

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN .....	v
PRAKATA .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR ARTI LAMBANG .....	xv
INTISARI .....	xvi
<i>ABSTRACT</i> .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Kebaruan Penelitian .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	5
1.5. Manfaat Penelitian .....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. Tinjauan Pustaka .....	6
2.1.1. Semen .....	6
A. Pengertian dan Fungsi Penyemenan .....	6
B. Komposisi Semen .....	6
C. Klasifikasi Semen .....	7
2.1.2. Nanosilika Geotermal .....	8
A. Pengertian .....	8
B. Pemrosesan Lumpur Geotermal .....	8
C. Kandungan Silika Pada Nanosilika Geotermal .....	9
2.1.3. Hidrasi Semen .....	9
2.2. Landasan Teori .....	10
2.2.1. Karakteristik Semen .....	10
2.2.2. Aditif yang Digunakan Pada Suspensi Semen .....	11
2.2.3. Mekanisme Hidrasi Semen .....	12

2.2.4.	Model Kinetika Hidrasi Semen-Nanosilika .....	14
2.3.	Hipotesis Penelitian .....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....		24
3.1.	Bahan dan Alat Penelitian .....	24
3.1.1.	Bahan .....	24
3.1.2.	Alat Penelitian .....	24
3.2.	Prosedur Penelitian .....	25
3.2.1.	Proses Pembuatan Nanosilika Geotermal .....	25
3.2.2.	Pengujian <i>Setting Time</i> dengan <i>Vicat</i> .....	27
3.2.3.	Pengujian <i>Compressive Strength</i> dengan <i>Universal Testing Machine</i> .....	27
3.2.4.	Karakterisasi dan Uji Pada Bahan dan Suspensi Semen .....	28
3.3.	Analisis Data .....	28
3.3.1.	Analisis Pembuatan Suspensi Semen dari Semen Kelas G .....	28
3.3.2.	Analisis Perencanaan Desain Komposisi Material dan Pengujian .....	28
3.3.3.	Analisis Sifat Suspensi Semen Dengan Aditif Nanosilika .....	29
3.4.	Variabel Penelitian .....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		31
4.1.	Analisis Bubuk Semen .....	31
4.1.1.	Analisis EDX .....	31
4.2.	Analisis Nanosilika Geotermal .....	33
4.2.1.	Analisis <i>Tunneling Electron Microscope</i> (TEM) .....	33
4.2.2.	Analisis <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA) .....	33
4.3.	Analisis <i>Setting Time</i> Suspensi Semen .....	34
4.4.	Analisis <i>Compressive Strength</i> Suspensi Semen .....	54
4.5.	Korelasi Uji <i>Compressive Strength</i> dan Analisis FTIR Suspensi Semen ..	57
4.5.1.	Model Kinetika Hidrasi Pada Tahap <i>Aging</i> .....	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		87
5.1.	Kesimpulan .....	87
5.2.	Saran .....	89
DAFTAR PUSTAKA .....		90
LAMPIRAN .....		94

