

## UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA

**BORANG PENGESAHAN STATUS TESIS** ♦

**JUDUL: PENGESANAN PROSES PENGARATAN DAN PERUBAHAN pH DALAM KONKRIT BERTETULANG MENGGUNAKAN SERABUT OPTIK**

**SESI PENGAJIAN : 2005/2006**

Saya

**ERICA DINA**

**(HURUF BESAR)**

mengaku membenarkan tesis (~~PSM/Sarjana/Doktor Falsafah~~)\* ini disimpan di Perpustakaan Universiti Teknologi Malaysia dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut:

1. Tesis adalah hak milik Universiti Teknologi Malaysia.
2. Perpustakaan Universiti Teknologi Malaysia dibenarkan membuat salinan untuk tujuan pengajian sahaja.
3. Perpustakaan dibenarkan membuat salinan tesis ini sebagai bahan pertukaran antara institusi pengajian tinggi.
4. \*\*Sila tandakan ( ✓ )

SULIT

(Mengandungi maklumat yang berdarjah keselamatan atau kepentingan Malaysia seperti yang termaktub di dalam AKTA RAHSIA RASMI 1972)

TERHAD

(Mengandungi maklumat TERHAD yang telah ditentukan oleh organisasi/badan di mana penyelidikan dijalankan)

TIDAK TERHAD

Disahkan oleh

\_\_\_\_\_  
(TANDATANGAN PENULIS)

\_\_\_\_\_  
(TANDATANGAN PENYELIA)

Alamat Tetap:

**JALAN SUKA KARYA NO.3,  
MEDAN 20146, SUMATERA UTARA,  
INDONESIA**

**PROF. MADYA. DR. MOHAMMAD BIN ISMAIL**

Nama Penyelia

Tarikh: **28HB NOV 2006**

Tarikh: **28HB NOV 2006**

CATATAN:

\*

Potong yang tidak berkenaan.

\*\*

Jika tesis ini SULIT atau TERHAD, sila lampirkan surat daripada pihak berkuasa/organisasi berkenaan dengan menyatakan sekali sebab dan tempoh tesis ini perlu dikelaskan sebagai SULIT atau TERHAD.

♦

Tesis dimaksudkan sebagai tesis bagi Ijazah Doktor Falsafah dan Sarjana secara penyelidikan, atau disertasi bagi pengajian ecaru kerja kursus dan penyelidikan, atau Laporan Projek Sarjana Muda (PSM).

“Kami akui bahawa kami telah membaca tesis ini dan pada pandangan kami tesis ini adalah memadai dari segi skop dan kualiti untuk tujuan penganugerahan ijazah Sarjana Kejuruteraan (Struktur dan Bahan)”

Tandatangan :  
Nama Penyelia I : **Prof. Madya. Dr. Mohammad Bin Ismail**  
Tarikh : 28HB NOV 2006

Tandatangan :  
Nama Penyelia II : **Prof. Madya. Dr. Rosly Bin Abd. Rahman**  
Tarikh : 28HB NOV 2006

Tandatangan :  
Nama Penyelia III : **Prof. Madya. Dr. Madzlan Bin Aziz**  
Tarikh : 28HB NOV 2006

**BAHAGIAN A – Pengesahan Kerjasama \***

Adalah disahkan bahawa projek penyelidikan tesis ini telah dilaksanakan melalui kerjasama antara \_\_\_\_\_ dengan \_\_\_\_\_

Disahkan oleh:

Tandatangan : ..... Tarikh : .....

Nama : .....

Jawatan : .....  
(Cop rasmi)

*\* Jika penyediaan tesis/projek melibatkan kerjasama.*

---

---

**BAHAGIAN B – Untuk Kegunaan Pejabat Sekolah Pengajian Siswazah**

Tesis ini telah diperiksa dan diakui oleh:

Nama dan Alamat Pemeriksa Luar :

Nama dan Alamat Pemeriksa Dalam :

Nama Penyelia Lain (Jika Ada) :

Disahkan oleh Penolong Pendaftar di SPS:

Tandatangan : ..... Tarikh : .....

Nama : .....

PENGESANAN PROSES PENGARATAN DAN PERUBAHAN pH DALAM  
KONKRIT BERTETULANG MENGGUNAKAN SERABUT OPTIK

ERICA DINA

Tesis ini dikemukakan  
sebagai memenuhi syarat penganugerahan  
ijazah Sarjana Kejuruteraan (Struktur dan Bahan)

Fakulti Kejuruteraan Awam  
Universiti Teknologi Malaysia

NOV 2006

“Saya akui tesis ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya”.

Tanda Tangan :  
Nama : **Erica Dina**  
Tarikh : 28HB NOV 2006

*Teristimewa ditujukan untuk "Kedua orangtuaku tercinta, Papa (Ir. Suryana Harjadinata Soekandi) dan Mama (Zuriani Yendani)", yang telah banyak memberikan dorongan, kekuatan dan semangat dalam setiap langkah yang ku tempuhi. Do'a dan kasih sayang yang selalu hadir dalam hidupku serta pengorbanan yang tak ternilai harganya...*

*Juga...*

*Untuk "Abangku tersayang (Kendrawan Syahputra) dan Adik-adikku yang kukasihi (Riza Suryan Putra S.P., Fadly Ryan Arikundo, dan Indah Rizky Mahvira)", terima kasih atas semua yang telah diberikan, cinta, doa dan dorongan serta kepercayaan...*

## PENGHARGAAN

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan dan menyempurnakan tesis ini dengan baik.

Ucapan jutaan terima kasih dan penghargaan yang teramat tinggi ditujukan kepada **Prof. Madya. Dr. Mohammad Bin Ismail, Prof. Madya. Dr. Rosly Bin Abd. Rahman** dan **Prof. Madya. Dr. Madzlan Bin Aziz** selaku penyelia atas segala nasihat, bimbingan, bantuan, dorongan, tunjuk ajar serta kepercayaan dalam menjayakan tesis ini.

