

**PENGARUH LINGKUNGAN AIR LAUT TERHADAP PERILAKU
DEFORMASI PADA KOLOM BETON**

(Skripsi)

Oleh

**AJI SAPUTRA
1915011017**



**PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**PENGARUH LINGKUNGAN AIR LAUT TERHADAP PERILAKU
DEFORMASI PADA KOLOM BETON**

Oleh

AJI SAPUTRA

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF SEAWATER ENVIRONMENT ON DEFORMATION BEHAVIOUR OF CONCRETE COLUMNS

By

AJI SAPUTRA

Concrete is one of the most commonly used materials in building construction, including for column structures. The use of concrete in a seawater environment can affect the quality and strength of the concrete. This study aims to determine the effect of seawater environment on the deformation behaviour of concrete columns and its relationship with the temperature and relative humidity (RH) of the surrounding environment. The research was conducted experimentally. Three concrete column samples with a planned compressive strength of 20,75 MPa measuring 15 cm × 15 cm × 100 cm, 40 cm into the seabed and 60 cm above the seabed and submerged in seawater were used. The deformation behaviour tested included strain and temperature inside the concrete which were automatically detected by a vibrating wire (VWESG) embedded 45 cm from the bottom of the sample. Observations were made immediately after casting. The results showed that shrinkage occurred at 8-11 days and the internal temperature increased with a peak at day 11 of 1,3416 E-05 (m/m) and 29,9 °C. The average relative humidity, air temperature and seawater temperature on days 8-11 were 64,4%, 30,9 °C and 29,2 °C respectively. The shrinkage behaviour of column concrete is influenced by seawater which causes degradation as a result of chemical damage processes such as sulphate erosion or leaching and chloride damage. At the age of 12-90 days, there was a relatively small expansion of -2,3772 E-05 (m/m) at the age of 90 days with an internal concrete temperature of 24,5 °C. The compressive strength at 28, 56 and 90 days were 22,27 MPa, 17,67 MPa and 16,10 MPa respectively. The decrease of 38,30% is due to the deformation behaviour of the concrete (concrete expands).

Key words: seawater environment, deformation, concrete column, compressive strength.

ABSTRAK

PENGARUH LINGKUNGAN AIR LAUT TERHADAP PERILAKU DEFORMASI PADA KOLOM BETON

Oleh

AJI SAPUTRA

Beton merupakan salah satu material yang paling sering digunakan dalam konstruksi bangunan, termasuk untuk struktur kolom. Penggunaan beton dalam lingkungan air laut dapat mempengaruhi kualitas dan kekuatan beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi pada kolom beton serta hubungannya dengan suhu dan kelembapan relatif (RH) lingkungan sekitar. Penelitian dilakukan secara eksperimental. Digunakan 3 sampel beton kolom dengan kuat tekan rencana 20,75 MPa berukuran 15 cm × 15 cm × 100 cm, 40 cm masuk ke dasar laut dan 60 cm di atas dasar dan terendam air laut. Perilaku deformasi yang diuji meliputi regangan dan suhu dalam beton yang dideteksi secara otomatis oleh kawat getar (VWESG) yang ditanam 45 cm dari bawah sampel. Pengamatan dilakukan segera setelah pengecoran. Hasil penelitian menunjukkan penyusutan terjadi pada umur 8-11 hari dan kenaikan suhu dalamnya dengan puncak pada hari ke-11 sebesar 1,3416 E-05 (m/m) dan 29,9 °C. Rata-rata kelembapan relatif, suhu udara dan suhu air laut pada hari ke 8-11 secara berurutan adalah 64,4 %, 30,9 °C dan 29,2 °C. Perilaku penyusutan beton kolom dipengaruhi oleh air laut yang menyebabkan penurunan laju (degradation) mutu sebagai akibat dari proses kerusakan kimia seperti erosi sulfat atau pencucian dan kerusakan oleh klorida. Pada umur 12-90 hari terjadi ekspansi yang relatif kecil sebesar -2,3772 E-05 (m/m) pada umur 90 hari dengan suhu dalam beton 24,5 °C. Kuat tekan umur 28, 56 dan 90 secara berturut-turut sebesar 22,27 MPa, 17,67 MPa dan 16,10 MPa. Penurunan sebesar 38,30% disebabkan oleh perilaku deformasi beton (beton mengembang).

Kata kunci : lingkungan air laut, deformasi, kolom beton, kuat tekan.

Judul Skripsi : **PENGARUH LINGKUNGAN AIR LAUT
TERHADAP PERILAKU DEFORMASI
PADA KOLOM BETON**

Nama Mahasiswa : **Aji Saputra**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915011017

Program Studi : S1 Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

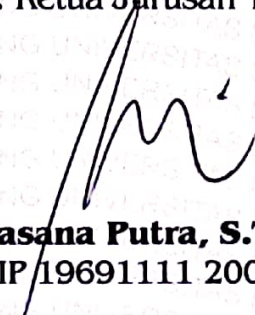


Prof. Dr. Ir. C. Niken D.W.S.B.U., M.T.
NIP 19580613 198403 2 003



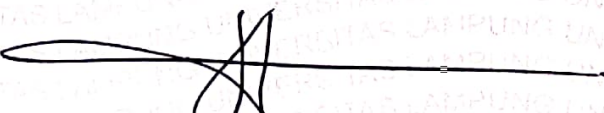
Prof. Dr. Dyah I.K., S.T., M.Sc.
NIP 19691219 199512 2 001

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil



Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

3. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil



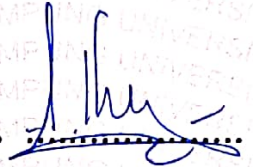
Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

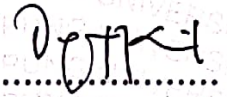
Ketua

: **Prof. Dr. Ir. C. Niken D.W.S.B.U., M.T.**



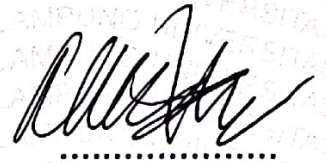
Sekretaris

: **Prof. Dr. Dyah Indriana K., S.T., M.Sc.**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP.19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **7 Februari 2024**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Aji Saputra
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915011017
Prodi/Jurusan : S1/Teknik Sipil
Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi yang berjudul "*PENGARUH LINGKUNGAN AIR LAUT TERHADAP PERILAKU DEFORMASI KOLOM BETON*" tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Ide penelitian didapatkan dari pembimbing I, oleh karena itu baik atas data penelitian berada pada Saya dan Pembimbing I, Prof. Dr. Ir. C. Niken D.W.S.B.U. M.T. Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Februari 2024

Penulis



AJI SAPUTRA
NPM. 1915011017

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Mulya Kencana, Tulang Bawang Tengah, Tulang Bawang Barat pada tanggal 20 April 2001, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Putra dari pasangan Bapak Suyitno dan Ibu Jayem Suparyanti. Penulis memiliki dua orang kakak yang bernama Heri Nugroho dan Rizal Ahmadi. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat Taman Kanak - Kanak di TK Dahlia pada tahun 2006-2007.

Kemudian penulis melanjutkan Pendidikan ke Sekolah Dasar di SD N 5 Mulya Kencana pada tahun 2007-2013. lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMP Negeri 1 Tumijajar yang diselesaikan pada tahun 2016. Setelah tamat SMP penulis melanjutkan Pendidikan Tingkat menengah atas di SMA Negeri 1 Tumijajar pada tahun 2016 - 2019.

Pada tahun 2019 penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS UNILA) sebagai anggota Departemen Kerohanian dan Keolahragaan Periode 2020-2022. Penulis juga telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Gedung Ratu, Kecamatan Tulang Bawang Udik, Kabupaten Tulang Bawang Barat selama 40 hari, Januari – Februari 2022. Di tahun yang sama, tepatnya di bulan Juli sampai Oktober penulis juga telah melakukan Kerja Praktik (KP) di Proyek Pembangunan Gedung Serbaguna Universitas Mitra Indonesia selama 3 bulan. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Pengaruh Lingkungan Air Laut Terhadap Perilaku Deformasi Kolom Beton”.

MOTTO

“Setiap orang bertanggung jawab atas apa yang telah dilakukannya”

(QS. Al muddassir [74]:38)

“Orang yang gemar berkata jujur mendapatkan 3 hal; kepercayaan, cinta dan rasa hormat.”

(Ali bin Abi Thalib)

“Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia lainnya”

(HR. Ahmad)

“Kita diminta untuk saling mengenal dan menasehati, bukan saling menilai dan menghakimi”

(K.K. Ahmad Bahauddin Nursalim)

“Tanamkan sikap tanggung jawab dan profesionalitas dalam pekerjaan, selalu menghargai dan jangan merendahkan orang lain, yang paling utama sayangi keluarga dan diri sendiri”

(Penulis)

PERSEMBAHAN

Rasa syukur dan bangga tidak hentinya terucap, seluruh proses yang telah dilalui dengan suka dan duka bersama orang-orang yang telah hadir menyertainya, Alhamdulillah, sebuah ungkapan syukur yang dapat mewakili perasaan yang dirasakan, yang ditujukan kepada Allah SWT, kepada kedua orang tua dan kedua kakak kami serta kepada rekan-rekan yang selalu menyediakan tempat, waktu dan pikirannya dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini.

Terima kasih kepada diri sendiri karena sudah berjuang dan berusaha menyelesaikan tugas akhir ini yang merupakan bentuk tanggung jawab kepada orang tua kami.

Terima kasih kepada Bapak/Ibu Dosen Pembimbing dan Penguji yang sabar dan selalu memberikan bimbingan dan motivasi sebagai dorongan dan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini, semoga senantiasa diberi Kesehatan dan Keberkahan.