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.1</b>	Penelitian Terkait Aplikasi Nanosilika Pada Penyemenan .....	4
<b>Tabel 2.1</b>	Klasifikasi Semen Berdasarkan Tipe API .....	7
<b>Tabel 2.2</b>	Klasifikasi Semen Kelas G .....	8
<b>Tabel 2.3</b>	Kandungan Air Normal Dalam Suspensi Semen .....	11
<b>Tabel 2.4</b>	Model Persamaan Kinetika Reaksi <i>Solid-State</i> Pada <i>Setting Time</i> .....	16
<b>Tabel 2.5</b>	Gugus Fungsi dari Fasa C-S-H Pada <i>Oil Well Cementing</i> .....	18
<b>Tabel 2.6</b>	Model Persamaan Kinetika Hidrasi Tahap <i>Aging</i> Pada <i>Compressive Strength</i> .....	19
<b>Tabel 3.1</b>	Alat Karakterisasi dan Uji Pada Bahan dan Suspensi Semen .....	28
<b>Tabel 3.2</b>	<i>Slurry Requirements</i> .....	28
<b>Tabel 3.3</b>	Komposisi Material dan Jumlah Pengujian .....	29
<b>Tabel 4.1</b>	Klasifikasi <i>OWC Class G</i> .....	32
<b>Tabel 4.2</b>	Perbandingan <i>R-square</i> Model Kinetika <i>Setting Time</i> Semen .....	44
<b>Tabel 4.3</b>	Nilai Konstanta Laju <i>Setting</i> Semen Dengan Komposisi 100:0 .....	49
<b>Tabel 4.4</b>	Nilai Konstanta Laju <i>Setting</i> Semen Dengan Komposisi 99,5:0,5 .....	50
<b>Tabel 4.5</b>	Nilai Konstanta Laju <i>Setting</i> Semen Dengan Komposisi 99:1 .....	50
<b>Tabel 4.6</b>	Nilai Konstanta Laju <i>Setting</i> Semen Dengan Komposisi 98,5:1,5 .....	50
<b>Tabel 4.7</b>	Nilai Konstanta Laju <i>Setting</i> Semen Dengan Komposisi 98:2 .....	51
<b>Tabel 4.8</b>	Nilai Konstanta Laju <i>Setting</i> Semen Dengan Komposisi 98:2 .....	51
<b>Tabel 4.9</b>	Nilai Konstanta A dan E Untuk Kinetika Berbasis <i>Setting Time</i> .....	52
<b>Tabel 4.10</b>	Persamaan Laju Reaksi Berbasis <i>Setting Time</i> Semen .....	53
<b>Tabel 4.11</b>	Desain Variabel Bebas Optimasi Suspensi Semen .....	55
<b>Tabel 4.12</b>	Parameter Kinetika <i>Reaction-Diffusion Model</i> Komposisi 100:0 .....	65
<b>Tabel 4.13</b>	Parameter Kinetika <i>Reaction-Diffusion Model</i> Komposisi 99,5:0,5 .....	67
<b>Tabel 4.14</b>	Parameter Kinetika <i>Reaction-Diffusion Model</i> Komposisi 99:1 .....	68
<b>Tabel 4.15</b>	Parameter Kinetika <i>Reaction-Diffusion Model</i> Komposisi 98,5:1,5 .....	69
<b>Tabel 4.16</b>	Parameter Kinetika <i>Reaction-Diffusion Model</i> Komposisi 98:2 .....	71
<b>Tabel 4.17</b>	Parameter Kinetika <i>Reaction-Diffusion Model</i> Komposisi 97:3 .....	72
<b>Tabel 4.18</b>	Perbandingan <i>R-square</i> Model Kinetika Reaksi Hidrasi .....	73
<b>Tabel 4.19</b>	Nilai Konstanta Laju Reaksi Hidrasi Dengan Komposisi 100:0 .....	78
<b>Tabel 4.20</b>	Nilai Konstanta Laju Reaksi Hidrasi Dengan Komposisi 99,5:0,5 .....	79

<b>Tabel 4.21</b> Nilai Konstanta Laju Reaksi Hidrasi Dengan Komposisi 99:1 .....	79
<b>Tabel 4.22</b> Nilai Konstanta Laju Reaksi Hidrasi Dengan Komposisi 98,5:1,5 .....	80
<b>Tabel 4.23</b> Nilai Konstanta Laju Reaksi Hidrasi Dengan Komposisi 98:2 .....	80
<b>Tabel 4.24</b> Nilai Konstanta Laju Reaksi Hidrasi Dengan Komposisi 97:3 .....	80
<b>Tabel 4.25</b> Nilai Konstanta A dan E Untuk Kinetika Hidrasi Berbasis <i>Compressive Strength</i> .....	82
<b>Tabel 4.26</b> Persamaan Laju Reaksi Hidrasi Berbasis Uji <i>Compressive Strength</i> Semen .....	82