Terima kasih juga kepada **Puan Rosmawati** serta kakitangan Makmal Struktur dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan Awam. Tak lupa juga kepada **Encik Ahmad Bin Imbar** beserta kakitangan Makmal Optoelektronik Jabatan Fizik, Fakulti Sains yang banyak membantu saya melakukan ujikaji.

Akhir sekali, ucapan terima kasih ditujukan kepada rakan-rakan dan semua pihak yang terlibat secara langsung mahupun tidak langsung. Semoga Allah SWT membalas segala jasa baik dan sumbangan yang telah diberikan kepada saya.

Amien...

## ABSTRAK

Masalah utama berkaitan dengan ketahanan lasakan konkrit bertetulang adalah pengaratian tetulang. Pengaratian tetulang menyebabkan penutup retak dan akhirnya struktur gagal dalam menanggung beban rekabentuknya. Faktor utama yang menyebabkan pengaratian tetulang adalah pengkarbonatan dan serangan ion klorida. Serangan asid dan sulfat boleh melemahkan konkrit. Objektif kajian ini adalah untuk melihat kemungkinan pengesan serabut optik digunakan untuk mengesan pengaratian pada tetulang dalam konkrit dan mengesan perubahan pH air liang mortar dan konkrit. Kedua pengesan ini menggunakan serabut optik PCS (*Plastic Clad Silica*) yang dibuang penyalutnya sepanjang 4 cm di bahagian tengah. Cahaya dipancarkan di salah satu hujung serabut optik dan dikesan di hujung yang lain. Bagi pengesan karat, tetulang dilekatkan dengan bahagian serabut optik tanpa penyalut. Karat yang terbentuk pada permukaan tetulang menyebabkan cahaya terbias dari serabut optik sehingga nilai voltan keluaran cahaya yang dikesan di hujungnya mengalami penurunan. Bagi pengesan pH, filem silika sol-gel disalutkan ke bahagian serabut optik tanpa penyalut. Warna filem silika sol-gel pada permukaan serabut optik berubah apabila pH larutan dan air liang konkrit berubah. Perubahan warna filem ini mempengaruhi pancaran cahaya yang melalui serabut optik. Warna filem silika sol-gel semakin gelap apabila nilai pH bertambah. Keadaan ini menyebabkan cahaya terbias keluar dari serabut optik sehingga cahaya yang dikesan di bahagian hujung serabut optik tersebut berkurangan. Perbandingan dengan pengesan karat elektrokimia menunjukkan bahawa pengesan karat serabut optik yang dibangunkan berupaya untuk mengesan pengaratian yang berlaku pada tetulang dalam konkrit. Hal ini dibuktikan dengan melihat keadaan tetulang apabila konkrit dipecahkan diakhir ujikaji. Selain itu, perbandingan dengan pengukuran menggunakan pH meter menunjukkan bahawa pengesan pH serabut optik juga berupaya mengesan perubahan pH larutan. Walau bagaimanapun, ia tidak berupaya mengesan perubahan pH air liang pada konkrit dan mortar.



## ABSTRACT

Corrosion of reinforcement is the major cause of the deterioration of reinforced concrete structure. Corroded reinforcement induces stresses in concrete cover that leads to cracking and spalling of concrete cover and finally results in the failure of the structure to carry the design loads. The main causes of reinforcement corrosion are carbonation and chloride ions attack. Acid and sulphate attack can also weaken the concrete. The objectives of this research were to look at the possibility of using fibre optic sensors to monitor the corrosion of reinforcement and to detect changes in pH of concrete and mortar. Both sensors used Plastic Clad Silica (PCS) optical fibres which were unclad, 4 cm long, at the centre portion. The light was made incidence to one end of the optical fibre and detected at the other end. For the corrosion sensor, unclad PCS optical fibre was attached to the reinforcement. The formation of rust on the reinforcement surface causes light to be refracted from fibre optic. Consequently, the intensity of light detected at the other end of the fibre was reduced. For the pH sensor, the unclad portion of optical fibre was dip coated in the silica sol-gel film. The color of the silica sol-gel film on fibre optic surface changes as the pH of solution and pore water of concrete changes. The color changes of the film influenced the transmission of light through the optical fibre. The colors of silica sol-gel film darken as if the pH value increases. This state causes the light to be refracted away from the fibre optic that renders the light detected on the other end (receiver) of fibre optic to decrease. The comparison with the measurements using electrochemical corrosion sensor shows that the constructed fibre optic corrosion sensor is capable to detect corrosion of the reinforcement in concrete. This was confirmed by visual inspection of the reinforcement when the concrete sample was broke open at the end of the experiment. Furthermore, the comparison with the measurements using pH meter shows that the fiber optic pH sensor is also capable to detect the changes of the pH in solution. However, the change of pH in mortar and concrete was not clearly distinguished.

## ISI KANDUNGAN

<b>BAB</b>	<b>PERKARA</b>	<b>MUKA SURAT</b>
	<b>JUDUL</b>	<b>i</b>
	<b>PENGAKUAN</b>	<b>ii</b>
	<b>DEDIKASI</b>	<b>iii</b>
	<b>PENGHARGAAN</b>	<b>iv</b>
	<b>ABSTRAK</b>	<b>v</b>
	<b>ABSTRACT</b>	<b>vi</b>
	<b>ISI KANDUNGAN</b>	<b>vii</b>
	<b>SENARAI JADUAL</b>	<b>xii</b>
	<b>SENARAI RAJAH</b>	<b>xiii</b>
	<b>SENARAI GAMBAR</b>	<b>xviii</b>
	<b>SENARAI SIMBOL</b>	<b>xxi</b>
	<b>SENARAI LAMPIRAN</b>	<b>xxiii</b>
<b>1</b>	<b>PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
	1.1 Latar Belakang Kajian	1
	1.2 Kenyataan Masalah	3
	1.3 Objektif Kajian	4
	1.4 Skop Kajian	5
	1.5 Kepentingan Kajian	8
	1.6 Paparan Tesis	8
<b>2</b>	<b>KAJIAN LITERATUR</b>	<b>10</b>
	2.1 Pengenalan	10
	2.2 Konkrit dan Konkrit Bertetulang	10

