uji dengan variasi perendaman air laut, volume air yang ditambahkan dalam campuran lebih sedikit dari yang telah diperhitungkan, dikarenakan dengan volume air yang telah ditambahkan di dalam campuran, telah didapatkan *slump flow* yang memenuhi standar. Sementara pada hari yang sama, untuk benda uji dengan variasi perendaman air suling, volume air yang ditambahkan dalam campuran sesuai dengan perhitungan rancang campur beton. Hal tersebut mengakibatkan kuat lentur benda uji dengan variasi perendaman air laut lebih tinggi dari kuat lentur benda uji dengan variasi perendaman air suling. Selain itu, hal ini juga membuktikan bahwa perendaman dengan air laut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kuat tarik lentur beton.
2. Selain itu, pada pengecoran benda uji dengan variasi perendaman air suling dan air laut, semen yang digunakan cukup lembab dan sedikit menggumpal jika dibandingkan semen yang digunakan pada pengecoran benda uji larutan sulfat dan pasang-surut.
3. Menurut Turker, et al (1997), pada awal serangan sulfat terjadi pembentukan *brucite* yang memiliki karakteristik memperlambat terjadinya efek dari serangan sulfat pada beton. Selain itu, menurut Seung-Tae Lee (2007), perendaman benda uji mortar selama 28 hari pada larutan magnesium sulfat 5% menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan benda uji dengan umur sama yang direndam pada air biasa. Sehingga, dampak serangan sulfat yang belum terlihat pada penelitian ini dimungkinkan terjadi akibat adanya pembentukan *brucite*.

**Tabel 4.13.** Hasil Uji Kuat Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 56 Hari

Variasi Perendaman	Rata-Rata Kuat Tarik Lentur (MPa)	Penurunan Kuat Tarik Lentur (%)
AS	7.956	0
AL	7.822	1.676
LS	6.667	16.201
PS	5.289	33.520

\*) penurunan kuat tarik belah relatif terhadap benda uji variasi perendaman air suling

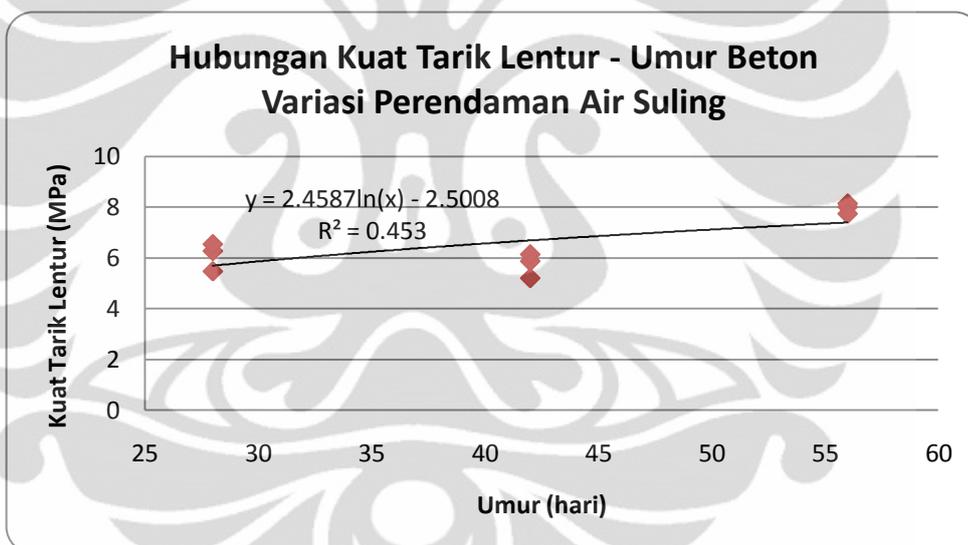
**Gambar 4.26.** Grafik Perbandingan Tegangan Tarik Lentur untuk Benda Uji Umur 56 Hari

Pada umur ke-56 hari, benda uji dengan variasi perendaman air suling memiliki kuat tarik lentur yang terbesar, disusul dengan variasi perendaman air laut, larutan sulfat dan larutan sulfat dengan metode rendam-angkat. Selain itu, berdasarkan gambar dan tabel dapat dilihat bahwa pengaruh serangan sulfat akibat perendaman dengan air laut tidak begitu signifikan, mengingat penurunan kekuatan tarik lentur akibat variasi perendaman air laut hanya sebesar 1,68%. Hal ini diakibatkan oleh kadar sulfat yang terkandung dalam air laut hanya sebesar 0,2%.

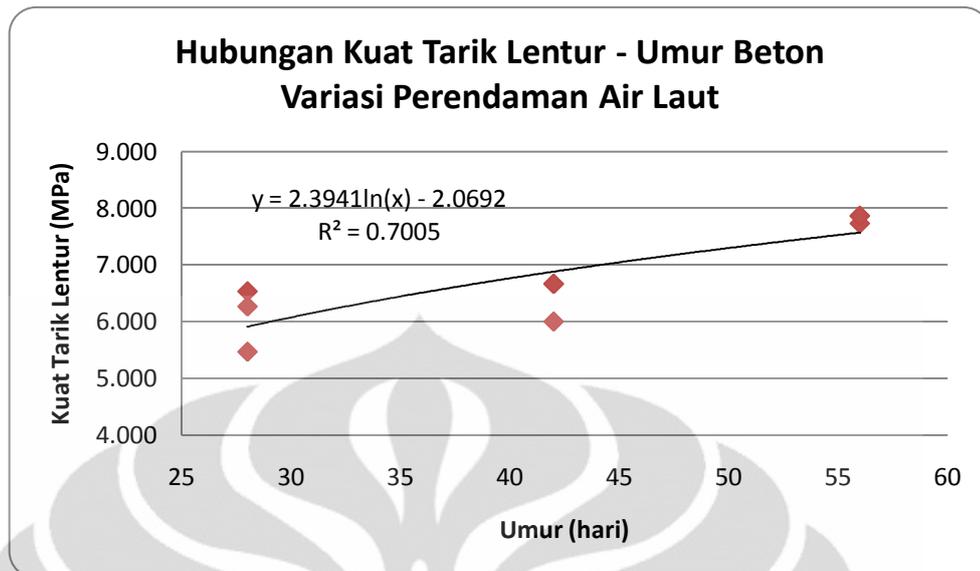
Sementara, akibat perendaman dengan larutan sulfat dengan kadar 5% mengakibatkan penurunan kekuatan tarik lentur sebesar 16,201% yang artinya

perendaman dengan larutan sulfat terbukti mengurangi kekuatan tarik lentur beton secara cukup signifikan, sesuai dengan pernyataan Ferraris, et al. (1997), yaitu konsentrasi larutan sulfat adalah salah satu faktor yang mempengaruhi mode kerusakan pada beton.

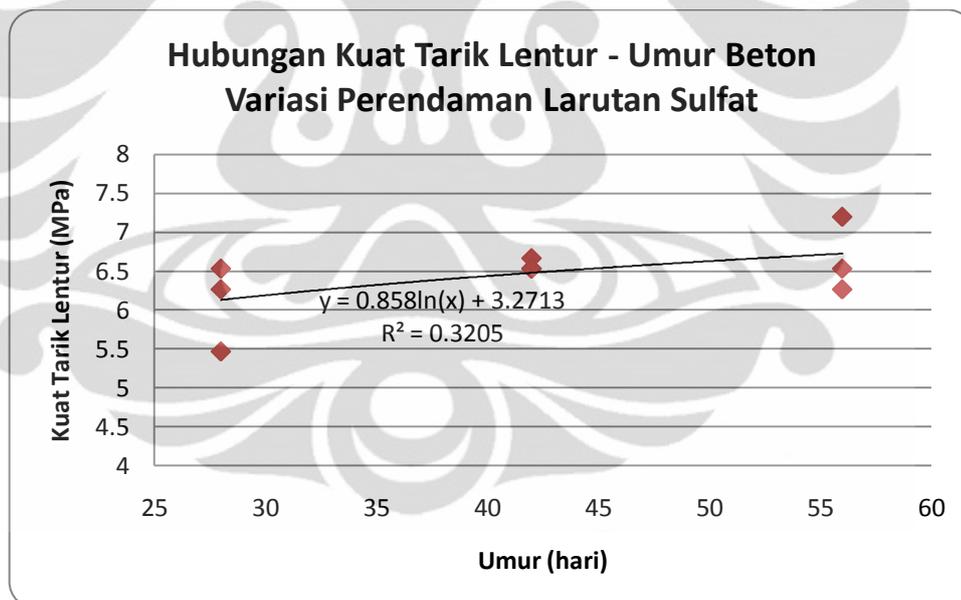
Variasi perendaman pasang-surut menyebabkan penurunan kuat tarik lentur terbesar, yaitu sebesar 33,52% dari kuat lentur benda uji variasi perendaman air suling. Sedangkan bila dibandingkan dengan kuat lentur benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat, variasi perendaman pasang-surut menyebabkan penurunan kuat lentur relatif sebesar 17,319%. Hal ini membuktikan bahwa perlakuan rendam-angkat pada benda uji mempengaruhi kuat tarik lenturnya.