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi dengan judul “Pengaruh Air Laut Terhadap Perilaku Deformasi Kolom Beton” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik Sipil di Universitas Lampung. terselesaikannya Skripsi ini tentu tidak terlepas dari dukungan dan motivasi dari berbagai pihak yang telah banyak membantu dan memberi masukan serta arahan dalam penyusunan Skripsi ini. Untuk itu, Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Bapak Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan arahan, masukan, dan motivasi kepada penulis selama perkuliahan.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. C. Niken D.W.S.B.U, M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran, dan motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini.
6. Ibu Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang selalu memberikan masukan dan saran kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

7. Bapak Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D., selaku Dosen Penguji. Terima kasih untuk masukan dan saran dalam penyempurnaan skripsi ini.
8. Seluruh Dosen Program Studi S1 Teknik Sipil atas semua ilmu pengetahuan dan didikannya selama masa perkuliahan.
9. Seluruh staf dan karyawan Program Studi S1 Teknik Sipil atas segala bantuannya dalam hal administrasi.
10. Bapak Suyitno dan Ibu Jayem Suparyanti selaku orang tua penulis, serta Heri Nugroho dan Rizal Ahmadi selaku kakak penulis yang selalu mendoakan, memotivasi, memberikan dukungan dalam semua hal dan selalu memberikan segala hal demi kelancaran dan keberhasilan penulis sehingga penulis bisa menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
11. Teman-teman penelitian Aditya Wisnu Nugraha, Anggita Yuliana Lestari, Doni Irawan dan Fatwa Aditya Putra terima kasih atas kebersamaannya, bantuan, dan dukungan selama proses penelitian penulis.
12. Teman-teman SOLID 19. menjadi keluarga selama mengarungi kehidupan kampus dan memberikan banyak pengalaman serta kenangan selama perkuliahan.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, terima kasih atas semua bantuan dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Besar harapan penulis agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya bagi penulis dalam mengembangkan dan mengamalkan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 7 Februari 2024

Penulis,



Aji Saputra

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
I. Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Lokasi Penelitian	3
1.6 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.7 Sistematika Penelitian	5
II. Tinjauan Pustaka	6
2.1 Beton	6
2.1.1 Klasifikasi Beton	6
2.1.2 Sifat-Sifat Beton	9
2.1.3 Material Pembentuk Beton	10
2.2 Lingkungan Laut	19
2.2.1 Pengaruh Zona Paparan Laut terhadap Strukur Beton	20
2.2.2 Mekanisme Kimia Kerusakan Beton	23
2.2.3 Mekanisme Fisik Kerusakan Beton	25
2.3 Deformasi Kolom Beton	26
2.3.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Deformasi Kolom Beton	26
2.4 <i>Vibrating Wire Embedment Strain Gauge</i> (VWESG)	29
2.5 Landasan Teori	30
2.5.1 Kuat Tekan Beton	30
2.5.2 Susut Beton	31
2.5.3 <i>Vibrating Wire Embedment Strain Gauge</i> (VWESG)	33
2.6 Penelitian Terdahulu	35
III. Metodologi Penelitian	42
3.1 Umum	42
3.2 Lokasi Penelitian	43
3.3 Persiapan Alat dan Bahan.....	43
3.4 Pemeriksaan Material	49

3.5	Hasil Pengujian <i>Properties</i> Material Campuran Beton Normal	50
3.6	Perencanaan Campuran Beton Normal.....	51
3.7	Pemberian Kode Sampel Benda Uji	51
3.8	Pembuatan Benda Uji	52
3.9	Perlakuan Benda Uji	53
3.10	Metode Pengamatan Deformasi pada Temperatur dan RH Lingkungan Sekitar Benda Uji	54
3.11	Analisa Data Hasil Penelitian	54
3.12	Diagram Alir Penelitian	56
IV.	Hasil dan Pembahasan	57
4.1	Umum	57
4.2	Keleccakan Beton	57
4.3	Peletakan Benda Uji	58
4.3.1	Peletakan Benda Uji Deformasi	58
4.3.2	Peletakan Benda Uji Kuat Tekan	62
4.4	Hasil Penelitian Pengaruh Lingkungan Air Laut Terhadap Perilaku Deformasi pada Kolom Beton	63
4.4.1	Hasil Penelitian Deformasi Kolom Beton pada Umur 0-24 Jam.....	63
4.4.2	Hasil Penelitian Deformasi Kolom Beton saat Proses Curing.	70
4.4.3	Hasil Penelitian Deformasi Kolom Beton di Lingkungan Air Laut	75
4.4.4	Perbandingan Hasil Penelitian Deformasi Beton Kolom dengan ACI 209R-92	80
4.4.5	Hasil Uji Kuat Tekan	82
V.	Penutup	86
5.1	Kesimpulan	86
5.2	Saran	88
	DAFTAR PUSTAKA	89
	LAMPIRAN A (HASIL UJI MATERIAL)	
	LAMPIRAN B (<i>MIX DESIGN</i>)	
	LAMPIRAN C (DATA HASIL PENGUJIAN)	
	LAMPIRAN D (FOTO PENELITIAN)	
	LAMPIRAN E (LEMBAR ASISTENSI)	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kondisi paparan yang berbeda di bawah lingkungan laut	21
2. Alat <i>vibrating wire embedment strain gauge</i>	29
3. Kuat tekan beton berdasarkan umur	31
4. Skema benda uji beton kolom dengan VWESG	42
5. Lokasi penelitian	43
6. Alat VWESG	44
7. Alat <i>vibrating wire readout</i>	44
8. Alat termometer <i>hygrometer</i>	45
9. Perlakuan benda uji	54
10. Diagram alir penelitian	56
11. <i>Slump test</i>	57
12. Posisi VWSG dalam bekisting	58
13. Bekisting dan kayu penyangga	59
14. Benda uji beton kolom setelah pengecoran	59
15. Proses <i>curing</i>	60
16. Benda uji beton kolom	61
17. Proses penurunan benda uji	61
18. Benda uji beton kolom di lingkungan air laut	62
19. Beton silinder di air laut	62
20. Deformasi beton kolom umur 0-24 jam	64
21. Suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam	64
22. <i>Outlying</i> deformasi beton kolom umur 0-24 jam	65
23. <i>Outlying</i> suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam	65
24. Deformasi rata-rata beton kolom umur 0-24 jam	66
25. Suhu dalam rata-rata beton kolom umur 0-24 jam	66
26. Deformasi beton kolom saat masa <i>curing</i>	71

27. Suhu dalam beton kolom saat masa <i>curing</i>	71
28. <i>Outlaying</i> deformasi beton kolom saat masa <i>curing</i>	72
29. <i>Outlaying</i> suhu dalam beton kolom saat masa <i>curing</i>	73
30. Perilaku deformasi beton kolom saat masa <i>curing</i>	73
31. Kelembapan relatif, suhu udara lingkungan sekitar dan suhu dalam beton kolom saat masa <i>curing</i>	74
32. Perilaku deformasi beton kolom di lingkungan air laut	76
33. Suhu dalam beton kolom di lingkungan air laut	77
34. <i>Outlaying</i> deformasi beton kolom di lingkungan air laut	77
35. <i>Outlaying</i> suhu dalam beton kolom di lingkungan air laut	78
36. Deformasi rata-rata beton kolom di lingkungan air laut	78
37. Suhu dalam rata-rata beton kolom di lingkungan air laut	79
38. Deformasi beton menurut ACI 209R-92 dan VWESG	81
39. <i>Outlaying</i> kuat tekan beton dengan CTM	83
40. Kuat tekan rata-rata beton dengan CTM	84

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Spesifikasi Kimia dan Fisika Pozolan	11
2. Komponen Utama Semen	13
3. Perkiraan Komposisi Semen PC	14
4. Komposisi Semen PCC Tiga Roda	15
5. Syarat Gradasi Agregat Kasar	16
6. Syarat Gradasi Agregat Halus	18
7. Komposisi Ion pada Air Laut	20
8. Fase Asli dan Terubah Komposit Semen yang Terpapar Air Laut	23
9. Penelitian Terdahulu Terkait Penelitian ini	35
10. Penelitian Terdahulu Terkait <i>Mix Design</i> Beton SNI 03-2834-2000	39
11. Penelitian Terdahulu Terkait Proses Pengecoran	40
12. Hasil Pengujian <i>Propeties</i> Material Campuran Beton Normal	50
13. Kode dan Jumlah Benda Uji	51
14. Kelembapan Relatif, Suhu Udara dan Suhu Air <i>Curing</i>	75
15. Kelembapan Relatif, Suhu Udara dan Suhu Air Laut	80
16. Hasil Pengujian Kuat Tekan dengan CTM	83

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan salah satu material yang paling sering digunakan dalam konstruksi bangunan, termasuk untuk struktur kolom. Kinerja kolom beton sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, termasuk lingkungan air laut. Penggunaan beton dalam lingkungan air laut dapat mempengaruhi kualitas dan kekuatan beton. Hal ini disebabkan oleh adanya reaksi kimia antara beton dengan air laut dan lingkungannya yang dapat mempercepat terjadinya kerusakan pada struktur beton. Air laut merupakan campuran senyawa yang kompleks, terutama garam, yang bersifat keras terhadap struktur. Keberadaan garam dalam proporsi yang berbeda dalam air laut dapat merusak daya tahan dan kekuatan beton yang terpapar olehnya. (De Weerd, dkk, 2014) Air laut mengandung rata-rata sekitar 35 gr/L garam terlarut. Konsentrasi garam air laut dapat bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya.