2.3	Ketahananlasakan Konkrit	11
2.4	Serangan Asid dan Sulfat	16
2.4.1	Serangan Asid	17
2.4.2	Serangan Sulfat	19
2.5	Pengaratan Tetulang dalam Konkrit	21
2.6	Serangan Klorida	24
2.7	Pengkarbonatan ( <i>Carbonation</i> )	30
2.8	Keretakan Konkrit akibat Pengaratan Tetulang	33
2.9	Serabut Optik ( <i>Fibre Optic</i> )	37
2.10	Penggunaan Pengesan Serabut Optik dalam Bidang Kejuruteraan Awam	39
2.11	Pengesan Karat Serabut Optik ( <i>Fibre Optic Corrosion Sensor</i> )	45
2.12	Pengesan pH Serabut Optik ( <i>Fibre Optic pH Sensor</i> )	48
2.12.1	Silika Sol-gel	51
2.12.2	Pengesan pH Serabut Optik dengan Silika Sol-gel	53
2.13	Pengesan Karat Elektrokimia ( <i>Electrochemical Corrosion Sensor</i> )	54
<b>3</b>	<b>METODOLOGI KAJIAN</b>	<b>56</b>
3.1	Pengenalan	56
3.2	Pengesan Karat Serabut Optik ( <i>Fibre Optic Corrosion Sensor</i> )	58
3.2.1	Alat dan Bahan yang Digunakan dalam Ujikaji	60
3.2.2	Penyediaan Acuan Konkrit	60
3.2.3	Penyediaan Campuran Konkrit	61
3.2.4	Penyediaan Serabut Optik	61
3.2.5	Meletakkan Serabut Optik PCS dalam Konkrit Bertetulang	63
3.2.6	Penyediaan Larutan Natrium Klorida (NaCl)	64

3.2.7	Merendam Sampel Konkrit ke dalam Larutan Natrium Klorida (NaCl)	65
3.3	Pengesan pH Serabut Optik ( <i>Fibre Optic pH Sensor</i> )	65
3.3.1	Alat dan Bahan yang Digunakan dalam Ujikaji	65
3.3.2	Penyediaan Silika Sol-gel	66
3.3.3	Menguji Keberkesanan Filem Kaca Bersalut Silika Sol-gel dalam Menentukan Perubahan pH melalui Perubahan Warna	67
3.3.3.1	Penyediaan Larutan Asid Nitrik ( <i>Nitric Acid Solution</i> )	67
3.3.3.2	Penyediaan Filem Kaca	68
3.3.3.3	Penyediaan Larutan pH	69
3.3.3.4	Menentukan Perubahan Warna pada Filem Kaca sebagai Penunjuk pH	69
3.3.4	Menguji Keberkesanan Pengesan pH Serabut Optik untuk Menentukan Perubahan pH Larutan	70
3.3.4.1	Penyediaan Serabut Optik	70
3.3.4.2	Penyediaan Serabut Optik Bersalut Silika Sol-gel	70
3.3.4.3	Penyediaan Larutan dengan pH Berbeza (Kaedah Penunjuk Penitratan)	71
3.3.5	Menguji Keberkesanan Pengesan pH Serabut Optik untuk Menentukan Perubahan pH dalam Mortar dan Konkrit	72
3.3.5.1	Penyediaan Acuan Konkrit	73
3.3.5.2	Penyediaan Campuran Konkrit	73
3.3.5.3	Penyediaan Campuran Mortar	74
3.3.5.4	Penyediaan Serabut Optik	74
3.3.5.5	Penyediaan Serabut Optik Bersalut Silika Sol-gel	74

	3.3.5.6 Meletakkan Serabut Optik PCS dalam Sampel Mortar dan Konkrit	74
	3.3.5.7 Penyediaan Larutan Asid	75
	3.3.5.8 Penyediaan Pengesan pH Serabut Optik Bersalut Silika Sol-gel dalam Mortar dan Konkrit	76
3.4	Pengesan Karat Elektrokimia ( <i>Electrochemical Corrosion Sensor</i> )	78
<b>4</b>	<b>PENGESAN KARAT SERABUT OPTIK (<i>Fibre Optic Corrosion Sensor</i>)</b>	<b>79</b>
4.1	Pengenalan	79
4.2	Pengesan Karat Serabut Optik bagi Sampel Bertetulang Tunggal	80
4.3	Pengesan Karat Serabut Optik bagi Sampel Bertetulang Selari	86
4.4	Perbincangan	93
<b>5</b>	<b>PENGESAN pH SERABUT OPTIK (<i>Fibre Optic pH Sensor</i>)</b>	<b>96</b>
5.1	Pengenalan	96
5.2	Keberkesanan Filem Kaca Sol-gel dalam Menentukan Perubahan pH melalui Perubahan Warna	97
5.3	Keberkesanan Pengesan pH Serabut Optik untuk Menentukan Perubahan pH Larutan	98
5.4	Keberkesanan Pengesan pH Serabut Optik untuk Menentukan Perubahan pH dalam Mortar dan Konkrit	101
<b>6</b>	<b>KESIMPULAN DAN CADANGAN</b>	<b>106</b>
6.1	Kesimpulan	106
6.1.1	Pengesan Karat Serabut Optik	106
6.1.2	Pengesan pH Serabut Optik	107