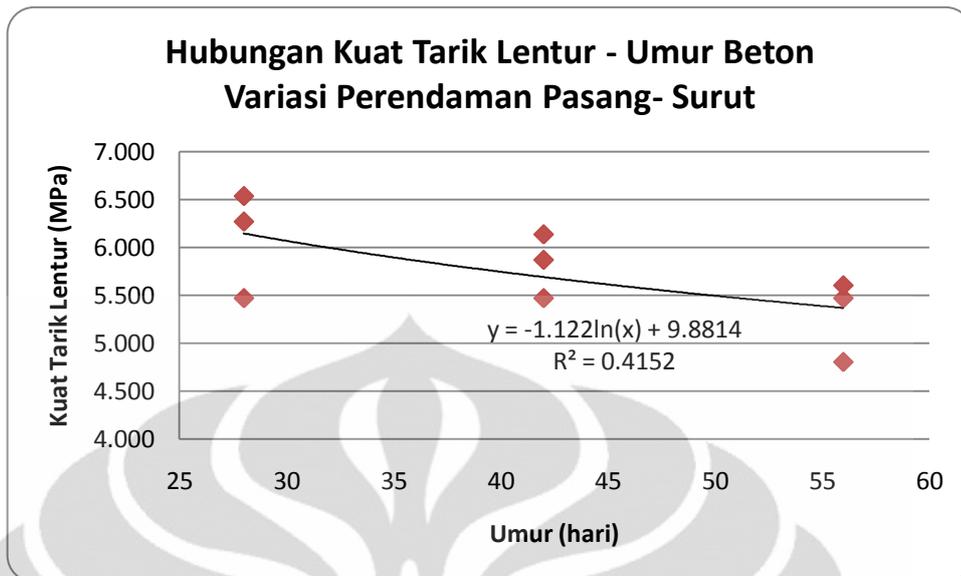
**Gambar 4.27.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Suling



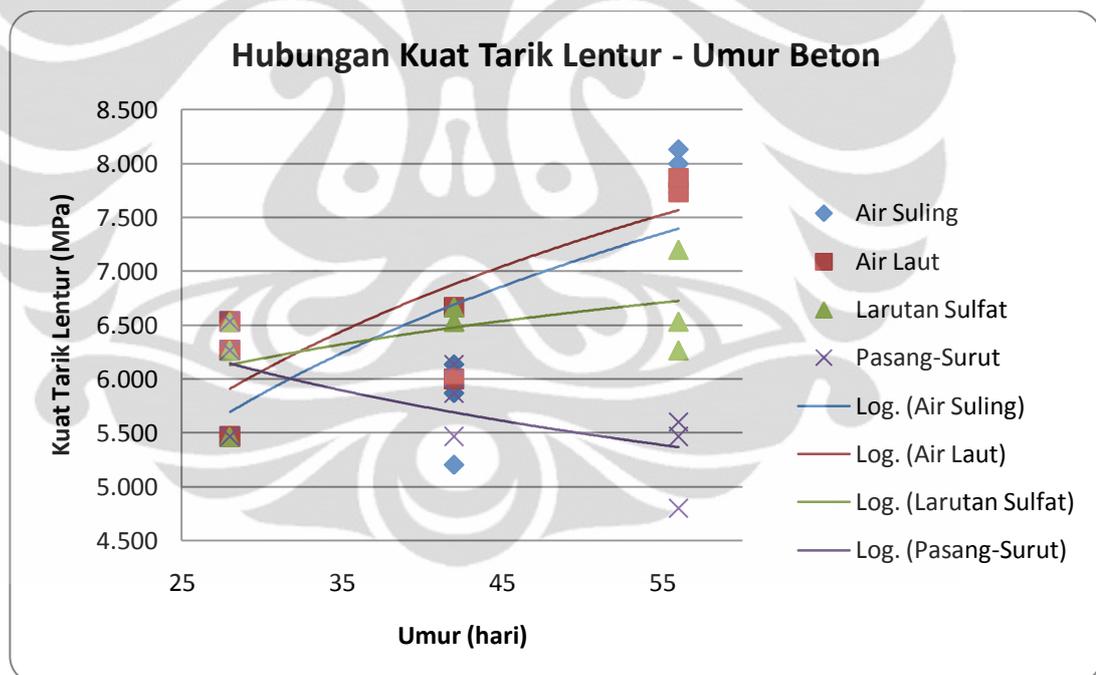
**Gambar 4.28.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Air Laut



**Gambar 4.29.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Larutan Sulfat



**Gambar 4.30.** Grafik Distribusi dan Tren Kuat Tarik Lentur pada Benda Uji dengan Variasi Perendaman Pasang-Surut



**Gambar 4.31.** Tren Perkembangan Kuat Tarik Lentur untuk Semua Variasi Perendaman

Berdasarkan kelima grafik di atas, dapat dikatakan bahwa kuat lentur benda uji dengan variasi perendaman air suling, air laut, dan larutan sulfat akan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya umur beton. Sementara, benda uji dengan variasi perlakuan rendam-angkat pada larutan sulfat akan terus mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya umur beton.

**Universitas Indonesia**

#### 4.10 ANALISIS PENGARUH SULFAT TERHADAP PERMEABILITAS BETON

Pengujian permeabilitas dilakukan pada benda uji kubus 15 x 15 x 15 cm dengan umur 42 hari. Pengujian dilakukan pada benda uji dengan semua variasi perendaman, yaitu air suling, air laut, larutan magnesium sulfat 5%, dan perlakuan rendam-angkat pada larutan magnesium sulfat 5% setelah dilakukan perendaman selama 28 hari pada air suling.

**Tabel 4.14.** Hasil Uji Permeabilitas

Variasi Perendaman	Rata-Rata Penetrasi (mm)	Penurunan/Kenaikan Penetrasi (%)
Air Suling	12.8	0
Air Laut	8.3	-35.584
Larutan Sulfat	13.50	5.195
Pasang-Surut	15.78	22.944

Berdasarkan hasil uji permeabilitas, diketahui bahwa penetrasi air pada benda uji dengan variasi perendaman air suling adalah sebesar 12,8 mm. Sementara, benda uji dengan variasi perendaman air laut memiliki kedalaman penetrasi sebesar 8,3 mm, dengan penurunan penetrasi sebesar 35,584% terhadap benda uji dengan variasi perendaman air suling. Benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat mengalami kedalaman penetrasi sebesar 13,5 mm, dengan kenaikan penetrasi sebesar 5,195%. Benda uji dengan variasi perendaman larutan magnesium sulfat 5% dengan perlakuan rendam angkat mengalami kedalaman penetrasi sebesar 15,78 mm, dengan kenaikan penetrasi sebesar 22,944%.

Secara teoritis, akibat serangan sulfat, beton akan memiliki permeabilitas yang lebih tinggi yang berarti penetrasi yang terjadi lebih dalam, dikarenakan larutan sulfat yang berdifusi menyebabkan kerusakan pada matriks semen, terutama pada kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat. Perusakan ini menyebabkan beton menjadi lebih porous. Namun pada penelitian ini,

perendaman benda uji dalam air laut justru memperkecil nilai kedalaman penetrasi. Hal ini dimungkinkan terjadi akibat benda uji dengan variasi perendaman air suling mengalami *bleeding* dan segregasi pada saat pembuatannya. *Bleeding* menyebabkan benda uji memiliki *void ratio* yang lebih besar sehingga memungkinkan air yang diberikan pada saat pengujian permeabilitas berpenetrasi lebih dalam.

Sementara, terdapat perbedaan yang cukup besar antara penetrasi pada benda uji dengan variasi perendaman air laut dan larutan sulfat. Hal ini dikarenakan pada saat pengujian permeabilitas pada benda uji dengan variasi perendaman larutan sulfat ditemui kebocoran pada salah satu benda uji, sehingga nilai permeabilitas yang terukur pada benda uji tersebut tergolong tinggi.

#### 4.11 KORELASI KUAT TEKAN DENGAN KUAT TARIK BELAH DAN KUAT TARIK LENTUR

Menurut *American Concrete Institute (ACI) Building Code 318-89*, korelasi antara nilai kuat tarik belah dengan kuat tekan untuk beton normal adalah:

$$f_t = 0,556 \sqrt{f_c'} \text{ MPa}$$

Sementara, korelasi antara nilai *modulus of rupture* dengan kuat tekan untuk beton normal, menurut *American Concrete Institute (ACI) Building Code 318-83* adalah:

$$f_r = 0,62 \sqrt{f_c'} \text{ MPa}$$

Namun, menurut Sekhar dan Rao (2008), penelitian dan standar untuk korelasi antara kuat tekan dengan kuat tarik belah dan kuat tarik lentur yang diadakan selama ini hanya berlaku untuk beton normal, dan tidak untuk *Self-Compacting Concrete (SCC)*. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, perlu dilakukan perbandingan antara korelasi antara kuat tarik belah dan kuat lentur dengan kuat tekan.

Untuk menentukan hubungan antara kuat tarik belah dan kuat tarik lentur dengan kuat tekan, digunakan sebuah koefisien permisalan. Untuk menentukan hubungan antara kuat tarik belah dengan kuat tekan, digunakan koefisien  $\alpha$ , dengan besar:

$$\alpha = \frac{f_t}{\sqrt{f_c'}}$$

**Tabel 4.15.** Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Tarik Belah

Variasi Perendaman	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata Kuat Tarik (MPa)	Rata-Rata $\alpha$	Kenaikan dari Standar (%)
AS	44.215	4.518	0.681	22.524
AL	45.754	4.699	0.695	24.934
LS	47.482	5.379	0.784	40.943
PS	49.038	5.272	0.762	37.115

Berdasarkan perhitungan nilai  $\alpha$  untuk setiap umur dan variasi perendaman benda uji, dapat dikatakan bahwa secara umum, nilai  $\alpha$  untuk setiap umur dan variasi perendaman benda uji melebihi nilai standar ACI sebesar 0,556. Hal tersebut menunjukkan bahwa SCC memiliki rasio antara kuat tarik dengan kuat tekan yang lebih tinggi.