Penyebab utama kerusakan pada beton adalah ion klorida dan sulfat yang dapat berdampak negatif pada kualitas beton, terutama pada kolom beton yang terendam dalam air laut. Sulfat adalah garam terbesar kedua yang terdapat dalam air laut bereaksi dengan beton dan melemahkan ketahanan tariknya, sedangkan garam klorida yang terdapat dalam air bereaksi dengan senyawa sementit yang terdapat dalam beton menyebabkan korosi pada baja tulangan. Reaksi oleh klorida yang secara berurutan menyebabkan kerusakan pada matriks beton (Ali Mang, dkk, 2020). Beton terdiri dari material padat dan cair yang membentuk suatu matriks (Neville, 2011).

Material padat yang terkandung dalam beton meliputi semen, agregat, dan air. Material cair pada beton adalah air yang berguna untuk menghidrasi semen dan membentuk ikatan antara partikel agregat. Tidak semua air dipakai untuk

proses hidrasi. Air dalam beton yang mengeras, dapat berupa air bebas, dan air yang terikat. Saat beton terkena air laut, material cair yang terdapat pada beton akan tercampur dengan air laut, sehingga dapat mempengaruhi kualitas beton.

Beton mengalami deformasi karena proses hidrasi, lingkungan dan karena beban. Deformasi dalam beton karena pengaruh ketiga faktor di atas dapat berupa kembang dan susut. Kecepatan deformasi pada kolom beton terendam air laut meningkat seiring dengan meningkatnya kadar klorida dan sulfat dalam air laut (Wang, dkk, 2018). Liu et al. (2019) menunjukkan bahwa kolom beton yang terendam air laut dapat mengalami perubahan dimensi akibat pengaruh suhu dan kelembapan yang berubah-ubah. Beton yang tidak dapat mengakomodasi kembang dan susut yang terjadi di dalamnya akan retak. Retak pada kolom akan berdampak pada menurunnya kekuatan dan stabilitas kolom. Pengaruh lingkungan air laut pada beton juga tergantung dari karakteristik pori-pori beton (Aslam, dkk, 2019). Dalam lingkungan air laut, jumlah pori kosong pada beton dapat meningkat dan mempengaruhi perilaku deformasi dan kembang susut pada kolom beton.

Kegagalan pada kolom dapat menyebabkan keruntuhan seluruh bangunan. Oleh karena itu, penelitian tentang pengaruh perilaku deformasi dan kembang susut pada kolom beton di lingkungan air laut sangat penting dilakukan. Dengan mengetahui pengaruh lingkungan terhadap perilaku deformasi dan kembang susut pada kolom beton dapat dihasilkan desain struktur yang lebih aman dan tahan lama di lingkungan air laut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh lingkungan air laut pada perilaku deformasi dan kembang susut kolom beton dalam rentang waktu 90 hari?
2. Apa saja faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku deformasi dan kembang susut kolom beton yang terendam air laut?

3. Bagaimana perbedaan perilaku deformasi kolom beton yang terendam air laut antara hasil penelitian dan teori berdasarkan ACI 209R-92?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi dan kembang susut kolom beton. Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi pada kolom beton dalam rentang waktu 90 hari.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku deformasi kolom beton yang terendam air laut.
3. Membandingkan perilaku deformasi kolom beton yang terendam air laut antara hasil penelitian dan teori berdasarkan ACI 209R-92.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pengetahuan tentang pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi kolom beton.
2. Memberikan pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi deformasi kolom beton di lingkungan air laut.
3. Memberikan pemahaman dalam desain struktur yang lebih aman dan tahan lama di lingkungan air laut

1.5 Lokasi Penelitian

Penelitian akan dilakukan di laut Teluk Betung, Lampung sebagai tempat perendaman benda uji seperti dalam aplikasi nyata yaitu lingkungan air laut. Pembuatan dan pengujian sifat mekanik beton (kuat tekan) dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Lampung.

1.6 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini fokus pada pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi kolom beton. Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini akan menggunakan 3 sampel beton kolom $f'c$ 20,75 Mpa. Dimensi 150 mm \times 150 mm \times 1000 mm yang 400 mm masuk ke dalam dasar laut, dan yang 600 mm di atas dasar dan terendam air laut. Sebuah *vibrating wire embedment strain gauge* (VWESG) ditanam pada tiap sampel. Kemudian 9 sampel beton silinder dengan mutu beton rencana 20,75 MPa dimensi 150 mm \times 150 mm \times 300 mm.
2. Pembuatan benda uji menggunakan material antara lain semen *Portland Composite Cement* (PCC) merek Tiga Roda, agregat kasar dari batu pecah, agregat halus dari *quarry* Gunung Sugih dan air dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Lampung.
3. Perencanaan dan *Mix Design* menggunakan pedoman SNI 03-2834-2000 dengan metode *dry mixing* (pencampuran kering) untuk pencampuran material.
4. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian terhadap benda uji kolom beton yang terendam oleh air laut dalam rentang waktu 90 hari dan 9 sampel beton silinder yang akan dilakukan uji kuat tekan untuk umur beton 28, 56, dan 90 hari.
5. Pengujian perilaku deformasi yang meliputi regangan (*strain*) beton dan suhu (*temperature*) dalam beton, dideteksi secara otomatis oleh alat *vibrating wire embedment strain gauge* (VWESG) yang ditanam pada tiap sampel.
6. Pengamatan dilakukan selama 90 hari dengan interval: 0-24 jam, setiap 15 menit; 24-48 jam, setiap 60 menit; hari ke 3-7, setiap 2 jam; hari ke 8-14, 2 kali sehari; hari ke 15-21, 1 kali sehari; hari ke 22-28, 1 kali setiap 2 hari; hari ke 29-56, 2 kali setiap minggu; dan 1 kali setiap minggu pada hari ke 57-90.

1.7 Sistematika Penulisan

Sub Bab ini memaparkan sistematika pembahasan yang menjadi pedoman dalam penyusunan skripsi, terdiri dari:

BAB I : PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang dilakukannya penelitian, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Berisikan tinjauan pustaka tentang penelitian terdahulu yang telah dilakukan dan landasan teori sebagai penunjang penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan uraian mengenai gambaran umum dan metode yang akan digunakan dalam penelitian untuk mengolah data-data yang diperoleh.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan hasil pengumpulan data, pengolahan data, analisis serta pembahasan data penelitian berdasarkan teori yang ada.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisikan kesimpulan akhir yang merupakan hasil dari pembahasan yang didapat dari pengolahan data dan saran dari hasil penelitian tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton (*concrete*) adalah campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*) (SNI 2847, 2019). Massa padat terbentuk setelah campuran beton mengeras seiring bertambahnya umur beton akibat reaksi kimia semen dengan air. Campuran bahan-bahan pembentuk beton harus ditetapkan sedemikian rupa, sehingga menghasilkan beton basah yang mudah dikerjakan, memenuhi kekuatan tekan rencana setelah mengeras dan cukup ekonomis (Untu, 2015). Kekuatan, keawetan dan sifat beton lainnya bergantung pada sifat bahan-bahan dasar, nilai perbandingan bahan-bahannya, cara pengadukan maupun cara pengerjaan selama penuangan adukan beton, cara pemadatan, dan cara perawatan selama proses pengerasan.

Beton yang sering digunakan pada proyek konstruksi yaitu beton normal. Beton normal adalah beton yang mempunyai berat isi 2200–2500 kg/m³ dengan menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah. Beton normal dengan kualitas yang baik yaitu beton yang mampu menahan beban berupa tekanan dengan dipengaruhi oleh bahan-bahan pembentuk, kemudahan pengerjaan (*workability*), faktor air-semen (FAS) dan zat tambahan (*admixture*).

2.1.1 Klasifikasi Beton

Beton diklasifikasikan berdasarkan berat jenisnya dan menurut kelasnya. Berdasarkan berat jenisnya beton dibedakan menjadi beton ringan, beton sedang dan beton berat. Berdasarkan kelas dan mutunya

beton dibedakan menjadi 3 kelas menurut (Mulyono, 2006) adalah sebagai berikut:

- a. Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan *non-struktural*. Pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Mutu kelas I dinyatakan dengan B0.
- b. Beton kelas II adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K 125, K 175, dan K 225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan terhadap mutu bahan-bahan sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu-mutu K 125 dan K 175 dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinu dari hasil-hasil pemeriksaan benda uji.
- c. Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural yang lebih tinggi dari K 225. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap serta dilayani oleh tenaga-tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara kontinu.

Menurut (Tjokrodimuljo, 1996) macam-macam beton menurut jenisnya adalah sebagai berikut:

- a. Beton normal

Beton normal adalah beton yang menggunakan agregat pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar sehingga mempunyai berat jenis beton antara 2200-2400 kg/m³ dengan kuat tekan sekitar 15-40 MPa.

- b. Beton ringan

Beton ringan merupakan beton yang dibuat dengan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan bobot beton normal. Agregat yang

digunakan merupakan hasil dari pembakaran *shale*, lempung, *slates*, residu slag, residu batu bara dan banyak lagi hasil pembakaran vulkanik. Berat jenis agregat ringan sekitar 1900 kg/m^3 atau berdasarkan kepentingan penggunaan strukturnya berkisar antara $1440\text{-}1850 \text{ kg/m}^3$, dengan kekuatan tekan pada umur 28 hari lebih besar dari 17,2 MPa.

c. Beton berat

Beton berat adalah beton yang dihasilkan dari agregat yang memiliki berat isi lebih dari 2400 kg/m^3 . Untuk menghasilkan beton berat digunakan agregat yang mempunyai berat jenis yang besar.

d. Beton massa (*mass concrete*)

Beton massa digunakan untuk pekerjaan beton yang besar dan masif, misalnya untuk bendungan, kanal, pondasi, dan jembatan.

e. Beton siklop

Beton siklop merupakan beton biasa, namun menggunakan agregat dengan ukuran mencapai 20 cm. Proporsi agregat yang lebih besar tidak boleh lebih dari 20 %.

f. Beton hampa (*vacuum concrete*)

Beton ini dibuat seperti beton biasa, namun setelah tercetak padat kemudian air sisa reaksi disedot dengan cara khusus, disebut cara vakum (*vacuum method*). Dengan demikian air yang tinggal hanyalah air yang dipakai sebagai reaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

g. Mortar

Mortar sering disebut juga mortel atau spesi merupakan adukan yang terdiri dari pasir, bahan perekat, kapur dan semen *portland*.