6.2	Cadangan	107
	<b>RUJUKAN</b>	<b>110</b>
	<b>PENERBITAN</b>	<b>115</b>
	<b>LAMPIRAN A - N</b>	<b>116-156</b>

**SENARAI JADUAL**

<b>NO. JADUAL</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
2.1	Jenis Bahan Kimia yang Memberi Kesan terhadap Konkrit	17
2.2	Jenis Asid yang Menyerang Konkrit	18
2.3	Peratus Perbezaan antara Beban Sebenar dan Beban yang Diperolehi Menggunakan Pengesan Serabut Optik	44
2.4	Jenis Bahan Tambah yang Digunakan pada Pengesan Serabut Optik	50
2.5	Kriteria ASTM untuk Pengaratan Keluli dalam Konkrit bagi Piawaian Sel Separuh	55
3.1	Campuran Bahan Berdasarkan Kepekatan Larutan Natrium Klorida (NaCl)	64
3.2	Jumlah Asid Pekat yang Digunakan Berdasarkan Perliter Larutan	76
5.1	Voltan Keluaran dan Kehilangan Voltan bagi Setiap pH Larutan yang Diukur Menggunakan Pengesan pH Serabut Optik	100

**SENARAI RAJAH**

<b>NO. RAJAH</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
2.1	Mekanisme Serangan Sulfat dalam Konkrit	20
2.2	Tindakbalas Anod dan Katod	22
2.3	Pengaratan pada Tetulang	23
2.4	Kesan daripada Pengaratan Tetulang dalam Konkrit	23
2.5	Hubungan Kadar Pengaratan, Masa dan Kepekatan Klorida	24
2.6	Proses Pengaratan akibat Kemasukkan Ion Klorida dalam Konkrit	25
2.7	Kadar Pengaratan Bergantung kepada Kepekatan Klorida dan pH Konkrit	26
2.8	Kadar Pengaratan Bergantung kepada Nisbah Ion Klorida dan Ion Hidroksil	26
2.9	Hubungkait antara Kandungan Klorida dan Kelembapan	28
2.10	Kegagalan Struktur akibat Adanya Ion Klorida dalam Konkrit	29



2.11	Kegagalan Struktur akibat Penyusupan Ion Klorida dalam Konkrit	30
2.12	Hubungan antara pH Konkrit dan Kadar Pengaratan	31
2.13	Proses Pengkarbonatan pada Tetulang Konkrit	32
2.14	Kegagalan Struktur akibat Proses Pengkarbonatan	33
2.15	Aktiviti Pengaratan dalam Konkrit yang Retak	34
2.16	Kerosakan Konkrit akibat Pengaratan Tetulang	34
2.17	Keretakan pada Papak Konkrit	35
2.18	Keretakan pada Rasuk Konkrit	35
2.19	Perbezaan Indeks Biasan di antara Teras dan Penyalut	37
2.20	Kes-kes pada Struktur Jalan Raya	40
2.21	Kaedah Ekstrinsik	40
2.22	Kaedah Intrinsik	41
2.23	Kaedah Evanesen	41
2.24	Pengesan Terikan	42
2.25	Konsep Pengesan Keretakan	43
2.26	Graf Keretakan Konkrit yang Diukur Menggunakan OTDR	43
2.27	Rasuk Keluli Disokong Mudah	43

2.28	Fius Pengaratan Serabut Optik Siri	45
2.29	Fius Pengaratan Serabut Optik Tunggal	46
2.30	Nilai Pantulan Cahaya yang Dikesan Menggunakan Pengesan Serabut Optik Berbentuk Y	47
2.31	Nilai Penghantaran Cahaya yang Dikesan Menggunakan Pengesan Serabut Optik tanpa Penyalut	48
2.32	Proses Pembentukan Silika Sol-gel	52
2.33	Nilai Penghantaran Cahaya Berdasarkan Nilai pH	54
2.34	Pengukuran Pengaratan dengan Kaedah Sel Separuh ( <i>Half Cell</i> )	55
3.1	Prosedur Kerja	57
3.2	Susunan Alat bagi Pengesan Karat dengan Sampel Konkrit Bertetulang Tunggal	58
3.3	Sampel Konkrit Bertetulang Tunggal	59
3.4	Susunan Alat bagi Pengesan Karat dengan Sampel Konkrit Bertetulang Selari	59
3.5	Sampel Konkrit Bertetulang Selari	59
3.6	Susunan Serabut Optik dan Tetulang dalam Konkrit	63
3.7	Susunan Alat untuk Mengesan Perubahan pH Larutan	70

3.8	Susunan Alat untuk Mengesan Perubahan pH Mortar dan Konkrit	73
3.9	Susunan Serabut Optik dalam Mortar dan Konkrit	75
4.1	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel Konkrit Bertetulang Tunggal yang Direndam dalam Air Suling (Sampel Kawalan)	81
4.2	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel Konkrit Bertetulang Tunggal yang Direndam dalam 10% Larutan NaCl	83
4.3	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel Konkrit Bertetulang Tunggal yang Direndam dalam 40% Larutan NaCl	85
4.4	Nombor-nombor Tetulang yang Disusun Selari dalam Konkrit	87
4.5	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel Konkrit Bertetulang Selari yang Direndam dalam Air Suling (Sampel Kawalan)	88
4.6	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel Konkrit Bertetulang Selari yang Direndam dalam 10% Larutan NaCl	90
4.7	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel Konkrit Bertetulang Selari yang Direndam dalam 40% Larutan NaCl	92
4.8	Laluan Cahaya pada Serabut Optik Apabila Berlaku Pengaratan	94

5.1	Warna Filem Kaca Bersalut Silika Sol-gel bagi Setiap pH Larutan	97
5.2	Graf Voltan Keluaran Melawan pH Larutan	99
5.3	Graf Kehilangan Voltan Melawan pH Larutan	99
5.4	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel yang Direndam dalam Air Suling	103
5.5	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel yang Direndam dalam 5% Larutan Asid Asetik	103
5.6	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel yang Direndam dalam 5% Larutan Asid Suksinik	104
5.7	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel yang Direndam dalam 1% Larutan Asid Sulfurik	104
5.8	Graf Voltan Keluaran Melawan Masa Rendaman bagi Sampel yang Direndam dalam 1% Larutan Asid Nitrik	105
6.1	Graf Indeks Biasan Melawan Peratus Zirkonium	109
6.2	Ujian Spektrum bagi Menentukan Indeks Penyerapan Cahaya	109