Sementara, untuk menentukan hubungan antara kuat tarik lentur dengan kuat tekan, digunakan koefisien  $\beta$ , dengan nilai  $\beta$  sebesar:

$$\beta = \frac{f_r}{\sqrt{f_c}}$$

**Tabel 4.16.** Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Tarik Lentur

Variasi Perendaman	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata Kuat Lentur (MPa)	Rata-Rata $\beta$	Kenaikan dari Standar (%)
AS	44.215	6.593	0.995	60.551
AL	45.754	7.133	1.055	70.134
LS	47.482	6.622	0.967	56.018
PS	49.038	5.556	0.808	30.281

Berdasarkan perhitungan nilai  $\beta$  untuk setiap umur dan variasi perendaman benda uji, dapat dikatakan bahwa secara umum, nilai  $\beta$  untuk setiap umur dan variasi perendaman benda uji melebihi nilai standar ACI sebesar 0,62. Hal tersebut menunjukkan bahwa SCC memiliki rasio antara kuat tarik dengan kuat tekan yang lebih tinggi.

Selain itu, perbedaan nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  pada penelitian ini juga dimungkinkan akibat pembuatan benda uji tekan, tarik, dan lentur yang tidak dalam satu adukan sehingga menyebabkan benda uji tekan, tarik, dan lentur memiliki homogenitas yang rendah.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 KESIMPULAN**

Dari penelitian mengenai pengaruh pemakaian semen Portland tipe V terhadap ketahanan sulfat pada *self-compacting concrete* (SCC), didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Secara fisik dan visual, tidak terjadi kerusakan yang berarti akibat perendaman pada larutan sulfat selama 28 hari berdasarkan analisa kehilangan massa dan analisa visual.
2. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini memiliki tingkat kepercayaan yang rendah yang diakibatkan oleh pembuatan benda uji yang tidak konsisten pada awal masa pembuatan benda uji dan kondisi semen yang kurang baik.
3. Keberadaan ion sulfat dalam bentuk air laut maupun larutan magnesium sulfat 5% pada media perendam mempengaruhi kuat tekan, tarik belah, tarik lentur, dan permeabilitas SCC dengan semen Portland tipe V.
4. Perendaman dalam air laut selama 28 hari menyebabkan kuat tekan, tarik belah, dan tarik lentur yang cenderung menurun, dengan persentase penurunan kuat tekan, tarik belah dan tarik lentur masing-masing sebesar -7,23%, 3,37%, dan 1,68%. Sementara, akibat perendaman selama 14 hari, terjadi penurunan penetrasi air pada uji permeabilitas dengan presentase sebesar 35,6%.
5. Perendaman dalam larutan magnesium sulfat 5% selama 28 hari menyebabkan kecenderungan penurunan pada kuat tekan, tarik belah, dan tarik lentur, dengan presentase penurunan masing-masing sebesar -26,99%, -24,39%, dan 16,2%. Sementara, akibat perendaman selama 14 hari, terjadi penurunan penetrasi air pada uji permeabilitas dengan presentase sebesar 5,2%.
6. Perlakuan rendam-angkat dalam larutan magnesium sulfat 5% sebagai permodelan dari pasang-surut air laut pada benda uji menyebabkan kecenderungan penurunan pada kuat tekan, tarik belah, dan tarik lentur, dengan presentase penurunan masing-masing sebesar -37,15%, -17,59%, dan

33,52%. Sementara, akibat perendaman selama 14 hari, terjadi penurunan penetrasi air pada uji permeabilitas dengan presentase sebesar 22,94%.

7. Keberadaan ion klorida pada media perendam cenderung tidak memiliki pengaruh terhadap kuat tekan, tarik belah, dan tarik lentur SCC dengan semen Portland tipe V.
8. Durasi perendaman yang lebih lama dalam lingkungan yang mengandung sulfat cenderung meningkatkan besarnya penurunan kuat tekan, tarik belah, dan tarik lentur.

## 5.2 SARAN

Dari penelitian mengenai pengaruh pemakaian semen Portland tipe V terhadap ketahanan sulfat pada *self-compacting concrete* (SCC), saran untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan metode perhitungan rancang campur yang tepat untuk SCC akibat pengujian kelecakan pada SCC yang berbeda dengan pengujian kelecakan beton normal.
2. Pelaksanaan *trial mix* sebelum dilakukan pembuatan benda uji hingga didapatkan kadar *superplasticizer* yang tepat untuk mendapatkan *slump flow* yang sesuai dengan standar.
3. Perendaman dengan durasi yang lebih panjang agar dapat diketahui pengaruh sulfat terhadap SCC dengan semen Portland tipe V, baik secara fisik maupun terhadap sifat mekanisnya.
4. Variasi konsentrasi magnesium sulfat untuk penelitian lebih lanjut sebagai tambahan variasi perlakuan terhadap benda uji, agar dapat terlihat pengaruh besarnya konsentrasi sulfat terhadap benda uji.
5. Penggantian larutan sulfat yang digunakan sebagai media perendaman benda uji secara berkala, yaitu setiap 4 minggu. Penggantian dimaksudkan untuk menjaga konsentrasi larutan magnesium sulfat sebesar 5%.
6. Penggunaan semen dengan kondisi baik. Semen dengan kondisi lembab maupun menggumpal dapat menyebabkan penurunan kekuatan pada beton, sehingga penurunan kekuatan pada beton akibat serangan sulfat tidak dapat terkuantifikasi dengan jelas.

7. Permodelan perlakuan rendam-angkat pada benda uji sesuai dengan fluktuasi pasang-surut yang terjadi di lapangan. Permodelan yang dilakukan meliputi suhu dan panjangnya durasi pasang-surut serta frekuensi terjadinya pasang-surut sesuai dengan data yang terjadi di lapangan.
8. Pencatatan dan pengendalian temperatur dan pH larutan magnesium sulfat yang digunakan sebagai media perendaman, mengingat temperatur dan pH larutan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi mode kerusakan beton akibat serangan sulfat.
9. Penggunaan standar yang tepat untuk menentukan apakah benda uji mampu menahan serangan sulfat.
10. Pembuatan ulang benda uji dengan data sifat mekanis yang tidak sesuai dengan sifatnya secara teoritis akibat serangan sulfat.
11. Konsistensi dalam pembuatan benda uji, seperti kadar *superplasticizer* dan faktor air semen yang konstan untuk setiap benda uji.

## DAFTAR REFERENSI

- Annual Book of ASTM Standards Vol 04.02*. Amerika Serikat, 2003.
- Batty, Javed I., dan Peter C. Taylor. "Sulfate Resistance of Concrete Using Blended Cements or Supplementary Cementitious Materials". Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2916a.
- Dulaijan, S.U., et al. "Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfate". *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) 429-437.
- Irrasar, E.F., et al. "Sulphate Resistance of Type V Cements with Limestone Filler and Natural Pozzolana". *Cement & Concrete Composites* 22 (2000) 361-368.
- Kurtis, Kimberly. Presentasi "Portland Cement Hydration". School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- Lee, Seung-Tae. "Performance Deterioration of Portland Cement Matrix Due to Magnesium Sulfate Attack". *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3 / May 2007, p.157-163.
- Neville, A.M., and J.J. Brooks. *Concrete Technology*. Essex: Longman Scientific and Technical, 1994.
- Neville, A.M. *Properties of Concrete*. Essex: Addison Wesley Longman Limited, 1995.
- Nugraha, Paul, and Antoni. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Penerbit Andi, 2009.
- Okamura, Hajime, dan Masahiro Ouchi. "Self-Compacting Concrete". *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1:1 (2003).
- Pedoman Praktikum Pemeriksaan Bahan Beton dan Mutu Beton*. Laboratorium Bahan Jurusan Sipil FTUI. Depok.
- Raju, N. Krishna. *Design of Concrete Mixes*. Delhi: CBS Publishers & Distributors, 1983.
- Sulphate Attack and Chloride Ion Penetration: Their Role in Concrete Durability*. QCL Group Technical Note, 1999.

- Sekhar, T. Seshadri, dan P. Srinivasa Rao. "Relationship Between Compressive, Split Tensile, Flexural Strength of Self Compacted Concrete", *International Journal of Mechanics and Solids*, Vol. 3, No. 2 / 2008, p.157-168.
- Septiandini, Erma. "Studi Banding Pengaruh Jenis Mikrosilika sebagai Bahan Campuran pada Beton Mutu Tinggi terhadap Kekuatan Beton Melawan Serangan Sulfat". Tesis. Universitas Indonesia: Depok, 2001.
- Shetty, M.S. *Concrete Technology*. New Delhi: S. Chand and Company Ltd, 2005.
- Skalny, J., et al. *Sulfate Attack on Concrete*. London: Spon Press, 2002.
- Soroka, I. *Concrete in Hot Environment*. London: E & FN Spon, 1993.
- Stark, David. "Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils." Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD097, Skokie, Illinois, 1989.
- The European Guideline for Self-Compacting Concrete*. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), 2002.
- Yunita, Nourma. "Rancang Campur High Strength Self Compacting Concrete (HSSCC) dengan Menggunakan ADVA Superplasticizer". Skripsi. Universitas Indonesia: Depok, 2008.