2.1.2 Sifat-Sifat Beton

Sifat-sifat beton pada umumnya dipengaruhi oleh kualitas bahan, cara pengerjaan, dan cara perawatannya. Karakteristik semen mempengaruhi kualitas beton dan kecepatan pengerasannya. Gradasi agregat halus mempengaruhi pengerjaannya, dan gradasi agregat kasar mempengaruhi kekuatan beton. Kualitas dan kuantitas air mempengaruhi pengerasan dan kekuatan beton (Ahmad, dkk, 2009). Beton diharapkan mampu memikul beban yang direncanakan sehingga sifat utama yang harus diperhatikan adalah kekuatan tekan, kekuatan tarik, dan karakteristik tegangan-regangan (modulus elastisitas) dan sifat-sifat fisik diantaranya proses pengerasan, deformasi, dan respon terhadap kondisi lingkungan (Tumingan, 2017). Sifat mekanik beton adalah sebagai berikut:

a. Kekuatan tekan

Kuat tekan beton adalah tegangan akibat beban uniaksial benda uji beton berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm dalam satuan SKSNI 91 MPa (N/mm^2). Benda uji standar British yang digunakan adalah kubus dengan sisi 150 mm. Objek uji ukuran yang berbeda juga dapat digunakan, tetapi ukuran efek harus diubah. *Compression Testing Machine* merupakan alat uji kuat tekan beton secara merusak (*destructive test*) dimana pengujian ini harus dilakukan di laboratorium. Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk mengetahui kekuatan tekan beton pada umur 28 hari.

b. Kekuatan tarik

Kekuatan tarik beton (tegangan tarik) merupakan sifat penting untuk memprediksi retak dan lendutan beton yang ditentukan dengan uji tekuk atau belah. Kekuatan tarik berbanding terbalik terhadap kuat tekan beton. Kekuatan tarik beton jauh lebih kecil sekitar 10-15% dari kekuatan tekannya.

c. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas beton adalah perbandingan antara kuat tekan beton dengan regangan beton, ditentukan sebesar $E = 4700 \times \sqrt{f'_c}$, dengan f'_c adalah kuat tekan beton.

2.1.3 Material Pembentuk Beton

Bahan pembentuk beton terdiri dari semen, campuran agregat halus dan kasar, serta air sebagai pengikat. Penjelasan material-material komposisi campuran beton menurut (Tjokrodinuljo, 1996) adalah sebagai berikut:

a. Semen

Semen merupakan bahan ikat yang mengubah semen menjadi pasta semen. Pasta semen membentuk mortar saat ditambah agregat halus, jika digabungkan dengan agregat kasar menghasilkan campuran beton segar yang setelah mengeras akan menjadi beton keras (*hardened concrete*). Semen berfungsi untuk mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara diantara butiran agregat.

Semen dibedakan menjadi semen *non*-hidrolik dan semen hidrolik. Semen *non*-hidrolik tidak dapat mengikat dan mengeras di dalam air, akan tetapi dapat mengeras di udara contohnya adalah kapur. Semen hidrolik mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mengeras di dalam air. Contoh semen hidrolik antara lain; kapur hidrolik, semen pozolan, semen terak, semen alam, semen *portland*, semen *portland pozollan* dan semen alumina.

Pozolan adalah bahan yang mengandung senyawa silika dan aluminium silika yang tidak mempunyai sifat perekat (sementasi) pada dirinya sendiri, tetapi dengan butirannya yang sangat halus bisa bereaksi dengan kapur dan air membentuk bahan perekat (senyawa

yang bersifat hidrolis) pada temperatur normal (ASTM C618-03). Spesifikasi Kimia dan Fisika Menurut ASTM C618-03 untuk material yang bersifat pozzolan jenis N (*natural pozzolan*) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Kimia dan Fisika Pozolan

Ketentuan Kimia	Jenis N
Oksida Silika (SiO ₂) + Oksida Alumina (Al ₂ O ₃) + Oksida Besi (Fe ₂ O ₃)	Min 70,0%
Trioksida Sulfur (SO ₃)	Max 4,0%
Kadar Air	Max 3,0%
Ketersediaan alkali (Na ₂ O)	Max 1,5%
Ketentuan Fisika	
Kehalusan (tertahan ayakan no 325)	Max 34%

(Sumber: ASTM C618-03)

Sifat-sifat semen *portland* adalah sebagai berikut:

1. Kehalusan butiran

Kehalusan butir semen mempengaruhi proses hidrasi. Butiran semen yang lewat ayakan no.200 harus lebih dari 78%. Semakin halus butiran semen, proses hidrasinya semakin cepat, sehingga kekuatan awal tinggi dan kekuatan akhir akan berkurang. Kehalusan butiran semen yang tinggi dapat mengurangi terjadinya *bleeding* atau naiknya air kepermukaan, tetapi menambah kecenderungan beton untuk menyusut lebih banyak dan mempermudah terjadinya retak susut.

2. Waktu ikat

Waktu ikat (*setting time*) adalah waktu yang diperlukan semen untuk mengeras, dihitung mulai dari bereaksi dengan air dan menjadi pasta semen hingga pasta semen cukup kaku untuk menerima tekanan. Waktu ikat semen dibedakan menjadi dua, yaitu:

- Waktu ikat awal (*initial setting time*), yaitu waktu dari pencampuran semen dengan air menjadi pasta semen hingga hilangnya sifat keplastisan.
- Waktu ikat akhir (*final setting time*), yaitu waktu antara terbentuknya pasta semen hingga beton mengeras.

Waktu ikat awal semen *portland* berkisar 1-2 jam, tetapi tidak boleh kurang dari 1 jam. Waktu ikat akhir semen *portland* tidak boleh lebih dari 8 jam. Untuk kasus-kasus tertentu, diperlukan (*initial setting time*) lebih dari 2 jam agar waktu terjadinya ikatan awal lebih panjang. Waktu yang panjang ini diperlukan untuk transportasi (*hauling*), penuangan (*dumping/pouring*), pemadatan (*vibrating*), dan perataan permukaan.

3. Panas hidrasi

Panas hidrasi adalah panas yang terjadi pada saat semen bereaksi dengan air, dinyatakan dalam kalori/gram. Jumlah panas yang dibentuk antara lain bergantung pada jenis semen yang dipakai dan kehalusan butiran semen. Dalam pelaksanaan, perkembangan panas ini dapat mengakibatkan masalah yakni timbulnya retakan pada saat pendinginan. Pada beberapa struktur beton, terutama pada struktur beton mutu tinggi, retakan ini tidak diinginkan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pendinginan melalui perawatan (*curing*) pada saat pelaksanaan.

4. Perubahan volume (kekalan)

Kekalan pasta semen yang telah mengeras merupakan suatu ukuran yang menyatakan kemampuan pengembangan bahan-bahan campurannya dan kemampuan untuk mempertahankan volume setelah pengikatan terjadi. Perubahan volume dapat menyebabkan kerusakan dari suatu beton, karena itu pengembangan beton dibatasi 0,8%. Pengembangan semen ini disebabkan karena adanya CaO bebas, yang tidak sempat

bereaksi dengan oksida-oksida lain. CaO bereaksi dengan air membentuk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan pada saat kristalisasi volumenya akan membesar. Akibat pembesaran volume tersebut, ruang antar partikel terdesak dan akan timbul retak-retak.

5. Senyawa kimia

Bahan utama pembuatan semen terdiri dari kapur, silika, alumina, dan oksida besi yang dicampur menjadi satu, lalu dibakar dalam tungku, sehingga menghasilkan material baru, serta sedikit sisa pembakaran kapur yang tidak sempat bereaksi menjadi bentuk kimia yang setimbang (Wedhanto S, 2017). Komponen utama semen dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen Utama Semen

Nama Campuran	Komposisi Oksida	Rumus Kimia
<i>Trikalsium Silikat</i>	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
<i>Dikalsium Silikat</i>	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
<i>Trikalsium Aluminat</i>	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
<i>Tetrakalsium Aluminoforit</i>	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

(Sumber: Neville dan Brooks, 1987 dalam Wedhanto S, 2017).

Silikat, (C_3S), dan (C_2S) merupakan senyawa paling penting, sebab ke tiga bahan itu menentukan kekuatan dari pasta semen. Kandungan silikat pada semen bukan merupakan campuran yang murni, melainkan mengandung sedikit oksida padat yang secara signifikan akan mempengaruhi susunan atom, bentuk kristal, dan perilaku hidrolis semen.

Kandungan C_3A pada semen sebenarnya tidak dikehendaki, sebab hanya sedikit saja atau bahkan sama sekali tidak memberi nilai tambah pada kekuatan semen, terkecuali saat umur-umur awal. Pasta semen mengalami kontak dengan sulfat saat pengerasan, kalsium sulphoaluminat (*ettringite*) akan

mengganggu proses pengerasan pasta semen namun C_3A tetap dibutuhkan, karena fungsinya memudahkan bercampurnya kapur dengan silika.