**SENARAI GAMBAR**

<b>NO. GAMBAR</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
2.1	Kegagalan Struktur akibat Pengaratan	36
2.2	Keretakan Struktur akibat Pengaratan	36
3.1	<i>Fibre Optic Cutter</i>	61
3.2	<i>Polishing Machine</i>	62
3.3	<i>Lapping Sheet</i>	62
3.4	Serabut Optik tanpa Penyalut	62
3.5	<i>Fibre Inspection Microscope F-ML1</i>	63
3.6	Larutan Silika Sol-gel	67
3.7	Cara Menyalut Filem Kaca dengan Silika Sol-gel	68
3.8	Larutan pH	69
3.9	Menentukan Perubahan pH Larutan Menggunakan Serabut Optik	72

3.10	Sampel Mortar dan Konkrit yang Direndam dalam Air Suling	76
3.11	Sampel Mortar dan Konkrit yang Direndam dalam Larutan Asid Asetik	77
3.12	Sampel Mortar dan Konkrit yang Direndam dalam Larutan Asid Suksinik	77
3.13	Sampel Mortar dan Konkrit yang Direndam dalam Larutan Asid Sulfurik	77
3.14	Sampel Mortar dan Konkrit yang Direndam dalam Larutan Asid Nitrik	78
4.1	Keadaan Tetulang Tunggal dalam Konkrit yang Direndam dalam Air Suling (Sampel Kawalan) selama 45 Hari	82
4.2	Keadaan Tetulang Tunggal dalam Konkrit yang Direndam dalam 10% Larutan NaCl selama 45 Hari	84
4.3	Keadaan Tetulang Tunggal dalam Konkrit yang Direndam dalam 40% Larutan NaCl selama 45 Hari	86
4.4	Keadaan Tetulang Selari dalam Konkrit yang Direndam dalam Air Suling (Sampel Kawalan) selama 45 Hari	89
4.5	Keadaan Tetulang Selari dalam Konkrit yang Direndam dalam 10% Larutan NaCl selama 45 Hari	91
4.6	Keadaan Tetulang Selari dalam Konkrit yang Direndam dalam 40% Larutan NaCl selama 45 Hari	93

4.7	Sampel Konkrit yang Direndam dalam Air Suling selama 45 Hari
-----	---

95

## SENARAI SIMBOL

$\text{CH}_3\text{COOH}$	-	Asid asetik
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	-	Etanol
$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	-	Asid suksinik
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-	Kalsium hidroksida
$\text{Ca}^{2+}$	-	Ion kalsium
$\text{CaCO}_3$	-	Kalsium karbonat
$\text{Cl}^-$	-	Ion klorida
cm	-	Sentimeter
$\text{CO}_2$	-	Karbon dioksida
Cu	-	Kuprum
$\text{Cu}^{2+}$	-	Ion kuprum
$e^-$	-	Elektron
Fe	-	Ferrum
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	-	Ferus hidroksida
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	-	Ferik hidroksida
$\text{Fe}^{2+}$	-	Ion ferus
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	Ferik (III) oksida
$\text{FeCl}_2$	-	Ferrum klorida
$\text{FeOCl}$	-	Ferrum oksiklorida
g	-	Gram
$\text{H}^+$	-	Ion hidroksida
$\text{H}_2\text{CO}_3$	-	Asid karbonik
$\text{H}_2\text{O}$	-	Air suling
$\text{H}_2\text{SO}_4$	-	Asid sulfurik
HCl	-	Asid hidroklorik
$\text{HNO}_3$	-	Asid nitrik
IR	-	Infra merah ( <i>Infra Red</i> )
K	-	Konkrit
KCl	-	Kalium klorida
kg	-	Kilogram
M	-	Molar
MR	-	Mortar
m	-	Meter



ml	-	Mililiter
mm	-	Milimeter
M <sup>n+</sup>	-	Ion mangan
MPa	-	Megapaskal
mV	-	Milivolt
N	-	Newton
NaCl	-	Natrium klorida
NaOH	-	Natrium hidroksida
nm	-	Nanometer
O <sub>2</sub>	-	Oksigen
OH	-	Hidroksil
OH <sup>-</sup>	-	Ion hidroksil
OR	-	Alkoksida
OTDR	-	<i>Optical time-domain reflectometry</i>
PC	-	Polikarbonat
PCS	-	<i>Plastic clad silica</i>
PE	-	Polietilena
PEG	-	Polietilena glikol
PES	-	Polietilsulfonat
pH	-	Potensial hidrogen
PHEME	-	Poli (hidroksietil metakrilat)
PI	-	Poliimida
PMMA	-	Polimetilmetakrilat
PS	-	Polistirena
PTFE	-	Poli (tetrafloroetilena)
PVC	-	Polivinilklorida
PVI	-	Polivinilimidazol
PVP	-	Poli (vinilpirodidon)
ROH	-	Alkohol
Si	-	Silika
Si(OH) <sub>4</sub>	-	Silikon hidroksida
SiO <sub>2</sub>	-	Silikon oksida
SX	-	Silizan
TEOS (Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> )	-	Tetraetilortosilikat
μm	-	Mikrometer
%	-	Peratus

**SENARAI LAMPIRAN**

<b>LAMPIRAN</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
A.	PERCUBAAN LARUTAN SILIKA SOL-GEL	116
B.	PENGESAN KARAT SERABUT OPTIK BAGI SAMPEL BERTETULANG TUNGGAL	118
C.	KONKRIT BERTETULANG SELARI YANG DIRENDAM DALAM AIR SULING SELAMA 45 HARI	126
D.	KONKRIT BERTETULANG SELARI YANG DIRENDAM DALAM LARUTAN NATRIUM KLORIDA DENGAN KEPEKATAN 10% SELAMA 45 HARI	131
E.	KONKRIT BERTETULANG SELARI YANG DIRENDAM DALAM LARUTAN NATRIUM KLORIDA DENGAN KEPEKATAN 20% SELAMA 45 HARI	136
F.	KONKRIT BERTETULANG SELARI YANG DIRENDAM DALAM LARUTAN NATRIUM KLORIDA DENGAN KEPEKATAN 30% SELAMA 45 HARI	143