## Lampiran A-1: Data Pengujian Agregat Halus



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
**Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik**  
**Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok**  
**Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)**

### TEST FOR UNIT WEIGHT IN FINE AGGREGATE (ASTM C – 29)

Sample : Agregat Halus  
 Size : 0,074 – 4,75 mm  
 Source : Cimangkok

		Metode		
		Berat Isi Lepas	Penggoyangan	Penusukan
a) Weight of Measure	(gr)	1041	1041	1041
b) Weight of Measure + Water	(gr)	3055	3055	3055
c) Weight of Measure + Sample	(gr)	3793	4008	4093
d) Weight of Sample	(gr)	2752	2967	3052
e) Volume of Measure	(dm <sup>3</sup> )	2,014		
f) Unit Weight of Aggregate	(gr/dm <sup>3</sup> )	1366,43	1473,19	1515,39
B) Bulk Specific Gravity of Aggregate	(gr/dm <sup>3</sup> )	2.48	2.48	2.48
W) Unit Weight of Water	(gr/dm <sup>3</sup> )	1000	1000	1000
Void	(%)	44,902	40,6	38.9

Perhitungan:

$$d = c - a$$

$$e = b - a$$

$$f = \frac{d}{e}$$

$$\text{void (\%)} = \frac{(B \times W) - f}{(B \times W)} \times 100\%$$

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
 Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
 Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok  
 Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**TEST FOR SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION – TEST OF  
 FINE AGGREGATE  
 (ASTM C – 128)**

Sample : Agregat Halus  
 Size : 0,074 – 4,75 mm  
 Source : Cimangkok

		Sample	
		A	B
A) Weight of Oven-Dry Specimen in Air	(gram)	496	493
B) Weight of Pycnometer Filled with Water	(gram)	676	649
C) Weight of Pycnometer with Specimen and Water to Calibration Mark	(gram)	976	951
Bulk Specific Gravity	$\frac{A}{B + 500 - C}$	2.48	2.49
Average of Above		2.48	
SSD Specific Gravity	$\frac{500}{B + 500 - C}$	2.50	2.53
Average of Above		2.513	
Apparent Specific Gravity	$\frac{A}{B + A - C}$	2.53	2.58
Average of Above		2.56	
Absorption (%)	$\frac{500 - A}{A} \times 100 \%$	0.806	1.42
Average of Above		1.11	

Depok,  
 Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

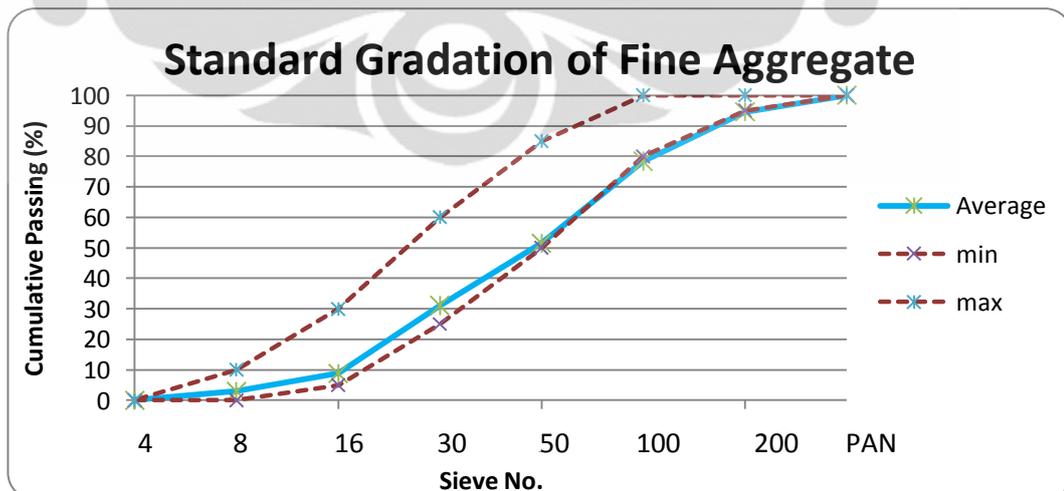


**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
 Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
 Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok  
 Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE**  
 (ASTM C – 136)

Sample : Agregat Halus  
 Size : 0,074 – 4,75 mm  
 Source : Cimangkok

Sieve No.	Sample 1				Sample 2				Average	
	Weight Retained (gr)	% Ret.	% Cum. Ret.	% Cum. Pass.	Weight Retained (gr)	% Ret.	% Cum. Ret.	% Cum. Pass.	% Cum. Ret.	% Cum. Pass.
4	0	0	0	100	0	0	0	100	0	100
8	28	5.6	5.6	94.4	26	5.2	5.2	94.8	5.4	94.6
16	85	17	22.6	77.4	77	15.4	20.6	79.4	21.6	78.4
30	136	27.2	49.8	50.2	133	26.6	47.2	52.8	48.5	51.5
50	102	20.4	70.2	29.8	102	20.4	67.6	32.4	68.9	31.1
100	109	21.8	92	8	114	22.8	90.4	9.6	91.2	8.8
200	25	5	97	3	33	6.6	97	3	97	3
PAN	15	3	100	0	15	3	100	0	100	0
<b>TOTAL</b>	<b>500</b>	<b>100</b>			<b>500</b>	<b>100</b>				
FM	2,356									



Depok,  
 Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok  
Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**TEST FOR MATERIALS FINER THAN NO.200 SIEVE  
IN MINERAL AGGREGATE BY WASHING  
(ASTM C – 177)**

Sample : Agregat Halus  
Size : 0,074 – 4,75 mm  
Source : Cimangkok

B) Original dry weight of sample	500 gr
C) Dry weight of sample after washing	487 gr
A) Percentage of material finer than No.200 Sieve	2.67%

Perhitungan:

$$A = \frac{B - C}{B} \times 100\%$$

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok  
Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**TEST FOR ORGANIC IMPURITIES IN FINE AGGREGATE**  
**(ASTM C – 40)**

Sample : Agregat Halus  
Size : 0,074 – 4,75 mm  
Source : Cimangkok

Nearest Colour of the liquid of the test sample	Organic plate Number
Lighter/Equal/Darker Colour to	1
	2
	3 (standard)
	4
	5

Determination of Colour Value

Lighter/Equal/Darker Colour to that the reference standard (No. 3)

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

## Lampiran A-2: Data Pengujian Agregat Kasar



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
**Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik**  
**Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok**  
**Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)**

### TEST FOR UNIT WEIGHT IN COARSE AGGREGATE (ASTM C – 29)

Sample : Agregat Kasar  
Size : min. 4,75 mm  
Source : Loji

	Metode		
	Lepas	Penggoyangan	Penumbukan
a) Weight of Measure (kg)	5.089	5.089	5.089
b) Weight of Measure + Water (kg)	14.361	14.361	14.361
c) Weight of Measure + Sample (kg)	17.745	18.541	18.416
d) Weight of Sample (kg)	12.656	13.452	13.327
e) Volume of Measure (liter)	9.272	9.272	9.272
f) Unit Weight of Aggregate (kg/liter)	1.365	1.451	1.437
B) Bulk Spesific Gravity of Aggregate (kg/liter)	2.82	2.82	2.82
W) Unit Weight of Water (kg/liter)	1	1	1
Void %	51.60	48.55	49.03

Perhitungan:

$$d = c - a$$

$$e = b - a$$

$$f = \frac{d}{e}$$

$$\text{void (\%)} = \frac{(B \times W) - f}{(B \times W)} \times 100\%$$

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
 Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
 Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok  
 Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**TEST FOR SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION – TEST OF  
 COARSE AGGREGATE  
 (ASTM C – 128)**

Sample : Agregat Kasar  
 Size : min. 4,75 mm  
 Source : Loji

A) Weight of Oven-Dry Specimen in Air	(gram)	4832
B) Weight SSD Specimen in Air	(gram)	5000
C) Weight of Saturated Specimen in Water	(gram)	3289
Bulk Specific Gravity		2.82
SSD Specific Gravity		2.92
Apparent Specific Gravity		3.13
Absorption (%)		3.48

Perhitungan:

$$\text{Berat jenis curah (Bulk Specific Gravity)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Berat Jenis Semu (Apparent Specific Gravity)} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Penyerapan (Absorpsi)} = \frac{B - A}{A} \times 100\%$$

Depok,  
 Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

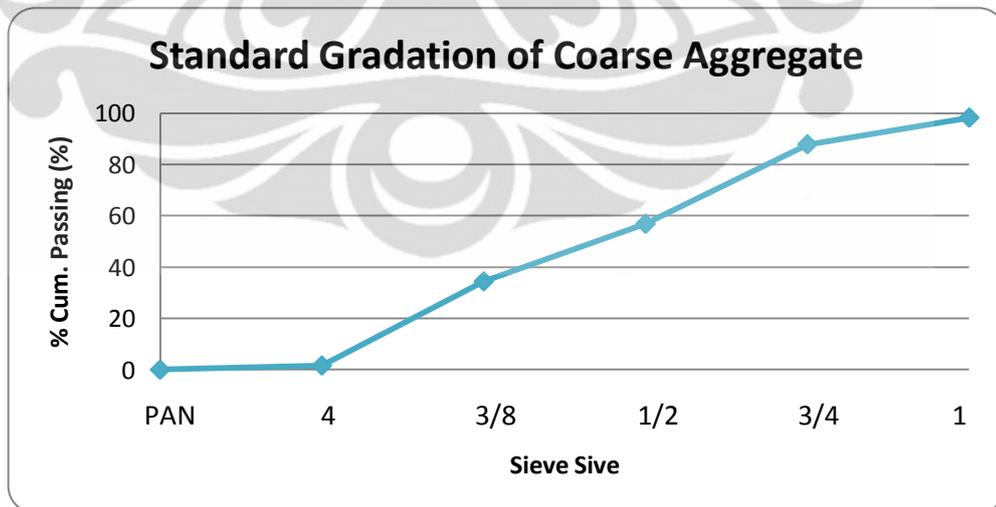


**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
 Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
 Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok  
 Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**SIEVE ANALYSIS OF COARSE AGGREGATE**  
 (ASTM C – 136)