Kadar kandungan C_4AF jumlahnya paling sedikit, sehingga tidak memberikan pengaruh terhadap semen secara signifikan, namun demikian reaksi antara C_4AF dengan gypsum membentuk kalsium sulphoferit, keberadaan C_4AF akan mempercepat terjadinya reaksi pada silikat.

Peningkatan kehalusan semen adalah hasil dari penambahan jumlah C_3A yang diberikan pada usia-usia muda. Penambahan ini akan menaikkan kebutuhan gypsum pada semen, namun jika ditambah dalam jumlah berlebihan justru memicu semen untuk mengembang dan kemudian mengakibatkan pasta semen pecah. Komposisi kimia semen dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perkiraan Komposisi Semen PC

Oksida	Persen Kandungan
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	0,5 – 6,0
MgO	0,1 – 4,0
Alkalis	0,2 – 1,3
SiO ₃	1 – 3

(Sumber: Neville dan Brooks, 1987 dalam Wedhanto S, 2017).

Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen PPC dengan merk Tiga Roda. *Portland composite cement* adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan terak semen *portland* dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik (SNI 15-7064-2004). Komposisi semen Tiga Roda seperti pada (Tabel 4).

Tabel 4. Komposisi Semen PCC Tiga Roda

No	Kandungan	Persen Kandungan
1	SiO ₂	23,04
2	Fe	3,36
3	SO ₄	2,00
4	Ca	57,38
5	Mg	1,91
6	Al	7,40

(Sumber: PT. Tiga Roda)

Jenis-jenis semen *portland* adalah sebagai berikut:

1. Tipe I, semen *portland* yang dalam penggunaannya tidak memerlukan persyaratan khusus seperti jenis-jenis lainnya. Jenis ini paling banyak diproduksi karena digunakan untuk hampir semua jenis konstruksi.
2. Tipe II, semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi dengan tingkat sedang. Semen jenis ini digunakan untuk konstruksi bangunan dan beton yang terus-menerus berhubungan dengan air kotor atau air tanah atau untuk pondasi yang tertahan didalam tanah yang mengandung air agresif (garam-garam sulfat).
3. Tipe III, semen *portland* yang memerlukan kekuatan awal yang tinggi. Kekuatan 28 hari umumnya dapat dicapai dalam 1 minggu. Semen jenis ini dipakai ketika acuan harus dibongkar secepat mungkin atau ketika struktur harus dapat cepat dipakai.
4. Tipe IV, semen *portland* yang dalam penggunaannya diperlukan panas hidrasi yang rendah. Semen jenis ini digunakan untuk pekerjaan-pekerjaan dimana kecepatan dan jumlah panas yang timbul harus minimum. Misalnya pada bangunan seperti bangunan gravitasi yang besar.
5. Tipe V, semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan yang tinggi terhadap sulfat. Semen jenis ini digunakan untuk bangunan yang berhubungan dengan air laut

serta untuk bangunan yang berhubungan dengan air tanah yang mengandung sulfat dalam kadar yang tinggi.

b. Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton. Kandungan agregat dalam campuran beton berkisar antara 60-70% dari volume beton. Dari asalnya agregat terbagi menjadi dua jenis, yaitu agregat alam dan agregat buatan (pecahan). Dari ukurannya agregat terbagi menjadi agregat kasar dan agregat halus:

1. Agregat kasar

Agregat kasar adalah agregat yang butirannya tertahan pada ayakan berlubang 4.8 mm (SII.0052-1980) atau 4.75 mm (ASTM C33-1982) atau 5.0 mm (BS.812-1976). Penggunaan agregat yang memiliki ketahanan terhadap reaksi alkali-agregat (RAA) dapat mengurangi kerusakan pada beton. Syarat gradasi agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Syarat Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Ayakan (mm)	Persentase Lolos Ayakan Kumulatif		
	Ukuran Maksimum 10 mm	Ukuran Maksimum 20 mm	Ukuran Maksimum 40 mm
76	-	-	100 – 100
38	-	100 – 100	95 – 100
19	100 – 100	95 – 100	35 – 70
9,6	50 – 85	30 – 60	10 – 40
4,8	0 – 10	0 – 10	0 – 5

(SNI 03-2834-2000)

Persyaratan agregat kasar yang digunakan sebagai bahan campuran beton menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 adalah sebagai berikut:

- Agregat kasar dalam beton dapat berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan–batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu.
- Agregat kasar harus terdiri dari butir–butir yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir–butir yang pipih hanya dapat dipakai, apabila jumlah butir–butir yang pipih tersebut tidak melampaui 20% dari berat agregat seluruhnya. Butir–butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh–pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
- Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% (ditentukan terhadap berat kering). Lumpur adalah bagian–bagian yang dapat melalui ayakan berukuran 0.063 mm. Apabila kadar lumpur melebihi 1% maka agregat kasar harus dicuci.
- Agregat kasar tidak boleh mengandung zat–zat yang dapat merusak beton, seperti zat–zat yang reaktif alkali.

2. Agregat halus

Agregat halus (pasir) yang digunakan sebagai bahan di dalam perencanaan campuran beton merupakan butiran-butiran mineral keras yang bentuknya mendekati bulat dan ukuran butiran antara 0.075-4.75 mm. Pasir dapat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi dari batu-batuan atau berupa pecahan batu yang dihasilkan oleh alat atau mesin pemecah batu (SNI-03-6821-2002), dan tidak mengandung kotoran atau sampah. Syarat gradasi agregat halus dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Syarat Gradasi Agregat Halus

Ukuran Ayakan (mm)	Persentase Lolos Ayakan Komulatif			
	Zona			
	1	2	3	4
9,6	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

(Sumber: SNI 03-2834-2000)

Persyaratan agregat halus yang digunakan sebagai bahan campuran beton menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 adalah sebagai berikut:

- Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan–batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan alat–alat pemecah batu.
- Agregat halus yang digunakan harus terdiri dari butir–butiran yang tajam, keras serta bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh–pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Apabila kadar lumpur melebihi 5%, maka agregat halus harus dicuci.
- Agregat halus tidak boleh mengandung bahan–bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abram–Harder (dengan larutan NaOH).

c. Air

Air merupakan bahan dasar pembuat beton yang penting. Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen, serta sebagai bahan pelumas antar butir-butir agregat agar mudah dikerjakan dan

dipadatkan. Kandungan air yang rendah menyebabkan beton sulit dikerjakan (tidak mudah mengalir), dan kandungan air yang tinggi menyebabkan kekuatan beton akan rendah serta betonnya porous (berongga).

Air yang digunakan sebagai campuran beton harus bersih, tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, zat organik atau bahan lainnya yang dapat merusak beton. Syarat air untuk campuran beton adalah sebagai berikut:

1. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
4. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Perawatan (*curing*) dapat menggunakan air yang dipakai untuk pengadukan, tetapi tidak boleh menimbulkan noda atau endapan yang merusak warna permukaan beton. Besi dan zat organik dalam air umumnya adalah penyebab utama pengotoran atau perubahan warna, terutama jika perawatan cukup lama.

2.2 Lingkungan Laut

Lingkungan laut dapat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan kolom beton. Semakin tinggi konsentrasi garam, semakin rendah kekuatan dan ketahanan kolom beton. Air laut mengandung garam-garam laut $\pm 3.5\%$ dari beratnya. Konsentrasi garam pada air laut sangat beragam tergantung pada lokasinya sehingga terdapat perbedaan antara satu lokasi dengan lokasi lainnya. Perkiraan komposisi kadar ion yang terkandung dalam air laut pada umumnya dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Komposisi Ion pada Air Laut

Nama Umum	Ion	(g)
Sodium	Na	10360
Magnesium	Mg ²⁺	1,294
Kalsium	Ca ²⁺	0,413
Potassium	K ⁺	0,387
Strontium	Sr ²⁺	0,008
Clorida	Cl ¹⁻	19,353
Sulfat	SO ₄ ²⁻	2,712
Bromiae	Br-	0,008
Boron	N ₃ B ₃	0,001
Bikarbonat	HCO ³⁻	0,142
Fluor	F ¹⁻	0,001

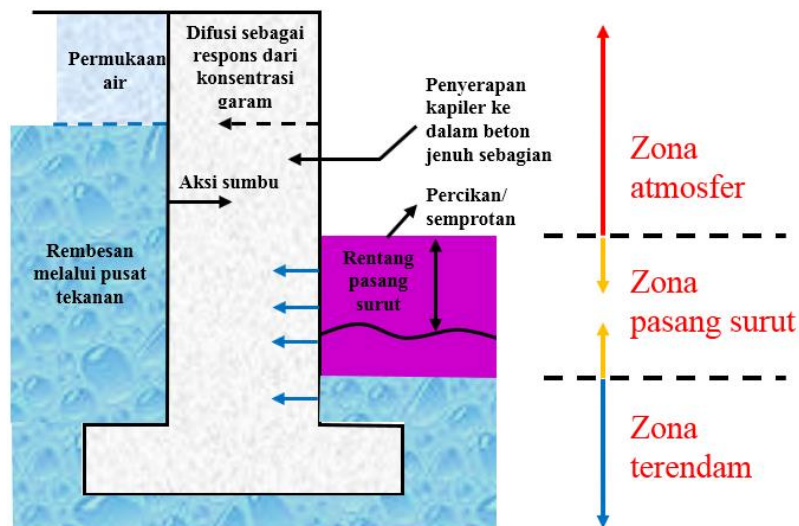
(Sumber: Emmanuel dkk, 2012)

Konsentrasi ion Na^+ dan Cl^- sekitar 11000 dan 20000 mg/L, sedangkan ion Mg^{+2} dan SO_4^{-2} kurang lebih 1400 dan 2700 mg/L. Air laut mempunyai pH 7.5-8.4 (Khirunnisa, dkk, 2019).

