

**PERILAKU MEKANIK BETON YANG MENGGUNAKAN
AIR LAUT**

***MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE USING
SEA WATER***

**MANSYUR
P2303211003**



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2013

**PERILAKU MEKANIK BETON YANG MENGGUNAKAN
AIR LAUT**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

MANSYUR

kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Mansyur

Nomor mahasiswa : P2303211003

Program studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat di buktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 30 Juli 2013

Yang menyatakan

Mansyur

PRAKATA

Assalamu Alaikum Waramatullahi Wabarakatu, segala puji bagi Allah SWT, karena dengan rahmat dan kehendak-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tesis dengan judul “**Perilaku Mekanik Beton yang Menggunakan Air Laut** “.Berbagai kendala dan permasalahan yang menyertai selama penyusunan tesis ini, namun dengan bantuan berbagai pihak sehingga dapat selesai.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini tidak akan selesai tanpa adanya berbagai bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST. M.Eng. sebagai ketua komisi penasehat dan Dr. Eng. Andi Arwin Amiruddin, ST. MT. sebagai anggota komisi yang telah meluangkan waktunya dalam memotivasi dan membimbing penulis mulai persiapan penulisan, penelitian sampai dengan penyelesaian tesis ini.
2. Prof. Dr.-Ing. Herman Parung, M.Eng; Dr. Ir. H. Nur Ali. MT; Dr. Eng. Tri Harianto, ST.,MT selaku tim penguji yang telah memberikan masukan dalam perbaikan penulisan tesis ini.
3. Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil yang telah membantu penulis selama pendidikan.

4. Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna S, MS.M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil yang telah membantu penulis selama pendidikan.
5. Para dosen dan staff yang telah membantu penulis selama mengikuti pendidikan pada Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar.
6. Orang tua tercinta Ayahanda Abdul Rasyid, Ibunda Intang, dan keluarga tercinta yang terus bersabar memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
7. Istri tercinta dan keluarga yang selalu memberikan doa, semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
8. Teman-teman seperjuangan Teknik Sipil Struktur 2011 (Teguh Hilmansyah, Bu Hartini, Muh. Sofyan, Mustakim, Pak Hamsyah, Pak Sandy, Pak Hendrik, Pak Safar, Pak Raun, Muharrar dan Fatriady) serta Pascasarjana Teknik Sipil angkatan 2011 pada umumnya.
9. Pak Sudirman Sitang, ST. selaku staf di Laboratorium Struktur dan Bahan yang telah banyak memberikan masukan dalam proses penelitian ini. Adik Rahmat dan Andi Hamka, yang telah membantu penulis dan semua pihak yang namanya tidak tercantum tetapi telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini, semoga Allah SWT membalasnya dengan amalan yang setimpal.

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan dan LPPM Universitas Hasanuddin dengan skema penelitian MP3EI, untuk itu penulis

mengucapkan terima kasih atas bantuannya sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.

Akhir kata penulis mengharapkan tesis ini dapat berguna bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang konstruksi beton air laut.

Makassar, Juli 2013

Mansyur

ABSTRAK

MANSYUR. *Perilaku Mekanik Beton yang Menggunakan Air Laut* (dibimbing oleh M. Wihardi Tjaronge dan A. Arwin Amiruddin).

Penelitian ini bertujuan mengetahui perbandingan kuat tekan beton yang menggunakan air laut dan air tawar dengan faktor air-semen 0,37.

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan membuat benda uji beton silinder ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Jumlah benda uji masing-masing 32 buah untuk beton yang menggunakan air laut dan beton yang menggunakan air tawar. Perawatan benda uji masing-masing menggunakan air laut dan air tawar sesuai dengan jenis air pencampurannya dengan perendaman umur 1, 3, 7 dan 28 hari. Pengujian mekanik beton dilakukan uji kuat tekan dan elastisitas, sedangkan pengujian mikrostruktur beton dengan menggunakan x-ray diffraction (XRD) dan scan electron microscopy (SEM).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada umur 28 hari kuat tekan beton air laut sebesar 44,88 MPa, sedangkan beton air tawar sebesar 44,03 MPa. Perbedaan kuat tekan kedua jenis beton tidak signifikan. Hasil pengujian mikrostruktur umur 28 hari menunjukkan bahwa pada beton air laut terbentuk garam friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 7,71%, tobermorite ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 58,66% dan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 6,18%. Pada beton air tawar terbentuk tobermorite ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 51,35%, dan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 22%. Sedangkan untuk garam friedel pada beton air tawar tidak terbentuk karena tidak ada unsur klorida yang saling bereaksi dengan kalsium hidroksida.

kata kunci : kuat tekan, elastisitas, mikrostruktur.

ABSTRACT

MANSYUR. *Mechanical Behavior Of Concrete By Using Sea Water.*
(Supervised by M. Wihardi Tjaronge dan A. Arwin Amiruddin).

This study aims to compare the compressive strength of concrete using sea water and fresh water with water cement ratio of 0.37.

An experimental research was conducted by making specimens of concrete cylinder with a diameter of 150 mm and height of 300 mm. The study used specimens of concrete using sea water and fresh water. There were 32 specimens for each kind of concrete. The treatment of each specimen used sea water and fresh water in accordance with the type of mixing water. The immersion periods were 1, 3, 7 and 28 days. Mechanical testing of concrete was conducted by testing the compressive strength and elasticity, while the testing of concrete microstructure was conducted by using X-Ray Diffraction (XRD) and Scan Electron Microscopy (SEM).

The results revealed that in the 28-day immersion period, the compressive strength values of the sea water concrete and fresh water concrete were 44.88 MPa and 44.03 Mpa respectively. The difference of compressive strength in the two types of concrete was not significant. The result of microstructure test in the 28-day period revealed that in the sea water concrete, there was a formation of Friedel's salt ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) of 7.71%, tobermorite ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) of 58.66% and calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) of 6.18%. In the fresh water concrete, there was a formation of tobermorite ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) of 51.35%, and calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) of 22%. There was no formation of Friedel's salt in the fresh water concrete because there was no mutual reaction between chloride and calcium hydroxide elements.

Keywords: compressive strength, elasticity, microstructure.

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xvii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian	4
E. Batasan Masalah	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Penelitian Sebelumnya	6
B. Teori dan Konsep	9

1. Material penyusun beton	9
2. Pengaruh klorida air laut pada beton	15
3. Peranan hidrasi semen dalam pengikatan klorida	16
4. Ettringite	18
5. Sifat mekanik beton	19
6. Air laut	22
7. Pengamatan mikrostruktur beton dengan menggunakan XRD dan SEM	23
C. Kerangka Pikir	33
III. METODE PENELITIAN	34
A. Tempat dan Waktu Penelitian	34
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data	34
C. Alat dan Bahan Penelitian	35
D. Prosedur Penelitian	36
E. Diagram Alir Penelitian	38
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	39
A. Hasil Penelitian	39
1. Karakteristik agregat	39
2. Hasil pengujian kuat tekan	43
3. Hasil pengujian elastisitas	46
4. Hasil pengujian mikrostruktur beton	48
B. Pembahasan	50
1. Karakteristik mikrostruktur beton yang menggunakan air laut	50

2. Karakteristik mikrostruktur beton yang menggunakan air tawar	55
3. Batasan klorida pada beton yang menggunakan air laut	59
V. KESIMPULAN DAN SARAN	61
A. Kesimpulan	61
B. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
DAFTAR LAMPIRAN	65

DAFTAR TABEL

nomor		halaman
1.	Syarat fisika semen <i>Portland</i> komposit	9
2.	Hidrasi kalsium silika	10
3.	Hidrasi alumina	12
4.	Presentase kandungan senyawa pada mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut	26
5.	Komposisi atom dan senyawa kimia pada mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut	29
6.	Komposisi kimia air laut pantai Barombong	35
7.	Jenis pengujian dan jumlah benda uji	36
8.	Metode pengujian	37
9.	Pengamatan mikrostruktur dengan menggunakan XRD dan SEM	37
10.	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus pantai Barombong	39
11.	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus sungai Jeneberang	41
12.	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar (batu pecah)	42
13.	Hasil pengujian kuat tekan pada beton air laut dan beton air tawar	44