Sample : Agregat Kasar  
 Size : min. 4,75 mm  
 Source : Loji

Sieve Size	Weight Retained (gr)	% Retained	% Cumulative Retained	% Cumulative Passing
1	27	1.8	1.8	98.2
3/4	156	10.4	12.2	87.8
1/2	465	31	43.2	56.8
3/8	336	22.4	65.6	34.4
4	492	32.8	98.4	1.6
PAN	24	1.6	100	0
<b>TOTAL</b>	<b>1500</b>	<b>100</b>		



Depok,  
 Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

## Lampiran B: Perhitungan Rancang Campur Beton

Perhitungan rancang campur berdasarkan American Concrete Institute (ACI) 211.1-91. Nilai parameter desain yang digunakan dalam perhitungan rancang campur adalah:

- Kuat tekan rencana ( $f_c'$ ) : 40 MPa
- *Water-cement ratio* : 0,45
- *Slump Flow* : 650 ± 50 mm,  
dengan *slump* rencana 100 mm
- *Maximum size of aggregate* : 20 mm
- Agregat Halus  
*Specific Gravity* : 2,51 kg/dm<sup>3</sup>  
*Fineness Modulus* : 2,36
- Agregat Kasar  
*Specific Gravity* : 2,92 kg/dm<sup>3</sup>  
Berat Isi : 1437 kg/m<sup>3</sup>
- Semen  
*Specific Gravity* : 3,15 kg/dm<sup>3</sup>

## Lampiran B (lanjutan)

Tahap-tahap perhitungan rancang campur sesuai dengan ACI 211.1-91:

- Perhitungan berat air yang digunakan dalam campuran serta estimasi rongga udara yang terjadi berdasarkan tabel berikut:

Slump (mm)	Mixing Water Quantity (kg/m <sup>3</sup> ) for the listed Nominal Maximum Aggregate Size (mm)							
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	100
<b>Non-Air-Entrained PCC</b>								
30 – 50	205	200	185	180	160	155	145	125
80 - 100	225	215	200	195	175	170	160	140
150 - 180	240	230	210	205	185	180	170	-
Typical entrapped air (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
<b>Air-Entrained PCC</b>								
30 – 50	180	175	165	160	145	140	135	120
80 - 100	200	190	180	175	160	155	150	135
150 - 180	215	205	190	185	170	165	160	-
<b>Recommended Air Content (percent)</b>								
Mild Exposure	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Moderate Exposure	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
Severe Exposure	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

Berdasarkan tabel di atas, dengan *slump* 100 mm dan *maximum size of aggregate* sebesar 20 mm, didapatkan:

Jumlah air campuran : 199,2 kg/m<sup>3</sup>

Rongga udara : 1,92%

- Perhitungan jumlah semen yang dibutuhkan

$$\begin{aligned}
 \text{Berat semen} &= \frac{\text{Berat air}}{w/c \text{ Ratio}} \\
 &= \frac{199,2 \text{ kg/m}^3}{0,45} = 442,67 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

## Lampiran B (lanjutan)

### 3. Perhitungan jumlah agregat kasar

Perhitungan jumlah agregat kasar berdasarkan *fineness modulus* sebesar 2,36 dan *maximum size of aggregate* sebesar 20 mm.

Nominal Maximum Aggregate Size (mm)	Fineness Modulus of Fine Aggregate			
	2,4	2,6	2,8	3
10	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,6
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
70	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan rasio volume agregat kasar per unit volume campuran sebesar 0,664. Dengan berat agregat kasar per unit volume campuran beton sebesar:  $0,664 \times 1437 = 954,17 \text{ kg/m}^3$ .

### 4. Perhitungan jumlah agregat halus

$$V_{beton} = V_{air} + V_{udara} + V_{CA} + V_{semen} + V_{FA}$$

$$\frac{m_{beton}}{\rho_{beton}} = \frac{m_{air}}{\rho_{air}} + \text{persentase udara} + \frac{m_{CA}}{SG_{CA}} + \frac{m_{semen}}{SG_{semen}} + V_{FA}$$

$$1 = \frac{199,2}{1000} + \frac{1,92}{100} + \frac{954,17}{2920} + \frac{442,67}{3150} + V_{FA}$$

$$V_{FA} = 0,314$$

Dengan berat agregat halus per unit volume campuran beton sebesar:

$$m_{FA} = V_{FA} \times SG_{FA}$$

$$= 0,314 \times 2510 \text{ kg/m}^3$$

$$= 788,9 \text{ kg/m}^3$$

5. Perhitungan jumlah *superplasticizer*

Kadar *superplasticizer* yang digunakan pada penelitian ini adalah 1,1% dari berat semen:

$$\begin{aligned}m_{SP} &= \frac{1,1}{100} \times m_{\text{semen}} \\ &= 0,011 \times 442,67 \text{ kg/m}^3 \\ &= 4,87 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Dengan volume *superplasticizer* per m<sup>3</sup> campuran sebesar:

$$\begin{aligned}V_{SP} &= \frac{m_{SP}}{SG_{SP}} \\ &= \frac{4,87 \text{ kg}}{1,06 \text{ kg/dm}^3} \\ &= 4,6 \text{ liter}\end{aligned}$$

6. Penyesuaian jumlah air akibat penambahan *superplasticizer*

$$\begin{aligned}m_{\text{air}} &= m_{\text{total}} - m_{SP} \\ &= (199,2 - 4,87) \text{ kg/m}^3 \\ &= 194,33 \text{ kg/m}^3 = 194,33 \text{ liter/m}^3\end{aligned}$$

7. Berdasarkan hasil perhitungan di atas, komposisi material per m<sup>3</sup> campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Semen : 442,67 kg
- Air : 194,33 liter
- Agregat kasar : 954,17 kg
- Agregat halus : 788,9 kg
- *Superplasticizer* : 4,6 liter

### Lampiran C: Catatan Pengecoran

Tanggal Cor	Umur	Sesi	Kondisi	Suhu	Kelembaban	Air (ml)		Kondisi Material			Slump Flow	Benda Uji												Ket.				
						+	-	Ag. Halus	Ag. Kasar	Semen		Tekan				Tarik				Lentur					Permeabilitas			
												AS	AL	PS	LS	AS	AL	PS	LS	AS	AL	PS	LS		AS	AL	PS	LS
01-03-11	56	I	bleeding				800			setengah basah					2				2								SP 1%	
		II	bleeding				800			setengah basah			1		2				1	1								
		III	bleeding				300			setengah basah			1	1	1				2									
		IV	bleeding							kering		5	2			4												
03-03-11	56	I	bleeding							kering	600-700							2			2					SP 1,05%		
		II	bleeding							kering				1			2			1	1							
		III	OK				50			kering	500-600				1		1	1			2							
		IV	bleeding							kering				3	5			3										
05-03-11	56/42	I							kering	600	2 (42)						1	1 (42)				3			SP 1,1%			
18-03-11	42	I		27.7	76		1000			dibasahi	630	1			4			2										
		II		27.7	75					dibasahi	580								2									
21-03-11	42	I	segregasi	28	74		1000			dibasahi	agak menggumpal; lolos saringan 100	670							1	1			3					
05-04-11	42	I	segregasi	32.1	52					dibasahi	Not OK	610		5	4		1	1			2							
		II		30.7	55					dibasahi	Not OK	620					2				2							
		III		30.5	56		800			dibasahi	Not OK	630	2				2	2				1						



Lampiran D-1: Hasil Uji Kuat Tekan



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**

Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok, Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**HASIL UJI KUAT TEKAN BETON**

No.	Kode	Umur	Tanggal Tes	Tanggal Cor	Berat (gr)	Pmax (kg)	Luas Bid. Tekan	Kuat Tekan (Mpa)	Rata-Rata (MPa)	Faktor Konversi	fc' converted	Rata-rata conv.	St. Deviasi	% Error	Rata-rata Baru	St. Deviasi	
1	SP5-T-28	28	05-05-11	07-04-11	3795	35420	78.571	45.080	43.833	0.959	43.244	42.047	2.068	4.783	42.047	2.068	
2	SP5-T-28				3792	31990	78.571	40.715			39.056			5.296			
3	SP5-T-28				3820	35880	78.571	45.665			43.805			4.721			
4	SP5-T-28				3815	33350	78.571	42.445			40.716			5.080			
5	SP5-T-28				3856	35560	78.571	45.258			43.415			4.764			
6	SP5-T-28	28	05-05-11	07-04-11	12611	84500	176.786	47.798	42.047				4.998	10.457	42.047	4.998	
7	SP5-T-28				12658	68500	176.786	38.747									12.900
8	SP5-T-28				12511	70000	176.786	39.596									12.624

Lampiran D-1 (lanjutan)