2.2.1 Pengaruh Zona Paparan Laut terhadap Struktur Beton

Dampak kerusakan yang dialami beton dalam lingkungan laut berbeda-beda tergantung dari zona paparannya. Zona atmosfer, pasang surut, dan terendam merupakan tiga zona bidang kontak beton dengan air laut. Zona pasang surut memiliki pengaruh yang sangat merusak daripada zona lainnya sehingga menyebabkan penurunan kekuatan dan ketahanan pada struktur beton (Santhanam, 2016).

Proses utama di bawah lingkungan laut biasanya termasuk bagian-bagian berikut: penyerapan kapiler, permeasi, difusi ionik, migrasi, dan konveksi. Kondisi paparan yang berbeda di bawah lingkungan laut dapat dilihat pada Gambar 1.



(Sumber: Qu dkk, 2021)

Gambar 1. Kondisi paparan yang berbeda di bawah lingkungan laut.

Penjelasan Zona paparan laut pada struktur beton pada Gambar 1 adalah sebagai berikut:

a. Zona atmosfer

Zona atmosfer merupakan zona yang berada di atas zona pasang surut (*tidal zone*). Kerusakan yang terjadi pada daerah ini menyerupai kerusakan pada *tidal zone* namun dalam tingkatan yang lebih rendah. Struktur terkena klorida di udara dengan demikian, korosi baja yang diinduksi klorida dapat menjadi mekanisme kerusakan di zona ini. Selanjutnya, struktur dapat mengalami korosi akibat karbonasi tergantung pada faktor lain seperti kelembapan relatif atau suhu. Namun, dibandingkan dengan korosi yang disebabkan oleh karbonasi, korosi yang disebabkan oleh klorida akan menjadi mekanisme kerusakan utama.

Mekanisme pengangkutan, difusi gas maupun uap air dapat terjadi dalam kondisi paparan ini. Selain difusi, penyerapan adalah mekanisme transportasi lain yang terjadi karena pembasahan dan pengeringan bergantian oleh hujan. Selanjutnya, degradasi fisik struktur dapat terjadi karena kristalisasi garam (Santhanam dan Otieno, 2016)

b. Zona pasang-surut

Zona pasang surut merupakan zona yang mengalami siklus basah-kering oleh air laut. Pada *tidal zone* gelombang mencapai level air tertinggi (*highest high water level*) dan terendah (*lowest low water level*). Struktur beton yang terekspos ke zona pasang surut umumnya mengalami kerusakan paling parah (Wu, 2017). Keagresifan zona pasang surut juga dipengaruhi oleh kondisi iklim, variabilitas spasial, dan frekuensi pasang naik dan surut.

Semua mekanisme, seperti difusi, absorpsi, absorpsi inti, dan osmosis, memainkan peran penting dalam pengangkutan jenis invasif di zona tersebut (Qu, 2021). Selain itu, aksi mekanis gelombang dapat menyebabkan keausan. Kerusakan akibat keausan dapat berinteraksi dengan siklus pembasahan-pengeringan dan menyebabkan kristalisasi garam. Serangan fisik dan kimia dialami beton dan tulangan sehingga rentan terhadap korosi karena kombinasi antara kelembapan, garam, dan oksigen.

c. Zona terendam

Beton yang terendam seluruhnya dalam air laut (*submerged zone*) secara terus-menerus tidak mengalami penyerapan, tetapi pengaruh rembesan akan lebih besar dibandingkan dengan mekanisme transportasi dalam kondisi atmosfer dan pasang surut. Dengan demikian, impermeabilitas akan lebih penting daripada kekuatan. Beton dapat mengalami penurunan laju (*degradation*) mutu sebagai akibat dari proses kerusakan kimia seperti erosi sulfat atau pencucian dan kerusakan oleh klorida. Laju korosi karena kandungan klorida dalam air laut tergantung pada ketersediaan oksigen. Korosi tulangan jarang terjadi pada bagian ini karena kekurangan oksigen.

2.2.2 Mekanisme Kimia Kerusakan Beton

Pengaruh kimia air laut terhadap beton terutama disebabkan oleh serangan Magnesium Sulfat ($MgSO_4$), namun demikian tingkat kerusakan juga dipengaruhi oleh lingkungan di sekitarnya. Reaksi kimia yang terjadi pada beton oleh air laut mengalami fase perubahan. Fase asli dan berubah komposit semen yang terpapar air laut dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Fase Asli dan Terubah Komposit Semen yang Terpapar Air Laut.

Fase Asli	Fase Terubah
Kalsium Hidroksida	Gypsum, <i>Brucite</i> , Aragonit
Kalsium silikat hidrat (CSH)	CSH yang dideklasifikasi dalam beberapa kasus, Magnesium Silikat Hidrat (MSH), <i>Thaumasite</i>
Kalsium aluminat hidrat (CSH) dan garam AFm	Garam Fridel, <i>Ettringite</i>

(Sumber: Santhanam dan Otiento , 2016)

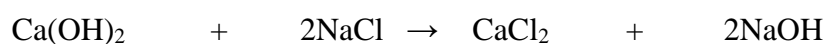
Fase pertama adalah reaksi air laut dengan kalsium hidroksida menghasilkan lapisan ganda berupa gipsium dan *brucite* (bentuk padatan magnesium hidroksida). Kemudian, konsentrasi CO_2 terlarut dalam air laut dapat menyebabkan lapisan aragonit (mineral karbonat) stabil yang mengendap pada bagian permukaan beton. Lapisan aragonit dapat bertindak sebagai penghalang sementara untuk mencegah masuknya air laut. Seiring berjalannya waktu, lapisan pelindung melemah akibat dari reaksi lain yang terjadi pada sistem ditambah aksi mekanis (erosi) air laut sehingga lapisan beton di bawahnya dapat ditembus oleh reaksi selanjutnya.

Gypsum ($CaSO_4$) yang terbentuk dapat bergabung dengan kalsium sulfoaluminat (C_4A_3S) dalam sistem dan menyebabkan pembentukan

ettringite ($C_6AS_3H_{32}$). Namun, *ettringite* yang terbentuk dalam kondisi kadar klorida yang tinggi tidak bersifat ekspansif (Metha, 1991). Klorida seperti ini merupakan faktor ameliorasi dalam serangan air laut pada beton. Kalsium alumina ($3CaO.Al_2O_3$) yang berkurang akibat peningkatan klorida untuk membentuk garam friedel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) atau senyawa serupa akan mengurangi tingkat pembentukan *ettringite*. Senyawa seperti garam friedel bersifat tidak ekspansif. *Etrtringite* dan gipsium ditemukan pada bagian yang lebih dekat ke permukaan beton sementara garam friedel lebih banyak terdapat pada area dalam (Brown dan Badger, 2000).

Fase berikutnya adalah deklasifikasi kalsium silikat hidrat (CSH) yang dikonversi menjadi *noncementitious* MSH (Santhanam dkk, 2006). Dalam simulasi yang dilakukan (Kurdowski, 2004) untuk menguji serangan air laut pada pasta CSH, ditemukan bahwa difusi Cl jauh lebih cepat daripada Mg^{2+} . CSH dideklasifikasi atau diuraikan dengan cepat dalam larutan klorida yang kuat (seperti air laut) seiring dengan pembentukan MSH. Lapisan *brucite* dan magnesium klorida juga terbentuk di bawah lapisan permukaan. Pasta tersebut mengandung fase seperti garam friedel.

Permeasi dan absorpsi merupakan proses pengangkutan yang dapat terjadi dalam lingkungan laut. Pengangkutan klorida ke dalam beton melalui difusi menyebabkan korosi pada baja tulangan. Proses serangan klorida pada beton (Islam, dkk, 2010) dituliskan dalam reaksi kimia adalah sebagai berikut:

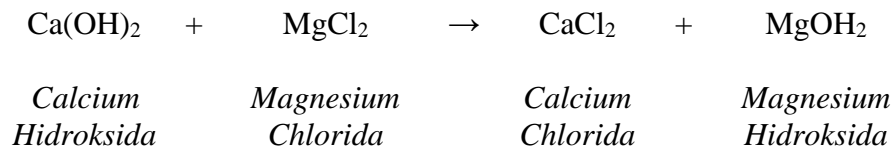


Calcium *Sodium* *Calcium* *Sodium*
Hidroksida *Clorida* *Clorida* *Hidroksida*



Calcium *Tri-Calcium* Air *Calcium Chloroaluminate*
Clorida *Aluminate* (Garam Friedel)

MgCl₂ setelah bereaksi dengan Ca(OH)₂ dari hidrat semen, membentuk kalsium klorida yang akan larut lalu merembes dalam beton sebagai awal terjadinya degradasi material menjadi lebih lunak. Reaksi kimianya ditulis seperti di bawah ini (Mehta, 1986).



Bentuk dari *ettringite* (*calcium aluminat sulfat*) yang mengembang biasanya dianggap sebagai serangan sulfat. *Ettringite* dan *gypsum*, keduanya menempati 20% dari besar volume kristal pori-pori beton, sehingga kristal tersebut akan menimbulkan tegangan di dalam beton, yang kemudian mengakibatkan timbulnya retak-retak di permukaan beton, dan dikenal sebagai serangan sulfat yang lunak. Biasanya retakan itu berasal dari bentukan merekahnya *ettringite*.