G.	KONKRIT BERTETULANG SELARI YANG DIRENDAM DALAM LARUTAN NATRIUM KLORIDA DENGAN KEPEKATAN 40% SELAMA 45 HARI	150
H.	NILAI VOLTAN KELUARAN BAGI SAMPEL KONKRIT DAN MORTAR YANG DIRENDAM DALAM LARUTAN ASID	155

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Kajian**

Konkrit bertetulang kerap digunakan dalam industri pembinaan seiring dengan perkembangan ekonomi sesebuah negara. Perkembangan sektor binaan yang pesat di negara ini telah menyebabkan konkrit bertetulang digunakan secara meluas sebagai bahan binaan di antaranya untuk pembinaan jambatan, lapangan terbang, landasan kereta api, empangan dan juga bangunan. Hampir keseluruhan bangunan di dunia menggunakan konkrit bertetulang sebagai bahan utamanya. Penggunaannya sangat meluas kerana kos pembinaan yang ekonomi, mudah disediakan dan sesuai dalam pelbagai persekitaran.

Antara kelebihan konkrit bertetulang adalah dapat menahan beban mampatan dan tegangan dengan baik, sebagai bahan penebat, dapat digabungkan dengan pelbagai kemas dan kalis air. Kebiasaannya kekuatan mampatan digunakan untuk mendefinisikan kekuatan konkrit sedangkan kekuatannya digalas sepenuhnya oleh tetulang yang ditanamkan di dalam konkrit tersebut. Oleh itu, perubahan kualiti konkrit secara amnya diukur oleh perubahan kekuatan mampatan dan tegangannya.

Masalah ketahananlasakan konkrit ini merupakan masalah yang sangat serius kerana ianya sangat berkait rapat dengan kekuatan dan keupayaan konkrit. Apabila konkrit mengalami kemerosotan, keupayaannya untuk menanggung beban berkurangan sehingga menyebabkan kegagalan pada struktur.

Kualiti konkrit yang baik dengan sifat ketahanlasakannya yang tinggi dihasilkan dengan mengambilkira komposisi bahan-bahan yang digunakan iaitu simen, pasir, batu baur mahupun air, rekabentuk campuran seperti nisbah air-simen atau pasir-simen, cara kerja seperti menggaul, mengangkut dan menuang konkrit. Selain itu, prosedur untuk menghasilkan konkrit seperti proses pemadatan dan pengawetan juga perlu diambil kira.

Apabila semua bahan yang digunakan baik dan cara kerja yang dilakukan juga baik, ini tidak bermakna bahawa konkrit tersebut bebas daripada kerosakan. Hayat ketahanlasakan konkrit adalah terhad kerana sifat ketahanan konkrit semakin susut berikutan adanya agen-agen kerosakan yang mengancam jangka hayat perkhidmatan sesuatu struktur **[Idrissi and Limam, 2003]**.

Banyak faktor yang mengurangkan kekuatan konkrit dan mempengaruhi tempoh hayat perkhidmatannya. Faktor-faktor ini wujud bukan akibat dari bahan-bahan campuran konkrit itu sendiri tetapi juga akibat agen-agen yang terdapat di persekitaran konkrit tersebut. Di antara faktor-faktor tersebut **[Richardson, 2002]** adalah:

- a. Beban Sasulan (*Accidental Loadings*)
- b. Tindakbalas Bahan Kimia (*Chemical Reactions*)
- c. Kesilapan Pembinaan (*Construction Errors*)
- d. Kesilapan Rekabentuk (*Design Errors*)
- e. Pengaratan Tetulang (*Corrosion of Embedded Steel*)
- f. Hakisan (*Erosion*)
- g. Penyejukbekuan dan Pencairan (*Freezing and Thawing*)
- h. Pengenapan dan Pergerakan (*Settlement and Movement*)
- i. Pengecutan (*Shrinkage*)
- j. Perubahan Suhu (*Temperature Changes*)
- k. Luluhawa (*Weathering*)

Faktor yang paling besar pengaruhnya dalam kemerosotan konkrit adalah pengaratan tetulang. Masalah pengaratan pada tetulang merupakan masalah utama yang menyebabkan kerosakan konkrit terbesar di dunia pada masa ini. Sebahagian

masalah pengaratn dalam konkrit bertetulang yang merosakkan keseluruhan bangunan merupakan satu masalah yang menarik kerana memerlukan kos yang tinggi dan kemahiran yang khusus untuk memperbaikinya. Sebagai contoh, Amerika Syarikat menganggarkan sebanyak 150 bilion dolar dan United Kingdom memerlukan sebanyak 616.5 juta pound sterling untuk menangani masalah kerosakan beberapa jambatan akibat daripada pengaratn tetulang setiap tahun *[Broomfield, 1997]*.

Pengaratn merupakan suatu proses elektrokimia di mana keluli mengalami tindak balas dengan unsur kimia lainnya dalam suatu persekitaran untuk membentuk suatu sebatian. Tetulang keluli mempunyai kecenderungan untuk berkarat jika ianya berada di dalam persekitaran yang lembap. Serangan bahan kimia yang menyebabkan berlakunya pengaratn pada konkrit tetulang adalah:

- a. Proses Pengkarbonatan (*Carbonation*)
- b. Serangan Klorida (*Chloride Attack*)

Pengaratn yang boleh terbentuk sepanjang tetulang atau pada bahagian tertentu mempunyai dua kesan, iaitu mengurangkan luas keratan rentas tetulang dan membentuk ketakselajaran pada permukaan tetulang. Keadaan ini mengurangkan kekuatan tegangan tetulang.