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	Berat (gr)	P <sub>max</sub> (kg)	Luas Bid. Tekan	Kuat Tekan conv'd (Mpa)	Rata-Rata	St. Deviasi	% Error	Rata-rata Baru	St. Deviasi
1	SP5-T-56-AS	56	Air Suling	26-04-11	01-03-11	3811	25530	78.571	31.17	40.20	5.43	17.41	42.46	2.30
2	SP5-T-56-AS			26-04-11	01-03-11	3829	36920	78.571	45.07			12.04		
3	SP5-T-56-AS			26-04-11	01-03-11	3867	34140	78.571	41.68			13.02		
4	SP5-T-56-AS			26-04-11	01-03-11	3961	32530	78.571	39.72			13.67		
5	SP5-T-56-AS			26-04-11	01-03-11	3849	35530	78.571	43.38			12.51		
6	SP5-T-56-AL	56	Air Laut	26-04-11	01-03-11	3801	36240	78.571	44.24	45.53	2.81	6.36	45.53	2.81
7	SP5-T-56-AL			26-04-11	01-03-11	3846	37210	78.571	45.43			6.20		
8	SP5-T-56-AL			26-04-11	01-03-11	3886	35920	78.571	43.85			6.42		
9	SP5-T-56-AL			26-04-11	01-03-11	3861	35810	78.571	43.72			6.44		
10	SP5-T-56-AL			28-04-11	03-03-11	3877	41300	78.571	50.42			5.58		
11	SP5-T-56-LS	56	Larutan Sulfat	28-04-11	03-03-11	3861	45000	78.571	54.94	49.45	6.62	12.04	53.92	1.76
12	SP5-T-56-LS			28-04-11	03-03-11	3839	37500	78.571	45.78			14.45		
13	SP5-T-56-LS			28-04-11	03-03-11	3829	45000	78.571	54.94			12.04		
14	SP5-T-56-LS			28-04-11	03-03-11	3966	42500	78.571	51.89			12.75		
15	SP5-T-56-LS			28-04-11	03-03-11	3871	32500	78.571	39.68			16.68		
16	SP5-T-56-PS	56	Rendam-Angkat	28-04-11	03-03-11	3880	46750	78.571	57.08	58.24	3.63	6.35	58.24	3.63
17	SP5-T-56-PS			28-04-11	03-03-11	3892	43750	78.571	53.41			6.79		
18	SP5-T-56-PS			28-04-11	03-03-11	3842	50000	78.571	61.04			5.94		
19	SP5-T-56-PS			28-04-11	03-03-11	3810	46750	78.571	57.08			6.35		
20	SP5-T-56-PS			28-04-11	03-03-11	3783	51250	78.571	62.57			5.80		

Lampiran D-1 (lanjutan)

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	Berat (gr)	P <sub>max</sub> (kg)	Luas Bid. Tekan	Kuat Tekan conv'd (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	% Error	Rata-rata Baru	Std. Deviasi	% Error
21	SP5-T-42-AS	42	Air Suling	16-04-11	05-03-11	3868	42830	78.571	52.290	43.632	7.476	14.297	48.135	4.621	8.838
22	SP5-T-42-AS			16-04-11	05-03-11	3860	40100	78.571	48.957			15.270			9.439
23	SP5-T-42-AS			29-04-11	18-03-11	3761	35350	78.571	43.158			17.322			10.708
24	SP5-T-42-AS			18-05-11	05-04-11	3818	33310	78.571	40.668			18.383			
25	SP5-T-42-AS			18-05-11	05-04-11	3791	27100	78.571	33.086			22.596			
26	SP5-T-42-AL	42	Air Laut	18-05-11	05-04-11	3855	36600	78.571	44.684	42.697	6.618	14.812	45.974	0.358	0.801
27	SP5-T-42-AL			18-05-11	05-04-11	3800	38060	78.571	46.467			14.243			0.770
28	SP5-T-42-AL			18-05-11	05-04-11	3942	0	-	0.000			0.000			
29	SP5-T-42-AL			18-05-11	05-04-11	3870	26920	78.571	32.866			20.138			
30	SP5-T-42-AL			18-05-11	05-04-11	3823	38310	78.571	46.772			14.150			0.765
31	SP5-T-42-LS	42	Larutan Sulfat	19-05-11	07-04-11	3831	23440	78.571	28.617	37.435	6.153	21.501	41.042	3.914	
32	SP5-T-42-LS			19-05-11	07-04-11	3786	29020	78.571	35.430			17.367			
33	SP5-T-42-LS			19-05-11	07-04-11	3962	31020	78.571	37.872			16.247			10.335
34	SP5-T-42-LS			19-05-11	07-04-11	3778	37200	78.571	45.417			13.548			8.618
35	SP5-T-42-LS			19-05-11	07-04-11	3818	32630	78.571	39.837			15.445			9.825

**Lampiran D-1 (Lanjutan)**

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	Berat (gr)	P <sub>max</sub> (kg)	Luas Bid. Tekan	Kuat Tekan conv'd (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	% Error	Rata-rata Baru	Std. Deviasi	% Error
36	SP5-T-42-PS	42	Rendam-Angkat	18-05-11	05-04-11	3819	35310	78.571	43.109	39.840	3.013	6.989	39.840	3.013	6.989
37	SP5-T-42-PS			18-05-11	05-04-11	3815	29200	78.571	35.650			8.452			8.452
38	SP5-T-42-PS			18-05-11	05-04-11	3840	34380	78.571	41.974			7.178			7.178
39	SP5-T-42-PS			18-05-11	05-04-11	3802	33100	78.571	40.411			7.456			7.456
40	SP5-T-42-PS			18-05-11	05-04-11	3909	31170	78.571	38.055			7.918			7.918

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

Lampiran D-2: Hasil Uji Kuat Tarik Belah



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
 Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
 Universitas Indonesia  
 Kampus Baru UI Depok, Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**HASIL UJI KUAT TARIK BELAH BETON**

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	P <sub>max</sub> (kg)	P <sub>max</sub> (kN)	f <sub>t</sub> (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	%Error	Rata-rata Baru	Std. Deviasi	%Error
1	SP5-TB-28	28		05-05-11	07-04-11	35000	343.350	4.855	4.758	0.449	9.250			
2	SP5-TB-28			05-05-11	07-04-11	29000	284.490	4.023			11.164			
3	SP5-TB-28			05-05-11	07-04-11	35500	348.255	4.925			9.120			
4	SP5-TB-28			05-05-11	07-04-11	34250	335.993	4.751			9.452			
5	SP5-TB-28			05-05-11	07-04-11	37750	370.328	5.237			8.576			
6	SP5-TB-42-AS	42	Air Suling	29-04-11	18-03-11	31250	306.563	4.335	4.273	0.505	11.640			
7	SP5-TB-42-AS			29-04-11	18-03-11	27500	269.775	3.815			13.227			
8	SP5-TB-42-AS			29-04-11	18-03-11	32500	318.825	4.509			11.192			
9	SP5-TB-42-AS			29-04-11	18-03-11	27000	264.870	3.746			13.472			
10	SP5-TB-42-AS			18-05-11	05-04-11	35750	350.708	4.960			10.175			

Lampiran D-2 (lanjutan)

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	P <sub>max</sub> (kg)	P <sub>max</sub> (kN)	f <sub>t</sub> (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	%Error	Rata-rata Baru	Std. Deviasi	%Error
11	SP5-TB-42-AL	42	Air Laut	18-05-11	05-04-11	38750	380.138	5.376	5.029	0.513	9.537			
12	SP5-TB-42-AL			18-05-11	05-04-11	34750	340.898	4.821			10.634			
13	SP5-TB-42-AL			18-05-11	05-04-11	41250	404.663	5.723			8.959			
14	SP5-TB-42-AL			18-05-11	05-04-11	34500	338.445	4.786			10.711			
15	SP5-TB-42-AL			18-05-11	05-04-11	32000	313.920	4.439			11.548			
16	SP5-TB-42-LS	42	Larutan Sulfat	19-05-11	07-04-11	35000	343.350	4.855	5.133	0.348	7.161			
17	SP5-TB-42-LS			19-05-11	07-04-11	37000	362.970	5.133			6.774			
18	SP5-TB-42-LS			19-05-11	07-04-11	34750	340.898	4.821			7.212			
19	SP5-TB-42-LS			19-05-11	07-04-11	41000	402.210	5.688			6.113			
20	SP5-TB-42-LS			19-05-11	07-04-11	37250	365.423	5.168			6.728			
21	SP5-TB-42-PS	42	Rendam-Angkat	18-05-11	05-04-11	33000	323.730	4.578	4.668	0.932	20.360	5.225	0.131	
22	SP5-TB-42-PS			18-05-11	05-04-11	22250	218.273	3.087			30.197			
23	SP5-TB-42-PS			18-05-11	05-04-11	38750	380.138	5.376			17.339			2.443
24	SP5-TB-42-PS			18-05-11	05-04-11	37250	365.423	5.168			18.037			2.541
25	SP5-TB-42-PS			19-05-11	07-04-11	37000	362.970	5.133			18.159			2.558
26	SP5-TB-56-AS	56	Air Suling	26-04-11	01-03-11	31250	306.563	4.335	4.523	0.373	8.609			
27	SP5-TB-56-AS			26-04-11	01-03-11	31250	306.563	4.335			8.609			
28	SP5-TB-56-AS			26-04-11	01-03-11	36750	360.518	5.098			7.320			
29	SP5-TB-56-AS			26-04-11	01-03-11	30000	294.300	4.162			8.968			
30	SP5-TB-56-AS			26-04-11	01-03-11	33750	331.088	4.682			7.971			

Lampiran D-2 (lanjutan)