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Empat Komponen Semen <i>Portland</i> .....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Proses Pelepasan Panas pada Hidrasi Semen .....	12
<b>Gambar 2.3</b>	Hasil Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) dari Nanosilika .....	14
<b>Gambar 2.4</b>	Skema Proses Hidrasi Partikel Semen .....	14
<b>Gambar 2.5</b>	Model Hidrasi Semen dengan dan tanpa Nanosilika .....	15
<b>Gambar 2.6</b>	Skema Proses Nukleasi atau Penggabungan Molekul-Molekul Kecil .....	17
<b>Gambar 2.7</b>	Bentuk Geometri Kristal: (a) Silinder, (b) Bola dan (c) Kubus .....	17
<b>Gambar 2.8</b>	Skema <i>Reaction Controlled Model</i> Pada Reaksi Hidrasi Tahap Aging .....	20
<b>Gambar 2.9</b>	Skema <i>Diffusion Controlled Model</i> Pada Reaksi Hidrasi Tahap Aging .....	21
<b>Gambar 2.10</b>	Skema <i>Reaction-Diffusion Controlled Model</i> Pada Reaksi Hidrasi Tahap Aging .....	22
<b>Gambar 3.1</b>	<i>Universal Testing Machine</i> .....	24
<b>Gambar 3.2</b>	<i>Vicat</i> .....	24
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Flow Diagram</i> Prosedur Penelitian .....	25
<b>Gambar 4.1</b>	Kandungan Komposisi Unsur Pada <i>Oil Well Cement Class G</i> .....	31
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil Uji TEM Nanosilika Geotermal pada Skala 20 nm dan 10 nm .....	33
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil Uji PSA Nanosilika Geotermal .....	34
<b>Gambar 4.4</b>	(a) <i>Initial</i> dan (b) <i>Final Setting Time</i> Suspensi Semen Terhadap Variasi Aditif Nanosilika Geotermal .....	35
<b>Gambar 4.5</b>	Penurunan Jarum <i>Vicat</i> Terhadap Waktu Dengan OWC:NS Geo (a) 100:0, (b) 99,5:0,5, (c) 99:1, (d) 98,5:1,5, (e) 98:2, (f) 97:3 .....	36
<b>Gambar 4.6</b>	Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 100:0 (a) Avrami, dan (b) Kontraksi Volume .....	40
<b>Gambar 4.7</b>	Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 99,5:0,5 (a) Avrami, dan (b) Kontraksi Volume .....	40
<b>Gambar 4.8</b>	Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 99:1 (a) Avrami, dan (b) Kontraksi Volume .....	41
<b>Gambar 4.9</b>	Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 98,5:1,5 (a) Avrami, dan (b) Kontraksi Volume .....	42
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 98:2 (a) Avrami, dan (b) Kontraksi Volume .....	42

**Gambar 4.11** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 97:3

(a) Avrami, dan (b) Kontraksi Volume ..... 43

**Gambar 4.12** Perbandingan Hasil dan Data Penelitian Dengan Komposisi 100:0

Pada Suhu (a) 30°C, (b) 50°C, dan (c) 70°C ..... 45

**Gambar 4.13** Perbandingan Hasil dan Data Penelitian Dengan Komposisi 99,5:0,5

Pada Suhu (a) 30°C, (b) 50°C, dan (c) 70°C ..... 46

**Gambar 4.14** Perbandingan Hasil dan Data Penelitian Dengan Komposisi 99:1

Pada Suhu 30°C, (b) 50°C, dan (c) 70°C ..... 46

**Gambar 4.15** Perbandingan Hasil dan Data Penelitian Dengan Komposisi 98,5:1,5

Pada Suhu (a) 30°C, (b) 50°C, dan (c) 70°C ..... 47

**Gambar 4.16** Perbandingan Hasil dan Data Penelitian Dengan Komposisi 98:2

Pada Suhu 30°C, (b) 50°C, dan (c) 70°C ..... 48

**Gambar 4.17** Perbandingan Hasil dan Data Penelitian Dengan Komposisi 93:7

Pada Suhu 30°C, (b) 50°C, dan (c) 70°C ..... 48

**Gambar 4.18** Plot Tetapan Laju Terhadap Suhu Untuk Kinetika Berbasis *Setting*

*Time* ..... 52

**Gambar 4.19** Hubungan A dengan Komposisi Aditif Nanosilika Geotermal ..... 53

**Gambar 4.20** Hubungan E dengan Komposisi Aditif Nanosilika Geotermal ..... 54

**Gambar 4.21** Kuat Tekan Suspensi Semen Terhadap Variasi Nanosilika Geotermal

Pada Hari (a) ke-3 (b) ke-7 (c) ke-28 ..... 55

**Gambar 4.22** Hasil Karakterisasi FTIR Nanosilika Geotermal dengan Perbandingan

*Oil Well Cement Class G* ..... 57

**Gambar 4.23** Perbandingan Kuat Tekan *Hardened Cement* dan *Corr* FTIR dengan

Nilai Absorbansi Pada Komposisi 98:2 ..... 58

**Gambar 4.24** Perbandingan Kuat Tekan *Hardened Cement* dengan Absorbansi dan

*Corr* FTIR dengan Nanosilika Geotermal (a) 0%, (b) 0,5%, (c) 1%,  
(d) 1,5%, (e) 3% ..... 59