14.	Hasil pengujian elastisitas pada beton air laut dan beton air tawar	46
15.	Hasil pengujian mikrostruktur beton air laut	48
16.	Hasil pengujian mikrostruktur beton air tawar	49
17.	Hubungan waktu perendaman dengan kalsium hidroksida	51
18.	Hubungan waktu perendaman dengan garam <i>Friedel</i>	52
19.	Hubungan waktu perendaman dengan <i>tobermorite</i>	54
20.	Hubungan waktu perendaman dengan kalsium hidroksida	56
21.	Hubungan waktu perendaman dengan <i>tobermorite</i>	57
22.	Data perbedaan kandungan mikrostruktur beton	59

DAFTAR GAMBAR

nomor		halaman
1.	Skema dasar percobaan XRD	25
2.	Grafik hasil pengujian XRD mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut	26
3.	Grafik hasil pengujian SEM untuk mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut	28
4.	Hasil foto SEM pada mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut	29
5.	Kerangka pikir	33
6.	Bagan alir penelitian	38
7.	Grafik gradasi agregat halus pantai Barombong	40
8.	Grafik gradasi agregat halus sungai Jeneberang	41
9.	Grafik gradasi agregat kasar (batu pecah)	43
10.	Peningkatan kuat tekan pada beton air laut dan beton air tawar	44
11.	Perbandingan kuat tekan pada beton air laut dan beton air tawar umur 1, 3, 7 dan 28 hari	45
12.	Peningkatan modulus elastisitas beton air laut dan beton air tawar	47
13.	Diagram batang modulus elastisitas beton air laut dan beton air tawar	47
14.	Model regresi linier hubungan waktu perendaman dengan pembentukan kalsium hidroksida	51

15. Model regresi linier hubungan waktu perendaman dengan pembentukan garam *Friedel* 53
16. Regresi linier hubungan waktu perendaman terhadap pembentukan *tobermorite* 55
17. Model regresi linier hubungan waktu perendaman terhadap pembentukan kalsium hidroksida 56
18. Regresi linier hubungan waktu perendaman terhadap pembentukan *tobermorite* 58

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan Keterangan
AFm	Aluminoferrit monosulfat
Aft	Aluminoferrit tetrasulfat
ASTM	American Standard Test Material
BFS	Blast Furnace Slag
CaO	Kapur/Batu Kapur
Ca(OH) ₂	Kalsium Hidroksida
Cl	Klorida
C-S-H	Tobermorite
C ₂ S	Dicalcium Silikat
C ₃ A	Tricalcium Aluminat
C ₄ AF	Tetrakalsium Alumino Ferrit
C ₃ A 3CaSO ₄ .10H ₂ O	AFm
C ₃ A. 3CaSO ₄ .32H ₂ O	Aft
C ₃ S	Tricalcium Silikat
D	Diameter benda uji silinder
E _c	Modulus elastisitas beton
FAS	Faktor air semen
Fc'	Kuat tekan
Fcr'	Kuat tekan target
L	Panjang benda uji silinder

MPa	Mega pascal, satuan kuat tekan
MgSO ₄	Magnesium sulfat
NaCl	Natrium Klorida
No	Nomor
OPC	Ordinary Portland Cement
SEM	Scanning Electron Microscopy
SK SNI	Standar Konstruksi Standar Nasional Indonesia
P	Beban Maksimum
PCC	<i>Portlad Cement Composite</i>
SiO ₂	Silika Oksida
XRD	X-Ray Diffraction
%	Persen
σ	Kuat tekan beton (kg/cm ²)
3CaO.Al ₂ O ₃ .CaCl.10H ₂ O	Garam Friedel

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton merupakan perpaduan dari bahan penyusunnya yang terdiri dari semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Untuk mendapatkan campuran beton yang baik perlu adanya pengembangan pemilihan material yang layak komposisinya sehingga diperoleh beton yang efisien. Pencampuran dari bahan-bahan penyusun tersebut akan menghasilkan suatu adukan beton yang akan mudah dicetak sesuai dengan wadah dan bentuk yang diinginkan. Sifat yang paling penting dalam beton adalah kuat tekannya, sifat ini biasanya berhubungan dengan sifat-sifat lainnya, artinya bila kuat tekannya tinggi maka sifat yang lainnya juga baik. Sedangkan kuat tekan tergantung dari faktor air semen, gradasi batuan, bentuk batuan, ukuran butir serta umur beton.

Salah satu bahan penyusun pembuatan beton adalah air yang salah satu syaratnya adalah air yang dapat diminum. Dalam fenomena sekarang ini kebutuhan air yang memenuhi syarat dalam penggunaannya sudah mulai kekurangan terutama pada kota-kota besar atau pada negara-negara maju yang mana air bersih hanya diprioritaskan pada

kebutuhan primer saja. Dalam siklus kehidupan ini, dunia teknik sipil terutama pada negara maju telah memikirkan tentang tantangan kedepan akan berkurangnya potensi air bersih (air tawar) yang dapat digunakan sebagai bahan pencampuran beton, terlebih lagi pembangunan infrastruktur semakin meningkat yang seiring dengan penggunaan air bersih yang dibutuhkan juga semakin banyak. Data dari PBB dan Organisasi Meteorologi Dunia memprediksi sekitar 5 Milyar orang akan kekurangan air bersih bahkan air minum (*Conference on Our World in Concrete and Structure di Singapura 2011*). Otsuki dkk. (2011), dalam konferensi tersebut juga mengatakan bahwa di tahun 2025 setengah dari umat manusia akan tinggal di daerah yang kekurangan air bersih (air tawar).

Negara Indonesia juga merupakan negara kepulauan dalam arti bahwa disetiap titik lokasi, terdapat bangunan-bangunan yang terletak didaerah pantai seperti bangunan dermaga pelabuhan, talut, dan bangunan lain yang sering kita temukan sesuai dengan kebutuhan aktivitas masyarakat. Dalam kondisi seperti itu, tidak menutup kemungkinan bahwa kebutuhan akan air bersih sangat sulit untuk dijangkau dan bahkan terdapat beberapa daerah yang terisolir dengan air bersih. Fakta yang terjadi sekarang ini, ada beberapa wilayah dikepulauan

sering menggunakan air yang terkontaminasi dengan klorida tinggi (air laut) bahkan menggunakan pasir pantai untuk pencampuran beton.

Dari fenomena tersebut diatas, dengan melihat potensi sumber air laut yang begitu melimpah maka ada pemikiran untuk menggunakan air laut sebagai bahan pencampuran beton, yang terkhusus pada lokasi-lokasi bangunan yang sering berinteraksi dengan air laut.

Dalam kajian ilmiah ini, penulis akan meninjau seberapa besar pengaruh sifat mekanis beton serta melihat pengaruh hidrasi semen yang terkontaminasi dengan natrium klorida.

B. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana karakteristik beton yang menggunakan air laut sebagai air pencampur dan air perawatan.
2. Bagaimana pengaruh klorida yang terkandung dalam air laut terhadap pembentukan kalsium hidroksida dan garam *Friedel* pada beton.
3. Bagaimana kandungan klorida dalam air laut Barombong yang digunakan sebagai air pencampur terhadap batasan klorida yang disyaratkan.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Untuk menganalisa pengaruh kuat tekan dan elastisitas beton silinder yang dihasilkan dengan menggunakan air laut sebagai air pencampur dan air perendaman.
2. Untuk menganalisa pembentukan kalsium hidroksida, garam *Friedel*, dan tobermorite pada beton yang menggunakan air laut dan air tawar terhadap umur perendamannya.
3. Untuk menganalisa batasan kandungan klorida yang digunakan pada beton yang menggunakan air laut sebagai air pencampur dan air perendaman.

D. Manfaat Penelitian

Diharapkan dalam penelitian ini bermanfaat untuk :

1. Dapat dijadikan sebagai acuan dan informasi para peneliti dalam mengembangkan penelitian yang berhubungan dengan pencampuran beton dengan menggunakan air laut.
2. Dapat diketahui karakteristik beton dengan menggunakan air laut sebagai air pencampuran dan air perawatan.
3. Sebagai referensi bagi pekerja konstruksi yang berada pada daerah yang terisolir air bersih untuk mempertimbangkan penggunaan air laut.

E. Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan sesuai dengan sasaran yang ingin dicapai, maka penelitian ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Membuat dua jenis beton silinder yaitu beton yang menggunakan air laut dari Barombong, pasir dari pantai Barombong, batu pecah dari sungai Bili-Bili dan beton yang menggunakan air kran (air tawar), pasir dari sungai Jeneberang, batu pecah dari sungai Bili-Bili.
2. Beton yang menggunakan air laut dan pasir pantai, perendamannya menggunakan air laut. Sedangkan beton yang menggunakan air tawar dan pasir sungai perendamannya menggunakan air tawar.
3. Kedua jenis beton menggunakan semen *Portland* komposit merek Tonasa dalam pencampuran beton.
4. Faktor air-semen pada kedua jenis beton digunakan 0,37.
5. Pengujian mekanik dilakukan pada umur 1, 3, 7 dan 28 hari.
6. Pengamatan mikrostrukturnya dilakukan dengan *XRD* dan *SEM*.
7. Parameter penelitian untuk pengujian mikrostruktur dengan menggunakan *XRD* adalah gel C-S-H (*tobermorite*), Ca(OH)_2 (*Portlandite*), dan garam *Friedel*. Sedangkan persentase klorida diamati dengan pengujian *SEM*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Sebelumnya

Pencampuran beton dengan menggunakan air laut sering dilakukan oleh masyarakat yang berada pada lokasi yang terisolir dengan air bersih (air tawar). Penelitian tentang pencampuran beton dengan menggunakan air laut ini pun sering dilakukan oleh para peneliti. Mohammed dkk. (2004), melakukan penelitian tentang kinerja campuran beton dengan menggunakan air laut di lingkungan pasang surut. Dalam penelitian ini mengamati perilaku kuat tekan, penetrasi klorida dan korosi baja pada beton dengan pola pencampuran menggunakan air laut dan air tawar. Jenis semen yang digunakan dalam melakukan investigasi seperti semen *Portland* biasa, terak semen abu terbang, semen *Portland* dengan panas hidrasi sedang, dan semen *Portland* dengan kekuatan awal tinggi.

Hasil Penelitian menunjukkan bahwa campuran beton dengan air laut menunjukkan keuntungan pada kekuatan awal yang tinggi. Setelah 20 tahun diekspos, tidak ada perbedaan yang signifikan pada kuat tekan dalam pencampuran beton yang menggunakan air laut dan air tawar. Jumlah awal klorida (akibat penggunaan air laut) dapat menyebabkan inisiasi korosi pada tulangan baja yang memiliki rongga pada beton bertulang setelah pengecoran beton. Penggunaan air laut menghasilkan lubang korosi yang

lebih dalam dibandingkan dengan menggunakan air tawar (*Cement and Concrete Research* 34 (2004) 593–601).

Penelitian tentang penggunaan air laut juga dilakukan oleh Otsuki, dkk. (2011), melakukan penelitian tentang kemungkinan penggunaan air laut sebagai air pencampur pada beton. Dalam penelitian ini menggunakan OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan semen BFS (*Blast Furnace Slag*) yang dicampur dengan air tawar dan air laut dalam rangka membandingkan durabilitas beton. Spesimen dibuat dengan pasta semen BFS yang memiliki rasio pengganti BFS terhadap OPC adalah 70% dan rasio air semen adalah 0,5. Ukuran spesimen adalah 10×10×40 mm³. Hasilnya menunjukkan perbedaan daya tahan antara beton dicampur dengan air tawar dan dicampur dengan air laut tidak begitu banyak, tetapi perbedaan antara beton dengan OPC dan semen BFS sangat besar.

Dalam penelitian ini juga diperoleh pencampuran dengan air laut menurunkan jumlah pori-pori yang meningkatkan kuat tekan terhadap semen BFS dibandingkan dengan menggunakan air tawar. Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa penggunaan air laut aman untuk digunakan sebagai air pencampuran beton dengan ketentuan menggunakan semen BFS atau semen campur, bukan semen OPC, dan menggunakan inhibitor korosi atau diperkuat dengan stainless steel atau penguatan tahan korosi.

Dalam penelitian untuk beton berongga, Tjaronge dkk. (2011) meneliti pengaruh air laut pada kekuatan beton berongga yang

menggunakan semen *Portland* komposit dan serat *mikro monofilamen polypropylene*. Spesimen beton berongga direndam dalam air laut hingga 28 hari. Uji kuat tekan dan uji kuat lentur dilakukan pada 3, 7 dan 28 hari dalam rangka untuk menyelidiki perkembangan kekuatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan beton berpori dapat berkembang di air laut. Hal itu terungkap bahwa tidak ada efek yang cukup dari air laut pada proses hidrasi ketika beton berpori direndam dalam air laut. Ikatan baik terjadi antara pasta semen dan agregat kasar, sehingga dalam menahan beban tekan dan lentur memiliki kapasitas yang baik pada beton berongga (*Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts / APAC 2011*).

Penelitian tentang pengikatan klorida untuk berbagai jenis semen pada kontribusi hidrasi C-S-H dan AFm, telah dilakukan oleh Mien dkk. (2008). Studi ini meneliti pengikatan klorida isothermal dari berbagai jenis semen terutama menentukan kontribusi dari C-S-H dan hidrat AFm pada pengikatan isotherm klorida. Semen yang digunakan adalah Semen *Portland* Biasa (OPC), Semen Modifikasi (MC), Semen *Portland* Pengerasan-Cepat (RHC) dan Semen Portland Panas Rendah (LHC). Kandungan klorida total dan kandungan klorida bebas dianalisis oleh ASTM. Kandungan C-S-H, hidrat AFm dan garam *Friedel* ditentukan oleh analisa Difraksi Sinar-X *Rietveld* (XRD *Rietveld*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa OPC memiliki kapasitas pengikatan klorida tertinggi,

dan, LHC memiliki kapasitas pengikatan ion klorida terendah (*The 3rd ACF International Conference – ACF/VCA*).

B. Teori dan Konsep

1. Material penyusun beton

a. Semen Portland.

Syarat kimia untuk semen *Portland* komposit, kandungan SO_3 maksimum 4%, komposisi kimia yang lain sama dengan komposisi kimia semen *Portland*. Sedangkan syarat fisika semen *Portland* komposit dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Syarat fisika semen *Portland* komposit

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1.	Kehalusan dengan alat blaine	m^2/kg	Min.280
2.	Kekekalan bentuk dengan autoclave:		
	- Pemuai	%	Maks. 0,8
	- Penyusutan	%	Maks. 0,2
3.	Waktu pengikatan dengan alat vikat:		
	- Pengikatan awal	Menit	Min.45
	- Pengikatan akhir	Menit	Maks.375
4.	Kuat tekan:		
	- Umur 3 hari	Kg/cm^2	Min.125
	- Umur 7 hari	Kg/cm^2	Min.200
	- Umur 28 hari	Kg/cm^2	Min.250
5.	Pengikatan semu:		
	- Penetrasi akhir	%	Min.50
6.	Kandungan udara dalam mortar	% volume	Maks.12

(Sumber : SNI 15-7064-2004)

Klinker semen *Portland* mengandung empat senyawa kimia utama, yang disebut dengan mineral-mineral klinker yaitu :

1. C_3S atau $3CaO.SiO_2$ disebut Trikalsium silikat
2. C_2S atau $2CaO.SiO_2$ disebut Dikalsium silikat
3. C_3A atau $3CaO.Al_2O_3$ disebut Trikalsium aluminat
4. C_4AF atau $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ disebut Tetrakalsium aluminoferrit.

Biasanya, C_3S selesai terbentuk secara efektif pada suhu bahan sekitar $1.450^{\circ}C$ dalam jumlah yang besar, berbentuk butiran dengan dimensi yang sama. Butiran silika yang besar dapat menyebabkan terjadinya kelompok-kelompok kristal belite (C_2S). Setelah melewati semburan api, klinker itu mulai dingin, C_3A dan C_4AF yang dalam fase fluks, mulai mengkristal. C_3A berbentuk kristal persegi panjang, sedangkan C_4AF berupa larutan padat (Tjaronge, 2012). Kedua silikat C_3S dan C_2S bereaksi dengan air untuk menghasilkan hidrat kalsium silikat amorf yang dikenal sebagai gel C-S-H yang merupakan perekat utama pasir dan agregat dalam beton, reaksi tersebut dirangkum dalam Tabel 2.