## 1.2 Kenyataan Masalah

Pengaratn tetulang tidak hanya mengakibatkan penurunan kekuatan mekanik tetulang tetapi karat yang dihasilkan memberikan tekanan yang tidak dapat ditanggung oleh had ubah bentuk plastik konkrit (*Limited Plastic Deformation*) sehingga mengakibatkan keretakan. Keadaan ini melemahkan ikatan dan tambatan antara konkrit dan tetulang. Lemahnya ikatan dan tambatan ini memberi kesan terhadap kebolehhidmatan dan kekuatan muktamad elemen konkrit dalam struktur *[Cabrerera, 1996]*.

Pengaratian yang berlaku pada tetulang terjadi akibat dari tindakan persekitaran mahupun akibat kelemahan pengawasan semasa kerja pembinaan dijalankan. Konkrit sebenarnya mempunyai kemampuan yang tinggi untuk melindungi tetulang daripada pengaratian kerana simen pada konkrit terhidrat dan menghasilkan alkali iaitu  $\text{Ca(OH)}_2$  yang tinggi pada air liangnya dengan pH melebihi 13.5 [Roy et al., 1998]. Dengan kealkalian konkrit yang tinggi tersebut, tetulang membentuk suatu lapisan pasif di permukaannya. Lapisan pasif ini melindungi tetulang dari sebarang agen yang merosakkannya. Tetapi kerana pengaruh alam sekitar, pH konkrit menurun dan merosakan lapisan pasif tetulang.

Pengaratian tetulang boleh mengakibatkan struktur gagal apabila keadaan sudah terlalu teruk. Jika dibuat suatu sensor dalam struktur yang boleh mengesan lebih awal pengaratian yang berlaku maka pertimbangan awal boleh dilakukan dan kos perbaikan struktur dapat dikurangkan. Serabut optik banyak digunakan dalam industri telekomunikasi dan sangat berjaya. Seiring dengan perkembangan zaman, telah dicuba suatu bentuk pengesan yang dikenali dengan Pengesan Serabut Optik (*Fibre Optic Sensor*).

Pengesan ini menggunakan bahantara serabut optik iaitu sejenis kabel yang kebanyakannya diperbuat dari kaca ( $\text{SiO}_2$ ) dan plastik. Penghantaran maklumat pula menggunakan cahaya. Sebenarnya penggunaan serabut optik sebagai bahantara penghantaran maklumat telah diberi perhatian yang serius sejak tahun 1960-an lagi, terutama pada bidang telekomunikasi. Perkembangan dalam bidang optoelektronik pula telah mempercepatkan lagi penggunaan serabut optik dalam telekomunikasi. Kini penggunaan serabut optik tidak terbatas pada bidang tersebut sahaja bahkan telah berkembang ke bidang-bidang lain seperti ketenteraan, perubatan, perindustrian mahupun bidang kejuruteraan awam [Rosly, 1990].

### **1.3 Objektif Kajian**

Pengesan serabut optik adalah satu sistem yang tidak terpengaruh oleh medan elektromagnetik. Ianya sangat mudah dimasukkan ke dalam struktur kerana saiznya

yang kecil. Keadaannya itu menjadi daya tarikan tersendiri bagi serabut optik untuk digunakan sebagai pengesan pengaratan tetulang dalam struktur konkrit dan pengesan pH air liang konkrit.

Penggunaan pengesan serabut optik tersebut perlu diteliti dan dikembangkan lagi bagi memastikan ianya benar-benar dapat digunakan dengan baik dan sempurna tanpa menimbulkan sebarang kesan sampingan kepada struktur terutama sekali kepada kekuatan dan ketahananlasakan konkrit itu sendiri. Oleh itu, kajian ini perlu dilakukan untuk mengetahui kebolehan serabut optik sebagai pengesan dalam konkrit bertetulang. Objektif kajian ini adalah:

1. Menentukan keberkesanan pengesan karat serabut optik dalam konkrit bertetulang berganda
2. Mengenalpasti perubahan nilai pH dalam konkrit dengan pengesan pH serabut optik bersalut sol-gel

Rangkaian pengesan serabut optik bagi struktur konkrit yang kompleks dengan tetulang-tetulang di dalamnya dibuat untuk mengetahui keadaan struktur tersebut apabila berlaku pengaratan. Perlu dipastikan bahawa serabut optik yang ditanamkan ke dalam konkrit dapat mengesan perubahan ciri-ciri struktur tersebut. Alat-alat yang digunakan seboleh-bolehnya mudah dibangunkan, mudah dipasang dan digunakan di tapak.

#### **1.4 Skop Kajian**

Secara umum, beberapa kajian menggunakan kaedah ujian tanpa musnah (*Non-destructive Method*) telah dijalankan untuk mengesan pengaratan pada tetulang menggunakan pengesan serabut optik, antara lain seperti yang dilakukan oleh *Siaw [2003]*. Beliau berjaya membangunkan pengesan serabut optik yang mengesan pengaratan tetulang dalam simen mortar bertetulang tunggal dan mengesan kesan awal dari serangan asid dan sulfat pada simen mortar.



Kajian ini merupakan lanjutan dari kajian yang telah dilakukan oleh *Siaw [2003]*. Terdapat dua jenis pengesan serabut optik yang dibangunkan iaitu seperti berikut:

1. Pengesan karat serabut optik

Pengesan ini digunakan untuk mengesan pengamatan tetulang dalam konkrit bertetulang tunggal dan konkrit bertetulang selari. Konkrit bertetulang selari merupakan gambaran struktur sebenar di tapak. Sampel konkrit direndam dalam larutan NaCl agar ion-ion klorida masuk lebih cepat ke dalam konkrit.

2. Pengesan pH serabut optik

Pengesan ini digunakan untuk mengesan perubahan nilai pH larutan dan perubahan nilai pH air liang konkrit. Sampel konkrit direndam dalam beberapa jenis larutan asid iaitu asid asetik (*Acetic Acid*), asid suksinik (*Succinic Acid*), asid sulfurik (*Sulphuric Acid*) dan asid nitrik (*Nitric Acid*) untuk mempercepat proses penurunan nilai pH pada konkrit.