2.2.3 Mekanisme Fisik Kerusakan Beton

Pembentukan fase seperti gipsum dan *ettringite* menyebabkan penurunan kualitas zona permukaan beton. Efek keseluruhan dari serangan kimia adalah penurunan progresif dalam integritas beton. Beton permukaan menjadi lebih lemah dan lebih rentan terhadap erosi oleh aksi percikan ombak. Mekanisme kimia dan fisik bertindak bersama untuk menyebabkan kerusakan pada beton. Zona pasang surut tidak hanya menyebabkan fenomena pengeringan dan pembasahan, namun juga menciptakan konsentrasi kimiawi tinggi yang tidak normal pada permukaan beton. Tingkat kerusakan yang tercipta di permukaan tergantung pada porositas yang tersedia, kejenuhan garam dan adanya gaya tolak antara garam dan permukaan pori (Scherer, 2004).

2.3 Deformasi Kolom Beton

Deformasi yang terjadi pada kolom beton dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti beban yang diberikan dan lingkungan sekitarnya. Semakin besar beban aksial yang diberikan pada kolom beton bertulang, semakin besar deformasi yang terjadi (Setiawan, 2018). Deformasi pada beton bertulang dapat berupa deformasi elastis atau plastis. Deformasi elastis terjadi saat beban diterima oleh struktur beton dan struktur masih kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, sedangkan deformasi plastis terjadi saat struktur mengalami perubahan bentuk yang permanen setelah melebihi batas elastisitas.

Penetrasi air laut ke dalam beton menyebabkan korosi pada tulangan baja dan perubahan dimensi pada beton. Faktor-faktor lingkungan seperti kelembapan dan suhu mempengaruhi kembang susut dan deformasi pada kolom beton bertulang (Khoo dan Choo 2014). Kolom beton bertulang yang terpapar pada lingkungan air laut memiliki resiko lebih tinggi terhadap deformasi dan susut dibandingkan dengan yang terpapar pada lingkungan daratan. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan tegangan tarik pada beton dan tulangan baja, yang mengakibatkan retak, kapasitas beban yang berkurang, dan kegagalan struktural.

2.3.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Deformasi Kolom Beton

Faktor-faktor yang mempengaruhi deformasi kolom beton adalah sebagai berikut:

a. Susut beton

Penyusutan beton adalah perubahan volume yang terjadi selama dua tahap penuaan beton secara berurutan, yaitu tahap awal pengikatan dan pengerasan jangka panjang (Holt, 2005). Penyusutan meliputi penyusutan plastis, penyusutan kimiawi (termasuk penyusutan *autogenous*), dan penyusutan akibat pengeringan.

Penyusutan plastis terjadi segera setelah beton segar dibuat yang merupakan tahap yang sangat awal ketika beton masih segar dan struktur padat yang akan menahan diri sendiri “*hold the body in place*” belum terbentuk. Besarnya susut plastis tergantung pada penguapan air dari beton segar atau penyerapannya ke dalam badan beton kering atau tanah di bawahnya serta perdarahan campuran segar atau *fresh mixture bleeding*. Penyusutan kimiawi terjadi akibat reaksi semen dengan air. Penyusutan *autogenous* disebut juga penyusutan *self desiccation* karena terjadi selama ada air dalam struktur pori.

Perubahan volume dapat terjadi akibat perubahan suhu. Perubahan volume seperti itu dapat diamati pada tahap awal pengerasan serta selama proses pengerasan dan penuaan jangka panjang. Penyusutan *autogenous* dipengaruhi oleh suhu. Saat suhu naik, besarnya penyusutan *autogen* pada usia dini meningkat, sedangkan pada usia selanjutnya pengaruh ini tampak dapat diabaikan (Tazawa dan Miyazawa, 1997).

b. Rangkak

Rangkak (*creep*) atau *lateral material flow* diartikan sebagai penambahan regangan terhadap waktu akibat adanya beban yang bekerja. Rangkak pada beton terjadi karena adanya perubahan kadar air pada beton. Rangkak timbul dengan intensitas yang semakin berkurang setelah selang waktu tertentu dan berakhir setelah beberapa tahun. Faktor- faktor yang mempengaruhi rangkak adalah sebagai berikut:

1. Sifat dan bahan dasar beton (komposisi dan kehalusan semen, kualitas adukan, dan kandungan material dalam agregat).
2. Rasio air terhadap jumlah semen (*water-cement ratio*).
3. Suhu pada saat pengerasan (*temperature*).
4. Kelembapan nisbi pada saat proses pengerjaan (*humidity*).

5. Umur beton saat beban bekerja.
6. Nilai *slump* (*slump test*).
7. Lama pembebanan.
8. Nilai tegangan.

c. Pembengkakan beton

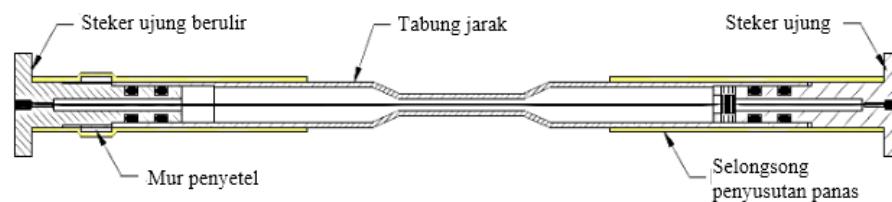
Istilah bengkak beton dapat ditemui lebih sering sehubungan dengan fenomena yang diamati dalam 24 jam pertama setelah pencampuran semen dengan air. Besarnya pembengkakan tergantung pada jumlah semen dan air yang terkandung dalam beton. Secara umum, semakin tinggi takaran semen, maka semakin besar nilai pertambahan volume yang terjadi. Penjelasan pertambahan volume beton adalah sebagai berikut:

1. Pembengkakan sangat bergantung pada komposisi kimia, permukaan spesifik, dan gradasi semen yang digunakan.
2. Pertambahan nilai pengembangan juga terkait dengan distribusi kelembapan dalam struktur pori beton. Kandungan air pencampur dalam beton yang naik ke permukaan komposit (setelah distribusi agregat dan semen dalam dispersi beton segar sudah stabil) dan menyebabkan perdarahan beton atau *concrete bleeding*. Setelah pembengkakan plastis selesai, kelebihan air pada permukaan atas spesimen ini ditarik kembali ke dalam dan kemudian mengeraskan pasta semen, mengisi kembali pori-pori yang tercipta selama hidrasi semen. Reabsorpsi air ini menyebabkan pembengkakan beton. Fenomena ini dianggap berasal dari ekspansi *autogenous*.
3. Pembengkakan juga dapat didukung oleh pembentukan beberapa produk hidrasi yang memiliki volume molar lebih besar dari reaktan aslinya. Panas yang dihasilkan selama hidrasi semen memiliki efek yang besar pada peningkatan volume beton karena menyebabkan ekspansi termal.

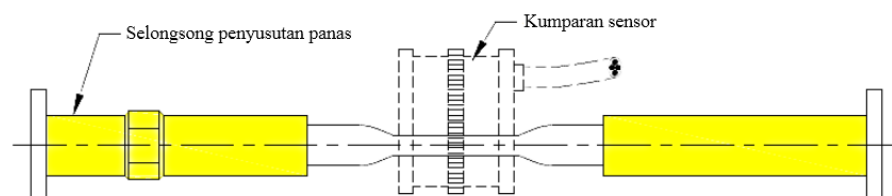
Hasil pembengkakan beton biasanya dari aksi beberapa faktor yang menyebabkan bertambahnya volume suatu elemen beton. Faktor yang paling signifikan adalah sifat-sifat semen, kadar air, distribusi kelembapan dalam struktur pori beton, aliran panas, besarnya panas hidrasi, adanya aditif atau admixtures, dan metode perawatan beton.

2.4 *Vibrating Wire Embedment Strain Gauge (VWESG)*

Pengukur regangan kawat getar tipe tertanam (*embedment*) digunakan untuk mengukur regangan internal dalam struktur beton dengan cara ditanam pada struktur menggunakan satu konfigurasi multi-sumbu. VWESG mampu mendeteksi regangan hingga $3000 \mu\epsilon$ (mikro regangan) dengan akurasi sekitar 5% dan suhu beton antara -80°C dan 60°C dengan akurasi sekitar 5% (Niken dkk, 2017). Setiap pengukur berisi kawat baja bertegangan tarik tinggi di antara dua ujung flensa dan terbungkus oleh tabung baja. Ketika pengukur regangan tertanam dalam beton, regangan yang dihasilkan dari tegangan yang terjadi dalam beton akan mempengaruhi frekuensi alami osilasi kawat. Regangan pada beton sebanding dengan kuadrat frekuensi osilasi kawat dan pada alat pengukur, sehingga memberikan sistem yang sensitif untuk mengukur regangan internal. Alat VWESG dapat dilihat pada Gambar 2.



(a). Tampilan potongan VWESG.



(b) Tampilan samping alat VWESG.

(Sumber: www.encardio.com)

Gambar 2. Alat *vibrating wire embedment strain gauge*.

Kelebihan VWESG adalah memiliki frekuensi keluaran yang tahan terhadap kebocoran arus dan dapat mentoleransi instalasi kabel pada kondisi basah dan memiliki kapasitas mengirim sinyal dengan radius beberapa kilometer tanpa kehilangan sinyalnya.

2.5 Landasan Teori

2.5.1 Kuat Tekan Beton

Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan per satuan luas. Kuat tekan beton bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton. Kecepatan bertambahnya kekuatan tekan beton tersebut sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain: faktor air-semen dan suhu perawatan. Semakin tinggi faktor air-semen maka semakin lambat kenaikan kekuatan betonnya, dan semakin tinggi suhu perawatan maka semakin cepat kenaikan kekuatan betonnya (Ginting A, 2011).