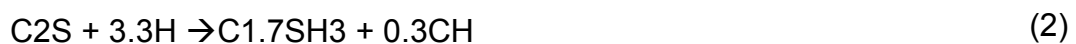
Tabel 2. Hidrasi kalsium silika

Mineral	Tingkat reaksi	Hasil reaksi
C_3S	Moderat	C-S-H dengan perbandingan Ca:Si= 1,7 CH (kalsium hidrosida)
C_2S	Lambat	C-S-H dengan perbandingan Ca:Si= 1,7 CH (kalsium hidrosida) dalam jumlah kecil

(Sumber : M. Wihardi Tjaronge, 2012)

C_3S jauh lebih reaktif dari C_2S dan pada kondisi suhu standar, sekitar $20^\circ C$. C-S-H yang diproduksi oleh kedua C_3S dan C_2S memiliki rasio Ca terhadap Si sekitar 1,7. Ini jauh lebih rendah dari rasio 3:1 pada C_3S dan kelebihan Ca diendapkan sebagai kristal kalsium hidroksida, $Ca(OH)_2$ atau *Portlandite* (CH). Hidrasi C_2S juga menghasilkan beberapa formasi CH.

$Ca(OH)_2$ yang terbebaskan oleh hidrolisis kalsium silikat membentuk pelat-pelat tipis heksagonal, dengan jarak puluhan micrometer antara pelat, tetapi kemudian bergabung menjadi deposit besar. Persamaan berikut sekitar merangkum reaksi hidrasi:



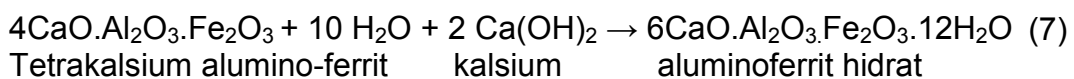
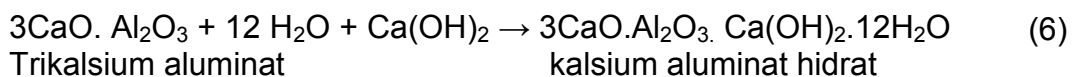
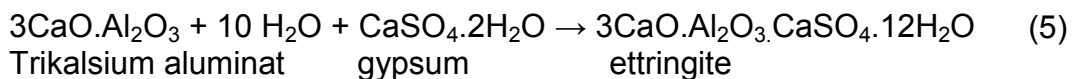
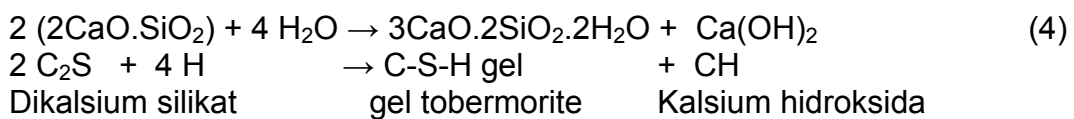
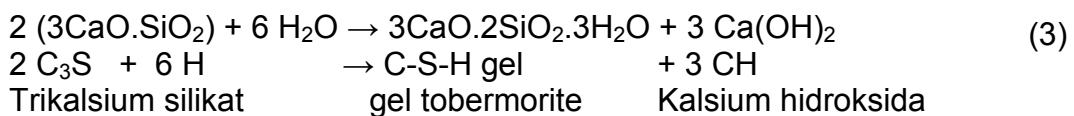
Reaksi C_3A sangat cepat dan tidak dapat dikendalikan secara kinetik. Untuk mengendalikan hidrasi C_3A agar tidak terjadi *flash set*, maka pada saat pembuatan klinker ditambahkan gypsum. Proses reaksi C_4AF analog dengan hidrasi C_3A namun berlangsung lebih lambat. C_3A dan gypsum akan bereaksi terlebih dahulu, menghasilkan kalsium sulfoaluminat. Kristal yang terbentuk jarum disebut *ettringite*. *Ettringite* memblokir air dari permukaan C_3A sehingga menunda hidrasi. Setelah gypsum bereaksi semua, barulah akan terbentuk kalsium aluminat hidrat. Sedangkan hidrasi C_4AF , pada tahap awal bereaksi dengan gypsum dan kalsium hidroksida membentuk kalsium sulfo-aluminat hidrat dan kalsium sulfo-ferrit hidrat yang kristalnya berbentuk jarum. Reaksi hidrasi dari C_3A dan C_4AF dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hidrasi alumina

Mineral	Ada larutan kalsium sulfat	Tingkat reaksi	Hasil reaksi
C ₃ A	Tidak	Sangat cepat dan melepaskan panas	Hidrasi C ₂ AH ₈ dan C ₂ AH ₁₉ sebagian menjadi C ₂ AH ₆
C ₃ A	Ya	Pada awalnya cepat	<i>ettringite</i> , C ₆ AC ₃ H ₃₂ dimana sebagian bereaksi membentuk monosulfat 3(C ₃ A.C [̂] .12H)
C ₃ AF	Tidak	Bervariasi (tergantung perbandingan Al/Fe)	Hidrasi dari C ₂ (A,F)H ₈ dan C ₄ (A,F) ₈ dimana sebagian berubah menjadi C ₃ (A,F)H ₆ (hydrogarnet)
C ₃ AF	Ya	Bervariasi tapi secara umum lambat	Besi menggantikan <i>ettringite</i> (Aft) dan sebagian besi menggantikan monosulfat

(Sumber : M. Wihardi Tjaronge, 2012)

Proses reaksi hidrasi komposisi semen *Portland* adalah :



Kecepatan reaksi hidrasi maksimum pada tahap awal dan kemudian menurun terhadap waktu. Hal ini disebabkan karena makin terbentuknya lapisan gel C-S-H yang semakin tebal sehingga semakin lambat hidrasinya.

b. Agregat.

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 70% volume mortar atau beton. Agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar/betonnnya, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar/beton. Cara membedakan jenis agregat yang paling banyak dilakukan adalah dengan didasarkan pada ukuran butir-butirnya. Agregat yang mempunyai ukuran butir-butir besar disebut agregat kasar, sedangkan agregat yang berukuran kecil disebut agregat halus. Sebagai batas antara ukuran butir yang kasar dan yang halus adalah 4,75 mm atau 4,80 mm.

1) Agregat kasar.

Berdasarkan SNI 03-2847-2002 tentang peraturan beton, menjelaskan bahwa agregat kasar dapat diidentifikasi sebagai kerikil yang merupakan hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. Secara umum, agregat kasar sering disebut sebagai kerikil, keracak, batu pecah, atau split.

2) Agregat halus.

Agregat halus adalah agregat yang mempunyai ukuran butir terbesar 5 mm. Agregat halus dapat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu (SNI 03-2847-2002).

c. Air.

Air merupakan bahan dasar pembuat beton yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen *Portland* dan menjadi bahan pelumas antar butir-butir agregat, agar dapat mudah dikerjakan (diaduk, dituang dan dipadatkan).

Air sebagai bahan bangunan sebaiknya memenuhi syarat sebagai berikut (SNI 03-2847-2002) :

- 1) Air yang digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak yang mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.
- 2) Air yang tidak dapat diminum harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:
 - a. Pemilihan proporsi campuran harus didasarkan pada campuran beton yang menggunakan air dari sumber yang sama.
 - b. Hasil pengujian pada umur 7 dan 28 hari pada kubus uji mortar dan dibuat adukan dengan air yang tidak dapat diminum harus

mempunyai kekuatan sekurang-kurangnya sama dengan 90% dari kekuatan benda uji yang dibuat dengan air yang dapat diminum.

2. Pengaruh klorida air laut pada beton

Dalam proses hidrasi semen yang bercampur dengan air laut akan mempengaruhi ikatan kimianya dengan membentuk fase baru dalam mikrostruktur beton sehingga mempengaruhi sifat mekanis beton terutama pada durabilitas beton. Serangan klorida merupakan penyebab utama dari kerusakan struktur beton yang berpotensi dalam pembentukan mekanisme karat. Apabila ion klorida yang terkandung dalam air bereaksi dengan semen, maka sebagian produk hidrasi semen akan mengikat ion klorida dalam beton baik melalui pengikatan secara kimiawi maupun melalui adsorpsi secara fisik. Ion klorida yang tidak terikat oleh produk hidrasi akan menjelajah melalui pori-pori beton dan terpenetrasi kedalam lapisan galvanis baja (Marinescu dkk., 2010). Ann dan Song (2007), juga telah meneliti tentang ambang batas klorida, dimana jumlah klorida terikat sudah mencapai titik maksimum dalam arti bahwa sudah tidak ada lagi unsur atau senyawa dari semen yang dapat mengikat klorida. Ketika konsentrasi klorida berada pada ambang batas tertentu tercapai pada *interface* penguatan beton, korosi dari besi beton baja mulai bereaksi. *Britis Standard* dalam *Corrosion Science* memberikan batas klorida untuk beton bertulang 0,4% dari berat semen.