Cara kerja pengesan ini adalah dengan mengukur banyaknya nilai voltan keluaran yang disebabkan cahaya yang melalui serabut optik atau perbezaan nilai voltan yang dipancarkan oleh sumber cahaya dengan nilai voltan yang diterima oleh alat pengesan. Perbezaan nilai voltan tersebut menunjukkan perubahan ciri dalam sampel konkrit.

Kedua pengesan yang dibangunkan berpandukan kepada dua kaedah iaitu seperti berikut:

1. Kaedah Intrinsik

Kaedah ini digunakan untuk membuat pengesan karat serabut optik. Serabut optik tanpa penyalut ditanamkan ke dalam sampel konkrit.

## 2. Kaedah Evanesen

Kaedah ini digunakan untuk membuat pengesan pH serabut optik. Bahagian serabut optik yang tertanam dalam sampel konkrit dibuang penyalutnya dan digantikan dengan silika sol-gel sebagai lapisan pengesan.

Kajian yang dilakukan ini masih baru di Malaysia, beberapa kajian literatur dan kerja-kerja percubaan di makmal pada peringkat awal banyak dilakukan untuk memastikan keberkesanan penggunaan pengesan serabut optik dalam struktur konkrit bertetulang.

Oleh itu, bagi memenuhi objektif kajian, ada beberapa skop yang harus dipenuhi iaitu sebagai berikut:

1. Pengesan karat serabut optik merupakan pengesan multipleks (*Multiplexing Sensor*) yang terdiri dari lima sensor yang disusun secara selari.
2. Untuk mengkaji pengesan karat serabut optik, proses pengamatan tetulang dalam konkrit dipercepat dengan merendam sampel konkrit dalam larutan NaCl selama 45 hari.
3. Untuk mengkaji pengesan pH serabut optik, penurunan pH air liang dalam konkrit dipercepat dengan merendam sampel konkrit dalam larutan asid asetik, asid suksinik, asid sulfurik dan asid nitrik selama 30 hari. Bagi ujikaji ini pula, selain sampel konkrit juga disediakan sampel mortar sebagai bahan perbandingan.
4. Semua ujikaji yang dilakukan menggunakan serabut optik tanpa penyalut.

## 1.5 Kepentingan Kajian

Sistem pengesanan sangat penting bagi struktur untuk mengetahui keadaan struktur. Dengan demikian dapat mengurangkan kos perawatan operasi (*Operational Maintenance Cost*) secara keseluruhan dan menentukan kaedah yang berkesan bagi memperbaiki struktur sebelum rosak teruk. Tanpa adanya pengesanan yang dapat mengesan keadaan struktur pada peringkat awal, kerja-kerja perawatan pasti terus dilakukan dari masa ke semasa bagi mengelak berlakunya kerosakan pada struktur konkrit bertetulang.

Pengesanan serabut optik merupakan salah satu teknologi yang sangat baik digunakan untuk mengesan keadaan struktur. Ianya juga merupakan salah satu bahan yang sangat unik yang digunakan dalam bidang kejuruteraan awam terutama kejuruteraan struktur.

Kajian ini perlu dilakukan untuk memperkenalkan dan mengembangkan konsep baru dalam teknologi pengujian iaitu penggunaan serabut optik dalam struktur konkrit bertetulang terutama dalam menentukan perubahan sifat ketahananlasakan konkrit akibat pengajaran. Diharapkan kajian ini dapat menyumbang suatu yang bermanfaat bagi perkembangan teknologi kejuruteraan awam khususnya dan bidang kejuruteraan lain pada umumnya.

## 1.6 Paparan Tesis

Tesis ini dibahagi kepada enam bab yang terdiri daripada bab pengenalan, kajian literatur, metodologi kajian, pengesanan karat serabut optik, pengesanan pH serabut optik, kesimpulan dan cadangan, diikuti oleh bahagian rujukan dan lampiran.

Bab satu iaitu bab pendahuluan mengandungi latar belakang kajian yang menerangkan faktor-faktor yang menyebabkan perubahan sifat ketahananlasakan konkrit, kenyataan masalah, objektif kajian yang dilakukan, skop untuk mencapai objektif kajian, dan kepentingan kajian.

Bab dua pula mengandungi kajian literatur yang memaparkan penjelasan tentang definisi konkrit dan konkrit bertetulang, ketahanan lasakan konkrit, serangan asid dan sulfat, pengaratan tetulang dalam konkrit, serangan klorida, pengkarbonatan, keretakan konkrit akibat pengaratan tetulang, serabut optik, penggunaan pengesan serabut optik dalam bidang kejuruteraan awam, pengesan karat serabut optik, pengesan pH serabut optik dan pengesan karat elektrokimia.

Bahan-bahan yang digunakan, cara menyediakan pengesan serabut optik dan penyediaan sampel, serta cara kerja secara keseluruhan dijelaskan secara terperinci dalam bab tiga iaitu bab metodologi.

Bab empat iaitu bab pengesan karat serabut optik. Bab ini mengandungi data-data primer dan sekunder yang diperolehi daripada kerja-kerja makmal, analisis data-data serta perbincangan mengenai pengesan karat yang dibangunkan menggunakan serabut optik.

Bab 5 iaitu bab pengesan pH serabut optik. Bab ini mengandungi data-data primer dan sekunder yang juga diperolehi daripada kerja-kerja makmal, analisis data-data serta perbincangan mengenai pengesan pH dalam larutan dan konkrit yang dibangunkan menggunakan serabut optik.

Bab terakhir dalam tesis ini adalah bab enam iaitu kesimpulan dan cadangan. Bab ini memuatkan kesimpulan secara umum mengenai kajian yang telah dilakukan berdasarkan penggunaan serabut optik sebagai pengesan dalam struktur konkrit. Bab ini juga membincangkan cadangan-cadangan yang mungkin bermanfaat bagi kajian-kajian yang berkaitan pada masa yang akan datang.