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	P <sub>max</sub> (kg)	P <sub>max</sub> (kN)	f <sub>t</sub> (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	%Error	Rata-rata Baru	Std. Deviasi	%Error
31	SP5-TB-56-AL	56	Air Laut	26-04-11	01-03-11	35000	343.350	4.855	4.370	0.395	8.144			
32	SP5-TB-56-AL			26-04-11	01-03-11	30000	294.300	4.162			9.501			
33	SP5-TB-56-AL			26-04-11	01-03-11	32500	318.825	4.509			8.771			
34	SP5-TB-56-AL			26-04-11	01-03-11	27500	269.775	3.815			10.365			
35	SP5-TB-56-AL			26-04-11	01-03-11	32500	318.825	4.509			8.771			
36	SP5-TB-56-LS	56	Larutan Sulfat	28-04-11	03-03-11	43750	429.188	6.069	5.625	0.332	5.472			
37	SP5-TB-56-LS			28-04-11	03-03-11	41250	404.663	5.723			5.804			
38	SP5-TB-56-LS			28-04-11	03-03-11	37500	367.875	5.202			6.384			
39	SP5-TB-56-LS			28-04-11	03-03-11	41250	404.663	5.723			5.804			
40	SP5-TB-56-LS			02-05-11	05-03-11	39000	382.590	5.410			6.138			
41	SP5-TB-56-PS	56	Rendam-Angkat	28-04-11	03-03-11	41250	404.663	5.723	4.890	0.687	12.007	5.318	0.436	7.626
42	SP5-TB-56-PS			28-04-11	03-03-11	35000	343.350	4.855			14.151			8.988
43	SP5-TB-56-PS			28-04-11	03-03-11	38750	380.138	5.376			12.782			8.118
44	SP5-TB-56-PS			28-04-11	03-03-11	32500	318.825	4.509			15.240			
45	SP5-TB-56-PS			28-04-11	03-03-11	28750	282.038	3.988			17.227			

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

Lampiran D-3: Hasil Uji Kuat Tarik Lentur



**LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL**  
 Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik  
 Universitas Indonesia  
 Kampus Baru UI Depok, Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

**HASIL UJI KUAT TARIK LENTUR BETON**

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	$P_{max}$ (kN)	$P_{max}$ calibrated (kN)	$f_r$ (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	% Error
1	SP5-TL-28	28		05-05-11	07-04-11	37	41	5.467	6.089	0.555	10.154
2	SP5-TL-28			05-05-11	07-04-11	43	47	6.267			8.858
3	SP5-TL-28			05-05-11	07-04-11	45	49	6.533			8.497
4	SP5-TL-42-AS	42	Air Suling	16-04-11	05-03-11	40	44	5.867	5.733	0.481	8.194
5	SP5-TL-42-AS			29-04-11	18-03-11	35	39	5.200			9.245
6	SP5-TL-42-AS			29-04-11	18-03-11	42	46	6.133			7.838
7	SP5-TL-42-AL	42	Air Laut	29-04-11	18-03-11	41	45	6.000	6.444	0.385	6.415
8	SP5-TL-42-AL			29-04-11	18-03-11	46	50	6.667			5.774
9	SP5-TL-42-AL			02-05-11	21-03-11	46	50	6.667			5.774
10	SP5-TL-42-LS	42	Larutan Sulfat	02-05-11	21-03-11	45	49	6.533	6.578	0.077	1.178
11	SP5-TL-42-LS			18-05-11	05-04-11	46	50	6.667			1.155
12	SP5-TL-42-LS			18-05-11	05-04-11	45	49	6.533			1.178

Lampiran D-3 (lanjutan)

No.	Kode	Umur	Variasi Perendaman	Tanggal Tes	Tanggal Cor	$P_{max}$ (kN)	$P_{max}$ calibrated (kN)	$f_r$ (Mpa)	Rata-Rata	Std. Deviasi	%Error
13	SP5-TL-42-PS	42	Rendam-Angkat	18-05-11	05-04-11	42	46	6.133	5.822	0.336	5.471
14	SP5-TL-42-PS			18-05-11	05-04-11	40	44	5.867			5.720
15	SP5-TL-42-PS			18-05-11	05-04-11	37	41	5.467			6.138
16	SP5-TL-56-AS	56	Air Suling	26-04-11	01-03-11	56	60	8.000	7.956	0.204	2.546
17	SP5-TL-56-AS			26-04-11	01-03-11	57	61	8.133			2.504
18	SP5-TL-56-AS			26-04-11	01-03-11	54	58	7.733			2.634
19	SP5-TL-56-AL	56	Air Laut	26-04-11	01-03-11	54	58	7.733	7.822	0.077	0.995
20	SP5-TL-56-AL			26-04-11	01-03-11	55	59	7.867			0.979
21	SP5-TL-56-AL			26-04-11	01-03-11	55	59	7.867			0.979
22	SP5-TL-56-LS	56	Larutan Sulfat	28-04-11	03-03-11	50	54	7.200	6.667	0.481	6.677
23	SP5-TL-56-LS			28-04-11	03-03-11	45	49	6.533			7.358
24	SP5-TL-56-LS			28-04-11	03-03-11	43	47	6.267			7.671
25	SP5-TL-56-PS	56	Rendam-Angkat	28-04-11	03-03-11	37	41	5.467	5.289	0.429	7.840
26	SP5-TL-56-PS			28-04-11	03-03-11	38	42	5.600			7.654
27	SP5-TL-56-PS			28-04-11	03-03-11	32	36	4.800			8.929

Depok,  
Kepala Laboratorium

Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA.

## Lampiran E-1: Dokumentasi Pengujian Material



*Foto 1.* Hasil Pengujian Kandungan Organik dalam Agregat Halus



*Foto 2.* Pengujian Bahan Lewat Saringan No.200 pada Agregat Halus



*Foto 3.* Pengujian Sieve Analysis

## Lampiran E-2: Dokumentasi Pembuatan Benda Uji



*Foto 1. Pencampuran Material Menggunakan Mixer*



*Foto 2. Pengujian Slump Flow*

**Lampiran E-2 (lanjutan)**



*Foto 3. Pengukuran Slump Flow*

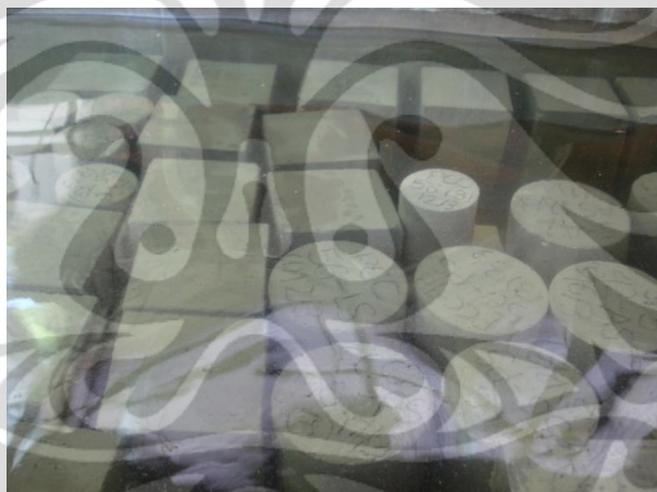


*Foto 4. Benda Uji dalam Mold*

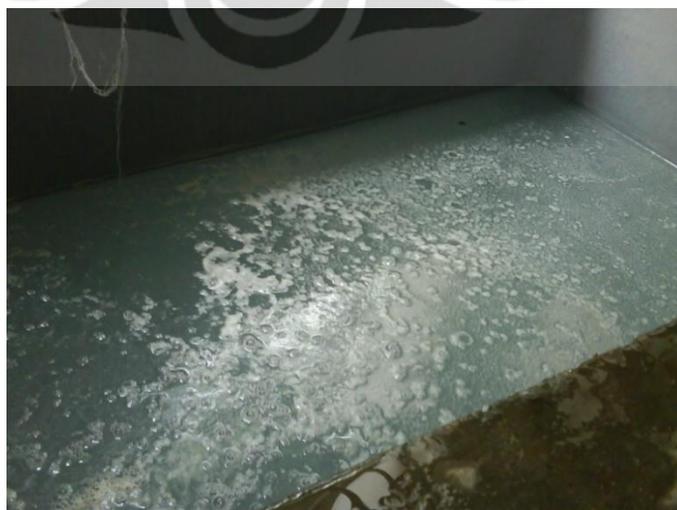
### Lampiran E-3: Dokumentasi Variasi Perendaman Benda Uji



*Foto 1. Proses Pengambilan Air Laut*



*Foto 2. Curing Benda Uji pada Air Suling*



*Foto 3. Pembuatan Larutan Magnesium Sulfat*

**Lampiran E-3 (lanjutan)**



*Foto 4. Proses Rendam-Angkat pada Benda Uji*



*Foto 5. Perendaman Benda Uji pada Air Laut*

## Lampiran E-4: Dokumentasi Pengujian Benda Uji



*Foto 1. Benda Uji Kuat Tekan yang Telah Di-capping*



*Foto 2. Alat Uji Kuat Tekan*

**Lampiran E-4 (lanjutan)**



*Foto 3. Pengujian Kuat Tekan*



*Foto 4. Mode Kehancuran Tipe C pada Benda Uji*

**Lampiran E-4 (lanjutan)**



*Foto 5. Alat Uji Kuat Tarik Belah dan Alat Splitting Benda Uji Permeabilitas*

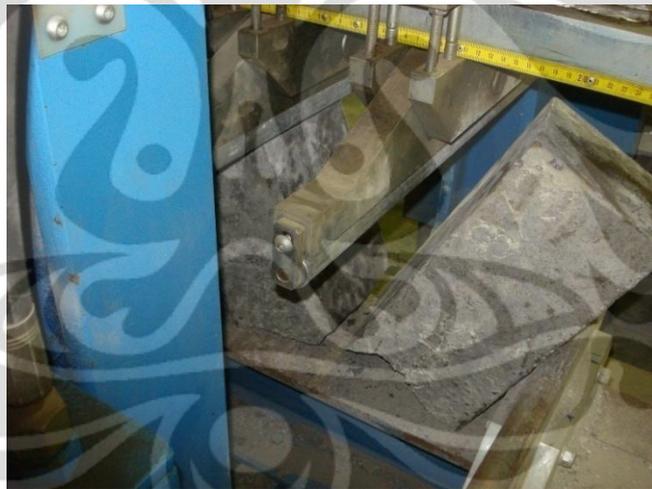


*Foto 6. Pengujian Kuat Tarik Belah*

**Lampiran E-4 (lanjutan)**



*Foto 7. Hasil Uji Tarik Belah*



*Foto 8. Pengujian Kuat Tarik Lentur*



*Foto 9. Keruntuhan di Tengah Bentang pada Benda Uji Lentur*

**Lampiran E-4 (lanjutan)**



*Foto 10. Pengujian Permeabilitas*



*Foto 11. Splitting Benda Uji Permeabilitas*



*Foto 12. Pengukuran Penetrasi Air pada Benda Uji Permeabilitas*

## Lampiran F: Hasil Analisis Fisika dan Kimia Air Laut

Setelah Pengambilan Air Laut



UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK - DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
**LABORATORIUM TEKNIK PENYEHATAN & LINGKUNGAN**  
Kampus Baru UI Telp : (021) 7875031, 7270029 Fax. (021) 7270028 Depok 16424 Indonesia