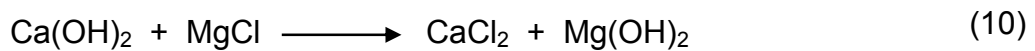
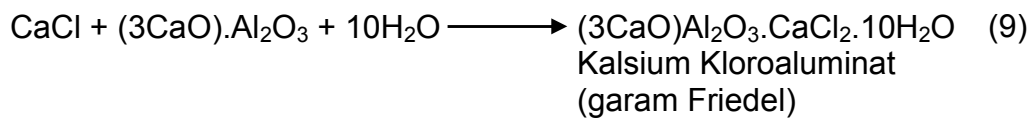
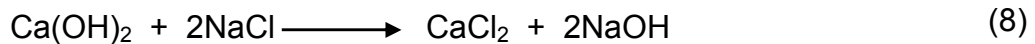
3. Peranan hidrasi semen dalam pengikatan klorida

Menurut Marinescu dkk. (2010), parameter paling penting yang mempengaruhi kapasitas pengikatan klorida adalah komposisi dari semen tersebut. Isi C_3A akan menentukan jumlah fase AFm, sementara jumlah dari C_3S dan C_2S dapat dihubungkan dengan jumlah CSH yang diperoleh pada hidrasi.

Hidrat utama dari pasta semen adalah C-S-H gel (*tobermorite*), $Ca(OH)_2$, Aft ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), dan AFm ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 10H_2O$). Dari hidrat, Aft dan $Ca(OH)_2$ memiliki kapasitas kecil untuk mengikat klorida, C-S-H memiliki permukaan yang sangat besar dan mampu mengikat berbagai macam ion termasuk ion klorida. Selanjutnya, kapasitas pengikatan klorida C-S-H tergantung pada komposisi kimia dan luas permukaan serta jenis larutan klorida dan kondisi eksperimental (Mien dkk., 2008).

Berdasarkan ke dua fase hidrasi yang dapat mengikat klorida yang lebih banyak (CSH dan AFm), memiliki dua mekanisme pengikatan klorida utama yaitu melalui adsorpsi secara fisik dan melalui reaksi kimia. Fase CSH diketahui mengikat klorida melalui penyerapan, sedangkan AFm mengikat klorida melalui reaksi kimia membentuk garam *Friedel*.

Proses serangan klorida pada beton dapat dijelaskan dengan reaksi kimia berikut. NaCl dan MgCl setelah bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ hasil hidrasi semen dari kalsium klorida, akan menjadi larut dimana akan menyebabkan kerugian dan pelemahan pada beton (Islam dkk., 2010).



Pada lingkungan laut, penetrasi klorida kedalam beton yang berasal dari air laut membentuk garam *Friedel*. Garam *Friedel* ini menempati volume yang besar setelah kristalisasi pada pori-pori beton daripada senyawa yang ia gantikan.

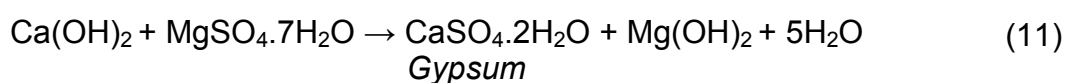
Mien dkk. (2008), melakukan penelitian terhadap pengikatan klorida berbagai jenis semen yang biasa digunakan serta kontribusi dari hidrat semen seperti gel C-S-H dan AFm untuk mengikat seluruh klorida. Spesimen pasta semen menggunakan berbagai jenis semen termasuk OPC, MC, RHC, dan LHC, dan W/C sebesar 0,3; 0,4; 0,5 dan 0,6. Percobaan untuk menentukan jumlah klorida dilakukan dengan menggunakan ASTM C1152 dan klorida bebas ditentukan dengan ASTM C1218. Selain itu, analisa *X-ray Diffraction* Rietveld (XRD Rietveld) digunakan untuk menentukan derajat hidrasi dan kandungan hidrat dari pasta semen, terutama C-S-H, AFm dan Garam *Friedel*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa OPC memiliki kapasitas pengikatan klorida tertinggi, dan LHC memiliki kapasitas pengikatan ion klorida terendah. MC dan RHC memiliki kapasitas yang sangat mirip dalam mengikat ion klorida (*The 3rdACF International Conference- ACF/VCA, 2008*). Dalam penelitian

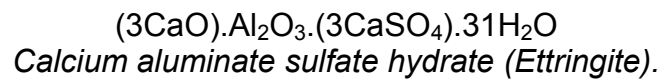
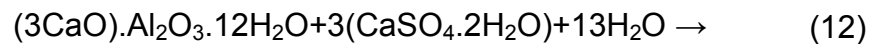
tersebut memberikan gambaran tentang kandungan senyawa semen yang bereaksi dengan klorida.

4. *Ettringite*

Dalam lingkungan laut, ion klorida menembus ke dalam beton baik dari angin laut atau air laut membawa ion garam yang menghancurkan pasif baja dan memberikan inisiasi korosi. Disisi lain alasan prinsip dari serangan sulfat yang merusak beton adalah pembentukan gypsum dan senyawa kompleks yang dikenal sebagai Kalsium Sulphoaluminat (*ettringite*). Kedua produk tersebut menempati volume yang lebih besar setelah kristalisasi dalam pori-pori beton daripada senyawa penggantinya (Islam dkk., 2005). Bogue berpendapat bahwa pembentukan hidrat *gypsum* menyebabkan peningkatan volume 17,7%. Proses serangan klorida pada beton dijelaskan oleh reaksi kimia berikut. Kedua NaCl dan MgCl₂ setelah bereaksi dengan Ca(OH)₂ dari hidrasi semen berupa kalsium klorida yang mudah larut, akan terlindi keluar dan akan menyebabkan kerugian material dan pelemahan.

MgSO₄ juga bereaksi dengan Ca(OH)₂ dan CaSO₄.2H₂O (*Gypsum*), yang pada gilirannya bereaksi dengan kalsium aluminat hidrat untuk membentuk tambahan kalsium aluminat hidrat sulfat (*Ettringite*).





Pembentukan kelebihan kalsium klorida, yang larut dan memberikan hasil meningkatnya permeabilitas beton yang menyebabkan kerugian material dan melemah. Pembentukan *ettringite* dikaitkan dengan ekspansi dan retak. Dengan demikian merugikan efek terkait dengan manifes reaksi kimia yang memberikan efek fisik, seperti perubahan volume, berat, permeabilitas dan sifat lainnya dari beton (Islam dkk., 2005).

5 . Sifat mekanik beton

Perilaku mekanik beton keras merupakan kemampuan beton di dalam memikul beban pada struktur bangunan. Kinerja beton keras yang baik ditunjukkan oleh kuat tekan beton yang tinggi, kuat tarik yang lebih baik, perilaku yang lebih daktail, kedap air dan udara, ketahanan terhadap sulfat dan klorida, penyusutan rendah dan keawetan jangka panjang.

a. Kuat tekan.

Kuat tekan beton merupakan kekuatan tekan maksimum yang dapat dipikul beton per satuan luas. Kuat tekan beton normal antara 20 – 40 MPa. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh : faktor air semen (*water cement ratio* = *w/c*), sifat dan jenis agregat, jenis campuran, kelecakan (*workability*), perawatan (*curing*) beton dan umur beton. Faktor air semen (*water cement ratio* = *w/c*) sangat mempengaruhi kuat tekan beton.

Semakin kecil nilai w/c nya maka jumlah airnya sedikit yang akan menghasilkan kuat tekan beton yang besar.