**Gambar 4.25** Hasil Uji Kuat Tekan dengan Komposisi OWC : NS Geo (a) 100:0,

(b) 99,5:0,5, (c) 99:1, (d) 98,5:1,5, (e) 98:2, dan (f) 97:3 ..... 62

**Gambar 4.26** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo

100:0 (a) *Reaction*, (b) *Diffusion*, (c) *Reaction-Diffusion* ..... 64

**Gambar 4.27** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo

99,5:0,5 (a) *Reaction*, (b) *Diffusion*, (c) *Reaction-Diffusion*..... 66

**Gambar 4.28** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 99:1

(a) *Reaction*, (b) *Diffusion*, (c) *Reaction-Diffusion*..... 67

**Gambar 4.29** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo

98,5:1,5 (a) *Reaction*, (b) *Diffusion*, (c) *Reaction-Diffusion*..... 68

**Gambar 4.30** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 98:2

(a) *Reaction*, (b) *Diffusion*, (c) *Reaction-Diffusion*..... 70

**Gambar 4.31** Perbandingan Model Kinetika Untuk Komposisi OWC:NS Geo 97:3

(a) *Reaction*, (b) *Diffusion*, (c) *Reaction-Diffusion*..... 71

**Gambar 4.32** Karakterisasi FTIR *Hardened Cement* dengan Suhu 30°C ..... 74

**Gambar 4.33** Nilai *Corr* FTIR dengan Perbandingan OWC Sebagai Standar,

Komposisi OWC:NS Geo (a) 100:0, (b) 99,5:0,5, (c) 99:1,

(d) 98,5:1,5, (e) 98:2, dan (f) 97:3 ..... 75

**Gambar 4.34** Model Kinetika *Reaction-Diffusion* Berdasarkan Nilai Korelasi

(*Corr*) FTIR Untuk Komposisi (a) 100:0, (b) 99,5:0,5, (c) 99:1,

(d) 98,5:1,5, (e) 98:2, (f) 97:3 ..... 76

**Gambar 4.35** Plot Tetapan Laju Terhadap Suhu Untuk Kinetika Berbasis

*Compressive Strength* Semen ..... 81

**Gambar 4.36** Hubungan A dengan Komposisi Aditif Nanosilika Geotermal..... 83

**Gambar 4.37** Hubungan E dengan Komposisi Aditif Nanosilika Geotermal ..... 83

## DAFTAR ARTI LAMBANG

$A$	= faktor konversi tumbukan ( $\text{menit}^{-1}$ atau $\text{hari}^{-1}$ )
$\alpha$	= faktor konversi (tanpa satuan)
$\alpha_{rd}$	= parameter kinetika pada <i>reaction-diffusion model</i> (tanpa satuan)
$a_i$	= absorbansi untuk satu puncak spektrum FTIR sampel (tanpa satuan)
$\bar{a}$	= rata-rata absorbansi puncak spektrum FTIR sampel (tanpa satuan)
$b_i$	= absorbansi untuk satu puncak spektrum FTIR standar (tanpa satuan)
$\bar{b}$	= rata-rata absorbansi puncak spektrum FTIR standar (tanpa satuan)
$Corr$	= korelasi kemiripan spektrum (tanpa satuan)
$Ea$	= energi aktivasi (J/mol)
$f(\alpha)$	= model reaksi dalam bentuk diferensial
$g(\alpha)$	= model reaksi dalam bentuk integral
$k$	= tetapan laju ( $\text{menit}^{-1}$ atau $\text{hari}^{-1}$ )
$K$	= tetapan laju <i>diffusion dependent</i> pada <i>reaction-diffusion model</i> ( $\text{hari}^{-1}$ )
$M$	= berat molekul (g/mol atau kg/mol)
$n$	= orde reaksi (tanpa satuan)
$\rho$	= densitas produk ( $\text{kg/m}^3$ atau $\text{g/cm}^3$ )
$R$	= konstanta gas (8,314 J/mol.K)
$R$	= jarak dari pusat partikel dengan lapisan antarmuka (nm)
$r$	= koefisien korelasi kemiripan spektrum (tanpa satuan)
$r$	= jarak pada waktu $t$ (nm)
$r_0$	= jarak pada waktu $t_0$ (nm)
$T$	= suhu ( $^{\circ}\text{C}$ atau K)
$t$	= waktu (menit atau hari)
$x_0$	= nilai terendah untuk faktor konversi (mm pada uji <i>setting time</i> dan MPa pada uji <i>compressive strength</i> )
$x_{\infty}$	= nilai tertinggi untuk faktor konversi (mm pada uji <i>setting time</i> dan MPa pada uji <i>compressive strength</i> )
$x_t$	= nilai pada waktu $t$ untuk faktor konversi (mm pada uji <i>setting time</i> dan MPa pada uji <i>compressive strength</i> )