### HASIL ANALISA KIMIA DAN FISIKA

Nomor Laboratorium : PM. 01.04/19/I/2011  
Nama Pengirim / Instansi : David Silitonga  
Nama Contoh / Kedalaman : Air Laut  
Kode Sampel : 19  
Lokasi Pengambilan Sampel : Pantai Ancol, Jakarta  
Tanggal Penerimaan Sampel : 07 Februari 2011

NO	PARAMETER	SATUAN	HASIL ANALISA			Rata-rata
			1	2	3	
1	pH		7.15	7.18	7.15	7.16
2	Klorida (Cl)	mg/L	11650	11650	11700	11666
3	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/L	1600	1800	1600	1666

**Catatan :**

- Pengambilan sample dilakukan oleh konsumen bukan merupakan tanggung jawab laboratorium

Depok, 08 Februari 2011  
Kepala Lab. Teknik Penyehatan dan Lingkungan

Ir. Irma Gusniani, MSc.  
NIP. 195501031985032001

Tembusan : Arsip

**Lampiran F (lanjutan)**

Sebelum Masa Perendaman



UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK - DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
**LABORATORIUM TEKNIK PENYEHATAN & LINGKUNGAN**  
Kampus Baru UI Telp : (021) 7875031, 7270029 Fax. (021) 7270028 Depok 16424 Indonesia

**HASIL ANALISA KIMIA DAN FISIKA**

Nomor Laboratorium : PM. 01.04/02/III/2011  
Nama Pengirim / Instansi : David Silitonga  
Nama Contoh / Kedalaman : Air Laut  
Kode Sampel : 22  
Lokasi Pengambilan Sampel : Pantai Ancol, Jakarta  
Tanggal Penerimaan Sampel : 22 Maret 2011

NO	PARAMETER	SATUAN	HASIL ANALISA
1	pH		6.99
2	Klorida (Cl)	mg/L	9200
3	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/L	2000

*Handwritten signature*

**Catatan :**

- Pengambilan sample dilakukan oleh konsumen bukan merupakan tanggung jawab laboratorium

Depok, 22 Maret 2011  
Kepala Lab. Teknik Penyehatan dan Lingkungan



Ir. Irma Gusmiani, MSc.  
NIP. 195501031985032001

Tembusan : Arsip

**Lampiran F (lanjutan)**

Setelah Masa Perendaman (2-3 bulan)



UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK - DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
**LABORATORIUM TEKNIK PENYEHATAN & LINGKUNGAN**  
Kampus Baru UI Telp : (021) 7875031, 7270029 Fax. (021) 7270028 Depok 16424 Indonesia

**HASIL ANALISA KIMIA DAN FISIKA**

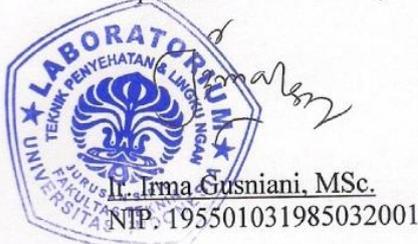
Nomor Laboratorium : PM. 01.04/02/VI/2011  
Nama Pengirim / Instansi : David Silitonga  
Nama Contoh / Kedalaman : Air Laut  
Kode Sampel : 32  
Lokasi Pengambilan Sampel : Pantai Ancol, Jakarta  
Tanggal Penerimaan Sampel : 09 Juni 2011

NO	PARAMETER	SATUAN	HASIL ANALISA
1	pH		7.66
2	Klorida (Cl)	mg/L	23.600
3	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/L	2000

**Catatan :**

- Pengambilan sample dilakukan oleh konsumen bukan merupakan tanggung jawab laboratorium

Depok, 17 Juni 2011  
Kepala Lab. Teknik Penyehatan dan Lingkungan



Tembusan : Arsip

## Lampiran G: Kandungan Kimia Semen Portland Tipe V

**Quality Assurance and Research Division Laboratory**

Jl. Mayor Oking Jayaatmaja, Citeureup,  
Bogor 16810, West Java - Indonesia  
Tel. (+62 21) 86899945 Fax. (+62 21) 87941416



### LABORATORY TEST REPORT

#### Cement test result

<b>Sample/Type</b> : Cement Type V	<b>Received date</b> :
<b>Sample Source</b> : Plant 5	<b>Supported to</b> :
<b>Quantity</b> :	

Kind of test	Testing Method	SNI 15-2049-2004 Specifications	Test Result
<b>Physical Properties :</b>			
1. Air content of mortar, volume, percent		12.0 max	
2. Fineness, specific surface, Air permeability test, m <sup>2</sup> /kg		280 min	431
3. Autoclave expansion, percent		0.80 max	0,04
4. Compressive strength, kg/cm <sup>2</sup>	SNI 15-2049-2004	80 min	190
3 days, kg/cm <sup>2</sup>		150 min	259
7 days, kg/cm <sup>2</sup>		210 min	371
28 days, kg/cm <sup>2</sup>			
5. Time of setting, Vicat test, minutes		45 min	230
Initial set, minutes		375 max	402
Final set, minutes		0.040 max	0.03
6. Sulfate Expansion, 14 days, percent			
<b>Chemical Composition :</b>			
1. Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> ), percent	XRF	-	20,93
2. Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), percent	XRF	-	3,87
3. Ferric Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), percent	XRF	0.4 max	4,41
4. Calcium Oxide (CaO), percent	XRF	-	63,07
5. Magnesium Oxide (MgO), percent	XRF	5.0 max	3,22
6. Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> ), percent	XRF	3.5 max	2,12
7. Loss On Ignition (LOI), percent	SNI 15-0129-2004	5.0 max	0,83
8. Insoluble Residue (IR), percent		3.0 max	0,65
9. Free Lime (F-CaO), percent	ASTM STP 985	-	0,31
10. Total Alkalies, (as Na <sub>2</sub> O) percent	Calculation	0.6 max	0,48
11. C <sub>3</sub> S percent	Calculation		56,0
12. C <sub>2</sub> S percent			19,5
13. C <sub>3</sub> A percent	Calculation	5 max	2,98
14. C <sub>4</sub> AF percent			13,10
15. C <sub>4</sub> AF + 2C <sub>3</sub> A percent		25 max	18,62

**Remark :**

<p>Approved by ;</p> <div style="text-align: center;">   <b>Vera Indrawati</b>                  QARD Manager             </div>	<p>Prepared by ;</p> <div style="text-align: center;">   <b>Saiful Bahri</b>                  R &amp; D Dept. Head             </div>
---	---

## Lampiran H: Hasil Uji Kandungan Klorida pada Benda Uji



UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK - DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
**LABORATORIUM TEKNIK PENYEHATAN & LINGKUNGAN**  
Kampus Baru UI Telp : (021) 7875031, 7270029 Fax. (021) 7270028 Depok 16424 Indonesia

### HASIL ANALISIS

No : PM. 01.04/3P/VI/2011  
Pengirim : David Silitonga  
Jenis Sampel : Beton  
Tanggal Penerimaan : 09/06/2011  
Tanggal Analisa : 09/06/2011 – 17/06/2011  
Analisis : Analisis Kimia  
Deskripsi Sampel : Sampling dilakukan oleh pengirim  
Packing : Dalam plastik tidak bersegel  
Identifikasi Sampel : Abu beton Kode SP5-42-AL

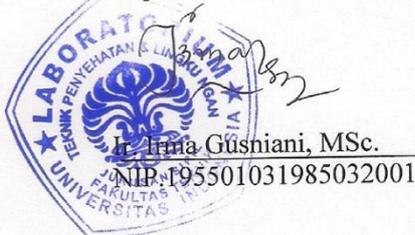
Parameter	Unit	Hasil Tes	Kadar Maksimum**	Nomor Metode*
Klorida (Cl)	%	0.14	0.15	C-1152/ C-1152M-04

\* ASTM C 1152/C 1152M-04, "Standard test Method for Acid-Soluble Chloride In Mortar and Concrete"  
\*\* Konsentrasi maksimum mengacu ASTM D512, "Standard Test Methode for Chloride Ion in Water"

### Kesimpulan

Memenuhi standar yang ditentukan.

Depok, 17 Juni 2011  
Kepala Laboratorium Penyehatan dan Lingkungan



Tembusan : Arsip