Kuat tekan beton dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut (SNI 1974-2011) :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (13)$$

Keterangan :

σ = Kuat tekan beton (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm²)

Dalam penelitian ini, kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f'_c dengan satuan N/mm² atau MPa (Mega Pascal). Yang dimaksud dengan kuat tekan beton adalah tegangan maksimum pada saat regangan beton (ϵ_b) mencapai 0,002.

b. Modulus elastisitas.

Modulus elastisitas suatu bahan menggambarkan besarnya tegangan pada satu satuan regangan. Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh jenis agregat, kelembaban benda uji beton, faktor air semen, umur beton dan temperaturnya.

Beton tidak memiliki modulus elastisitas yang pasti. Dengan mempelajari dari beberapa macam kurva tegangan-regangan pada kuat tekan beton yang berbeda terlihat bahwa secara garis besar kuat tekan maksimum tercapai pada saat nilai satuan regangan mencapai $\pm 0,002$. Selanjutnya nilai tegangan f'_c akan mengalami penurunan dengan

bertambahnya nilai regangan sampai benda uji hancur pada nilai regangan 0,003 – 0,005.

Berdasarkan SK SNI 03-2847 2002 Pasal 12.2.3 regangan kerja maksimum yang diperhitungkan diserat tepi beton tekan terluar adalah 0,003 sebagai batas hancur. Kemiringan kurva awal pada beton sangat seragam dan umumnya agak melengkung. Pada penerapannya, untuk menentukan modulus elastisitas beton digunakan rumus-rumus empiris yang menyertakan besaran besar disamping kuat tekannya. Menurut pasal 10.5 SNI-03-2847 (2002) untuk beton dengan berat isi (W_c) antara 1500 – 2500 kg/mm², nilai modulus elastisitasnya dapat diambil sebesar :

$$E_c = 0,043W_c^{1,5}\sqrt{f'_c} \quad (14)$$

Sedangkan untuk beton normal dengan berat isi 23 kN/m³, maka dapat digunakan nilai modulus elastisitas sebesar $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$.

Dalam pengujian modulus elastisitas pada beton silinder, menurut ASTM C 469-02 memberikan cara menentukan nilai modulus elastisitas sebagai berikut :

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (15)$$

Keterangan :

E = Modulus Elastisitas, (MPa)

S_2 = Nilai dari 40% tegangan maksimum

S_1 = Nilai Tegangan pada regangan 0,00005

ε_2 = Regangan pada S_2

$$\varepsilon_1 = 0,00005.$$

6. Air laut

Dalam pembuatan beton, air merupakan salah satu faktor penting, karena air dapat bereaksi dengan semen, yang akan menjadi pasta pengikat agregat. Air juga berpengaruh terhadap kuat tekan beton, karena kelebihan air akan menyebabkan penurunan pada kekuatan beton itu sendiri. Air pada campuran beton akan berpengaruh terhadap:

- 1) Sifat *workability* adukan beton.
- 2) Besar kecilnya nilai susut beton.
- 3) Kelangsungan reaksi dengan semen *Portland*, sehingga dihasilkan kekuatan selang beberapa waktu.
- 4) Perawatan keras adukan beton guna menjamin pengerasan yang baik.

Air untuk pembuatan beton minimal memenuhi syarat sebagai air minum yaitu tawar, tidak berbau, bila dihembuskan dengan udara tidak keruh dan lain-lain, tetapi tidak berarti air yang digunakan untuk pembuatan beton harus memenuhi syarat sebagai air minum.

Untuk kasus tertentu seperti pada daerah yang terisolir air tawar atau pada kota-kota yang sudah susah memperoleh air bersih, maka tidak menutup kemungkinan air laut dapat digunakan sebagai bahan pencampur beton. Seperti yang dilansir oleh Mohammed dkk. (2004), menyatakan bahwa dalam kondisi yang tidak dapat dihindari maka air laut dapat digunakan pada beton polos. Otsuki dkk. (2011), juga mengatakan

bahwa penggunaan air laut dimungkinkan untuk digunakan dengan syarat menggunakan semen campur dan memberikan kekebalan pada baja tulangan atau inhibitor.

7. Pengamatan mikrostruktur beton dengan menggunakan XRD dan SEM

a. X-Ray Diffraction.

Pengamatan mikrostruktur bahan mempunyai peranan penting dalam pengujian bahan karena bentuk struktur pada dasarnya membentuk sifat fisik, mekanik dan termal dari bahan. Dengan demikian dari pengamatan terhadap struktur bahan dapat ditentukan sifat mampu pengerjaan suatu bahan.

X-ray Diffraction (XRD) merupakan alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal, ukuran kristal dari suatu bahan padat. Semua bahan yang mengandung kristal tertentu ketika dianalisa menggunakan XRD akan memunculkan puncak – puncak yang spesifik.

Metode difraksi umumnya digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang belum diketahui yang terkandung dalam suatu padatan dengan cara membandingkan dengan data difraksi dengan database yang dikeluarkan oleh *International Centre for Diffraction Data* berupa *PDF Powder Diffraction File* (PDF).

X-ray Diffraction (XRD) adalah gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang pendek sekitar 0,5 – 2,5 Amstrong dan mendekati jarak antara atom kristal serta mempunyai energi yang besar. Berkas sinar

X yang sejajar dan monokromatik ditembakkan pada permukaan material, maka atom-atom dalam kristal akan menyerap energi dan menghamburkan kembali sinar X ke segala arah.

Dari penggunaan X-Ray Difraktometer tersebut, kita akan memperoleh suatu pola difraksi dari bahan yang kita analisis. Dari pola tersebut, kita akan mendapatkan beberapa informasi antara lain :

- Panjang gelombang sinar X yang digunakan (λ)
- Orde pembiasan / kekuatan intensitas (n)
- Sudut antara sinar datang dengan bidang normal (θ)

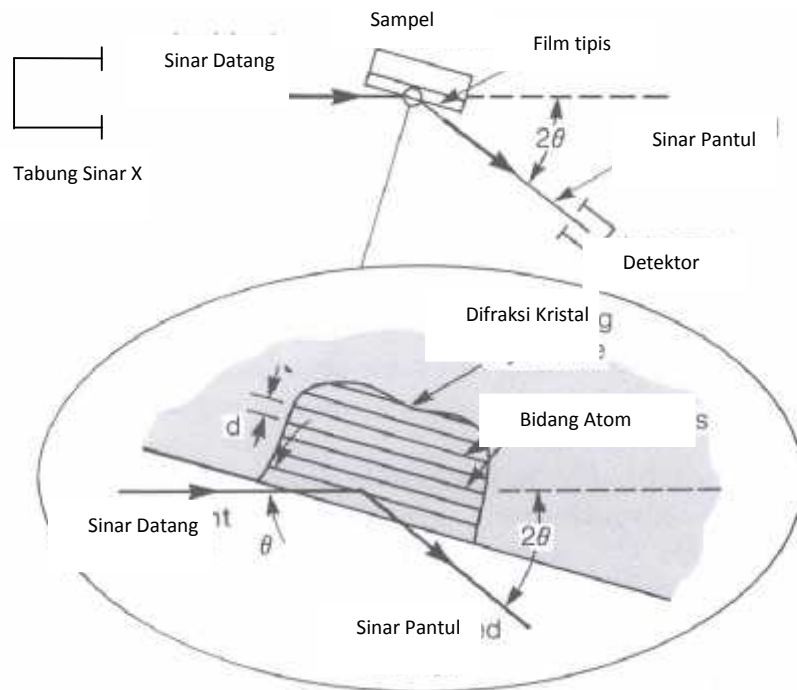
Dengan persamaan Bragg, kita dapat memperoleh nilai jarak antara dua bidang kisi (d) :

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (16)$$

$$n = 1, 2, \dots$$

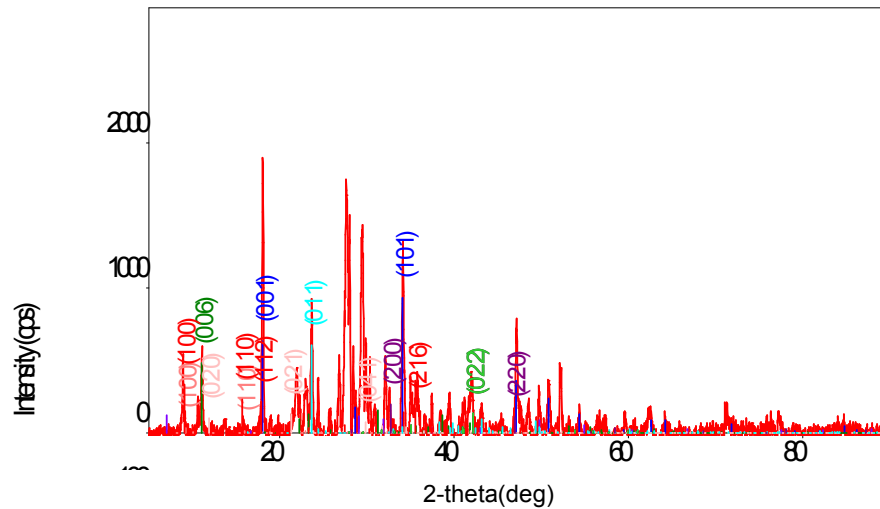
Berdasarkan persamaan *Bragg*, jika seberkas sinar-X di jatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi. Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkannya. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Pada Gambar 1 dapat dilihat fitur dasar percobaan XRD

yang menerangkan proses deteksi kristal-kristal yang terdapat dalam benda uji yang dideteksi.



Gambar 1. Skema dasar percobaan XRD

Contoh hasil pengujian *X-Ray Diffraction* untuk sampel mortar yang menggunakan air laut dan pasir laut dapat dilihat pada Gambar 2 dan Tabel 4. Gambar 2 merupakan hasil penyinaran sinar-X yang mendeteksi setiap atom-atom yang ada pada sampel. Tinggi rendahnya intensitas penyinaran bergantung pada banyaknya hasil deteksi atom yang serupa atau hampir sama. Arah sumbu y memberikan keterangan tentang tinggi rendahnya intensitas yang diidentifikasi oleh sinar-X, sedangkan arah sumbu x memberikan tentang keterangan sudut pengamatan (2θ).



Gambar 2. Grafik hasil pengujian XRD mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut

Pada Tabel 4 memberikan hasil analisa XRD yang merupakan hasil identifikasi kristalisasi struktur molekul yang terbentuk. Hasil tersebut merupakan hasil reaksi kimia antara hidrat semen *Portland* dan unsur kimia yang terdapat pada air laut.

Tabel 4. Presentase kandungan senyawa pada mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut

Jenis kandungan	Kadar (%)
<i>Ettingite</i> , $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	0,77
<i>Portlandite</i> , $\text{Ca}(\text{OH})_2$	17
Garam <i>Friedel</i> , $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0,83
<i>Tobermorite</i> , C-S-H	59
<i>Gypsum</i> , $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	7

Sumber : Analisa data

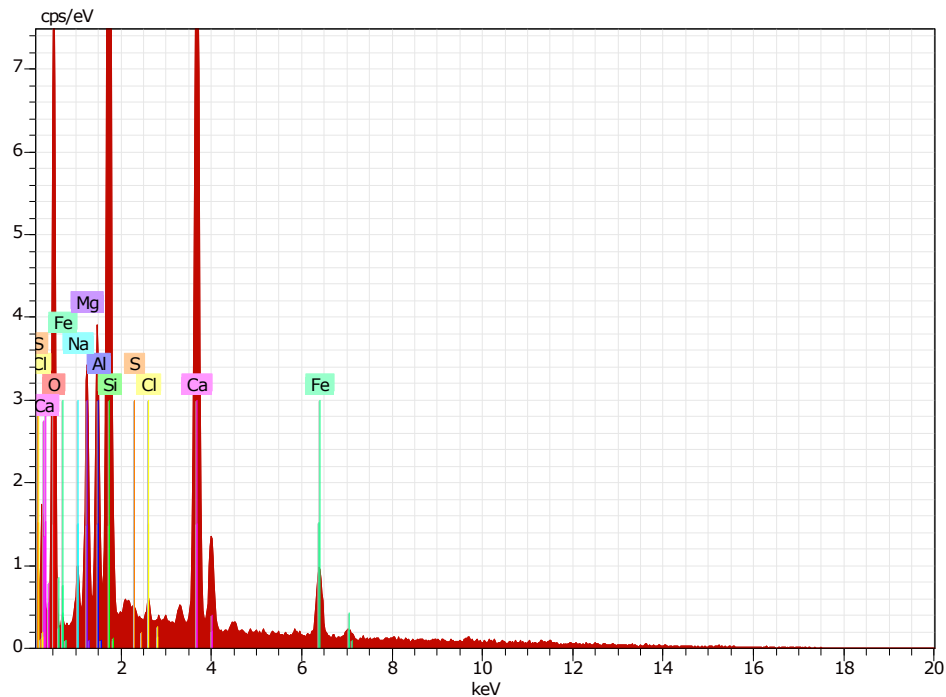
b. Scanning Electron Microscope.

Untuk menggambarkan bentuk permukaan dari material yang dianalisis, maka digunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang salah satu jenis mikroskop elektron menggunakan berkas elektron. *Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan piranti yang menggunakan elektron untuk menguji suatu obyek. Elektron ditembakkan dan berinteraksi dengan bahan sehingga menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang permukaan bahan meliputi topografi, morfologi, komposisi serta informasi kristalografi.

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan mikroskop elektron yang banyak digunakan untuk analisa permukaan material. SEM juga dapat digunakan untuk menganalisa data kristalografi, sehingga dapat dikembangkan untuk menentukan elemen atau senyawa. Pada prinsip kerja SEM, dua sinar elektron digunakan secara simultan. Satu *strike specimen* digunakan untuk menguji dan yang lainnya CRT (*Cathode Ray Tube*) memberikan tampilan gambar.

SEM menggunakan prinsip *scanning*, maksudnya berkas elektron diarahkan dari titik ke titik pada objek. Gerakan berkas elektron dari satu titik ke titik yang ada pada suatu daerah objek merupakan gerakan membaca. Komponen utama SEM terdiri dari dua unit, *electron column* dan *display console*.

Hasil pengujian SEM untuk benda uji mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 serta Tabel 5.



Gambar 3. Grafik hasil pengujian SEM untuk mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut

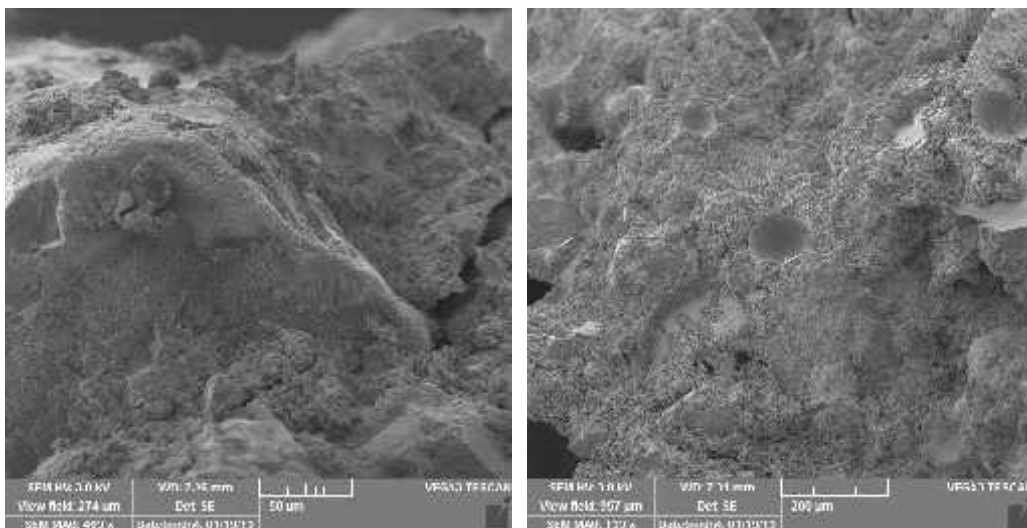
Hal yang paling prinsip pada Tabel 5, yaitu terdeteksinya unsur klorida dalam mortar. Jumlah klorida yang terbentuk sebesar 0,35%, yang bereaksi dengan unsur kalsium hidroksida dan membentuk kalsium klorida. Kalsium klorida inilah yang bereaksi kembali dengan trikalsium aluminat sehingga membentuk garam *Friedel* yang berfungsi mengisi pori-pori dalam beton. Selain garam *Friedel*, ettringite juga berfungsi mengisi pori-pori dalam beton.

Tabel 5. Komposisi atom dan senyawa kimia pada mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut

Elemen	Jumlah (%)
Oxygen	40.45
Silicon	18.46
Aluminium	4.95
Calcium	23.77
Chlorine	0.35
Sulfur	0.10
Sodium	1.13
Iron	5.73
Magnesium	5.07

Sumber : Data penelitian

Gambar 4 memberikan foto permukaan mortar hasil *Scan Electron Microscopy (SEM)*. Hasil SEM tersebut sebenarnya dapat melihat hasil kristalisasi molekul yang terbentuk seperti garam *Friedel* dan ettringite tergantung pada kehalusan benda uji yang dimasukkan dalam alat SEM.



Gambar 4. Hasil foto SEM pada mortar dengan menggunakan air laut dan pasir laut

8. Analisa regresi linier

Analisis regresi merupakan studi ketergantungan satu atau lebih variabel bebas terhadap variabel tidak bebas.

a. Regresi linier sederhana.

Analisis regresi linear sederhana dipergunakan untuk mengetahui pengaruh antara satu buah variabel bebas terhadap satu buah variabel terikat. Persamaan umumnya adalah:

$$y = a + b x \quad (17)$$

$$b = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (18)$$

$$a = y - bx \quad (19)$$

Keterangan :

y = variabel terikat,

x = variabel bebas,

a = konstanta (*intercept*) yang merupakan titik potong antara garis regresi dengan sumbu Y pada koordinat kartesius,

b = gradien garis regresi (perubahan y persatuan perubahan variabel x).

n = jumlah sampel.

1) Koefisien korelasi.

Koefisien korelasi adalah sebuah angka yang dapat dijadikan petunjuk untuk mengetahui seberapa besar kekuatan hubungan antara variabel yang diteliti korelasinya, dalam hal ini yang dimaksud dengan

variabel adalah variabel bebas dan variabel terikat. Rumus untuk menentukan koefisien korelasi antara kedua variabel adalah sebagai berikut :

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n})}} \quad (20)$$

2) Koefisien determinasi.

Koefisien determinasi (r^2) mencerminkan seberapa besar kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varians variabel terikatnya. Mempunyai nilai antara 0 – 1 di mana nilai yang mendekati 1 berarti semakin tinggi kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varians variabel terikatnya. Dan bila $r^2 = 0$, artinya bahwa persamaan y tidak dapat diterangkan sama sekali oleh variabel x . Selanjutnya nilai r^2 dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut :

$$r^2 = \frac{a(\sum y) + b(\sum xy) - n(y)^2}{\sum (y)^2 - n(y)^2} \quad (21)$$

b. Linierisasi kurva tak linier.

Dalam praktek sering dijumpai bahwa besaran titik-titik pada sistem koordinat mempunyai kecenderungan (*trend*) yang berupa kurva lengkung sehingga perlu dilakukan transformasi koordinat sedemikian sehingga sebaran titik data bisa dipresentasikan dalam kurva linier. Berikut diberikan dua fungsi transformasi data yang biasa digunakan, yaitu eksponensial dan fungsi berpangkat.

1) Persamaan eksponensial.

Salah satu kurva tak linier adalah fungsi eksponensial sebagaimana yang diberikan oleh persamaan berikut:

$$y = a_1 e^{b_1 x} \quad (22)$$

Dengan a_1 dan b_1 adalah konstanta. Persamaan tersebut dapat dilinierkan dengan menggunakan logaritma natural sehingga menjadi:

$$\ln y = \ln a_1 + b_1 x \ln e \quad (23)$$

2) Persamaan berpangkat.

Persamaan berpangkat dapat juga dilinierkan dengan menggunakan fungsi logaritmik.

$$y = a_2 x^{b_2} \quad (24)$$

$$\text{Dapat diubah menjadi } \log y = b_2 \log x + \log a_2 \quad (25)$$

c. Regresi polinomial.

Banyak juga data yang mempunyai kecenderungan kurva sesuai dengan regresi polinomial. Berikut persamaan polinomial orde 2:

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (26)$$

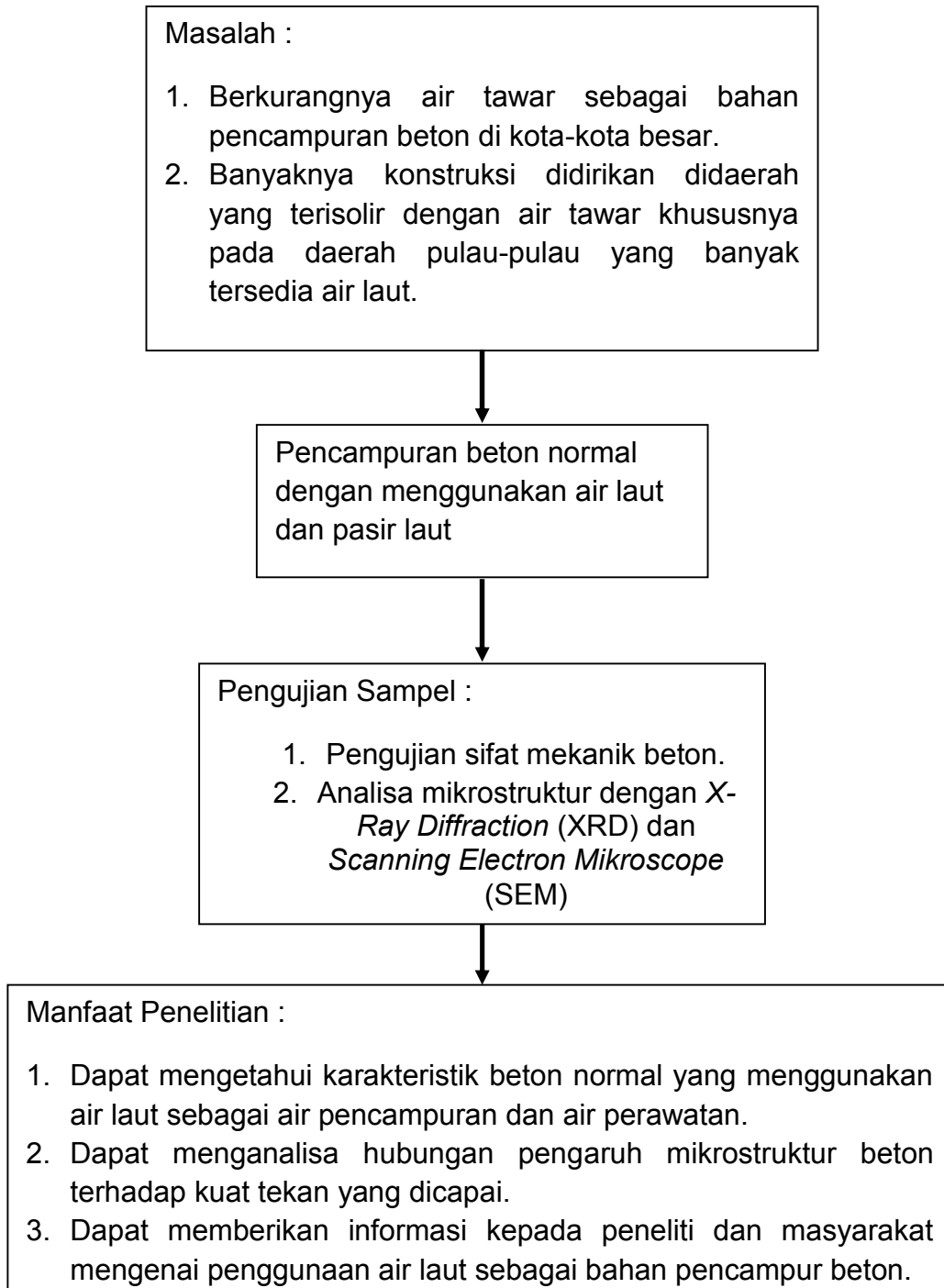
$$E_i = y_i - y(x) \quad (27)$$

$$E_i^2 = (y_i - a_0 - a_1 x - a_2 x^2)^2 \quad (28)$$

$$r^2 = E_i^2 \quad (29)$$

Dari beberapa persamaan diatas, yang sangat menentukan untuk memilih persamaan yang digunakan tergantung nilai koefisien korelasinya.

C. Kerangka Pikir



Gambar 5. Kerangka pikir