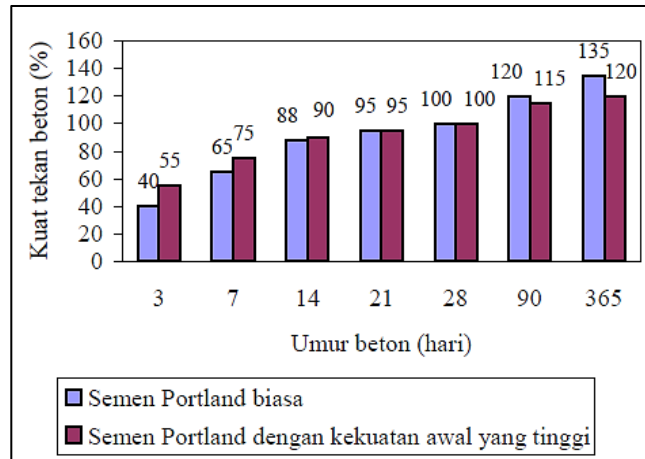
Jenis semen yang digunakan berpengaruh terhadap laju peningkatan kuat tekan beton. Peningkatan kuat tekan beton yang menggunakan PCC relatif lebih lambat di umur awal dibandingkan dengan yang menggunakan PC tipe 1.

Menurut (Tjokrodinuljo, 1996) faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan beton adalah sebagai berikut:

- a. Faktor air semen dan kepadatan.
- b. Umur beton.
- c. Jenis semen.
- d. Jumlah semen.
- e. Sifat agregat.

Kuat tekan beton menandakan mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi kekuatan struktur yang direncanakan, semakin tinggi pula mutu

beton yang harus dihasilkan. Pada beberapa Peraturan Beton Bertulang terdapat perkiraan kuat tekan beton pada berbagai umur, dan dianggap mencapai kekuatan 100% pada umur 28 hari. Berdasarkan Peraturan Beton Bertulang (PBI, 1971) kuat tekan beton berdasarkan umur dapat dilihat pada Gambar 3.



(Sumber: Ginting A, 2011)

Gambar 3. Kuat tekan beton berdasarkan umur.

Nilai kuat tekan beton berbanding terbalik dengan kuat tariknya. Kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan rumus:

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan:

$f'c$: Kuat tekan (MPa)

P : Beban (N)

A : Luas permukaan penampang (mm^2)

2.5.2 Susut Beton

Susut adalah sifat beton yang menyebabkan mengecilnya volume beton akibat berkurangnya kadar air dan hilangnya kelembapan pada proses pengerasan. Susut plastis adalah susut yang terjadi cepat atau sesaat setelah beton dicor. Sedangkan susut pengeringan adalah susut yang terjadi setelah beton mencapai titik keras dan proses hidrasi semen telah berakhir.

Metode untuk menghitung deformasi beton pada ACI 209R-92 adalah sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{1}{E_0} + \frac{\psi_1}{E_0} (t_{la})^{-\frac{1}{3}} t^{\frac{1}{8}} \dots\dots\dots(2)$$

ϵ : Regangan (m/m)

Dimana:

- $\frac{1}{E_0} = \frac{0,83}{E_{ct}} \dots\dots\dots(3)$

Dengan:

$$E_{ct} = g_{ct} [w^3 (f'_c)_t]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4)$$

- E_{ct} : modulus elastisitas beton yang tidak mengalami pengeringan (MPa)
- g_{ct} : konstanta (0,043)
- w : berat satuan beton (kg/m^3)
- f'_c : kuat tekan beton (MPa)

- $\psi_1 = 0,97 V_u \dots\dots\dots(5)$

Dengan:

$$V_u = 2,35 \gamma_c \dots\dots\dots(6)$$

$$\gamma_c = 0,75 + 0,00061 \times c \dots\dots\dots(7)$$

- V_u : Koefisien regangan ultimit
- γ_c : adalah faktor koreksi akibat kandungan semen (kg/m^3)
- c : adalah kandungan semen (kg/m^3)

- $t_{la} =$ Umur beton di air laut (hari)

- $t =$ Umur beton (hari)

2.5.3 *Vibrating Wire Embedment Strain Gauge (VWESG)*

Pengukur regangan kawat getar bekerja berdasarkan prinsip bahwa perubahan frekuensi yang dikendalikan sesuai dengan perubahan tegangan (Gupta dkk, 2017). Pengukur regangan kawat bergetar pada dasarnya terdiri dari magnet. Kawat regangan berkekuatan tarik tinggi, salah satu ujungnya ditambatkan dan ujung lainnya bergeser secara proporsional terhadap variasi regangan. Kawat yang diregangkan diberi batasan termal untuk meminimalkan penyimpangan jangka panjang dan perubahan kalibrasi.

Pengukur regangan bekerja berdasarkan prinsip bahwa jika rakitan kumparan/magnet menarik kawat yang meregang dengan panjang tetap; frekuensi getarannya sebanding dengan tegangan pada kawat. Setiap perubahan regangan, secara langsung mempengaruhi tegangan pada kawat, yang menghasilkan perubahan frekuensi getaran yang akurat.

Regangan sebanding dengan kuadrat frekuensi yang dapat diukur dan ditampilkan secara langsung dalam regangan μ (mikro) oleh indikator kawat getar. Kawat ditarik oleh magnet kumparan sebanding dengan tegangan, kawat beresonansi pada frekuensi “f”, yang dapat ditentukan sebagai berikut:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma g}{\rho}} \dots\dots\dots(8)$$

Dengan:

σ : Tegangan kawat (kg/cm^2).

g : Gravitasi (980 cm/detik^2)

ρ : Kerapatan kawat ($7,8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$)

l : Panjang kawat (cm)

Hubungan antara tegangan (σ), regangan (ϵ), dan modulus elastisitas (E) dapat dinyatakan sebagai $\sigma/\epsilon = E$. Panjang kawat dalam pengukur

regangan adalah 17 cm, $\rho = 7,8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ dan $E = 2,11 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$.
Sehingga, rumus tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$\varepsilon = 4,361 \times 10^{-3} f^2 \text{ regangan } \mu \dots\dots\dots(9)$$

Setiap variasi regangan menyebabkan pengukur regangan terdefleksi. Hal ini mengubah tegangan pada kawat sehingga mempengaruhi frekuensi getaran kawat ketika bergetar pada frekuensi alaminya. Regangan sebanding dengan kuadrat frekuensi dan dapat ditampilkan secara langsung dalam regangan μ . Nilai $4,361 \times 10^{-3}$ regangan μ/Hz^2 dikenal sebagai *effective gauge factor*. Nilai ini bervariasi dalam batas-batas tertentu dari satu kelompok ke kelompok lainnya.

Modulus elastisitas pengukur regangan sangat rendah dan kawat pengukur regangan magnetik menarik kawat di dalamnya secara akurat mengikuti defleksi struktur beton (atau bagian baja atau permukaan batuan) di tempat pengukur regangan dipasang. Hal ini tidak terpengaruh oleh material atau koefisien muai termal elemen pengukur regangan atau tubuhnya. Koefisien muai termal dari kawat penarik magnet yang digunakan pada semua sensor kawat getar adalah 11,0 ppm/°C.

2.6 Penelitian terdahulu

Penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini disajikan Tabel 9.

Tabel 9. Penelitian Terdahulu Terkait Penelitian ini

No	Tahun	Judul Artikel	Penulis	Nama Jurnal
1	2021	A Review of Concrete Durability in Marine Environment	W D Pratiwi, F D D Putra, Triwulan Y Tajunnisa, N A Husin and K D Wulandari	Materials Science and Engineering
<p>Beton berinteraksi dengan air laut yang menyebabkan kerusakan pada beton. Serangan kimiawi terjadi setidaknya melalui 3 mekanisme umum: serangan sulfat, karbonasi, dan korosi tulangan akibat klorida. Ketahanan kimiawi beton ditentukan oleh porositas dan komposisi kimiawi beton. Beton laut memiliki risiko degradasi kimiawi terhadap serangan sulfat, karbonat, dan klorida. Kandungan aluminium diperlukan agar beton dapat meningkatkan daya ikat terhadap klorida.</p>				
2.	2021	Meninjau Kekuatan Beton pada Lingkungan Air Laut Pameungpeuk Kabupaten Garut	Fajar Abdul Sidiq, dan Eko Walujodjati	Jurnal Konstruksi
<p>Kuat tekan beton normal dengan perawatan air tawar dan direndam di lingkungan air laut yang ditargetkan adalah 22,62 MPa pada umur 28 hari. Hasil uji kuat tekan beton normal diperoleh rata-rata kuat tekan beton normal pada umur 21 hari adalah 11,69 MPa, sehingga target mutu rencana beton pada usia 28 hari tidak tercapai. Pengujian kuat tekan 3 sampel beton normal yang direndam pada lingkungan air laut selama 7 hari setelah perawatan beton dengan air tawar mengalami peningkatan dan penurunan dengan rata-rata sebesar 12,26 MPa. Peningkatan kuat tekan beton selama 7 hari perendaman pada lingkungan air laut terhadap beton normal yang direndam air tawar sebesar 4,83%. Pengujian kuat tekan 3 sampel beton normal tanpa perendaman air laut selama 14 hari dengan kuat tekan rencana 20 MPa mengalami peningkatan dan penurunan dengan rata-rata sebesar 11,69 MPa. Pengujian kuat tekan 3 sampel beton normal yang terdapat dalam lingkungan air laut semasa 14 hari setelah perawatan beton dengan air tawar mengalami peningkatan dan penurunan dengan rata-rata sebesar 12,92 MPa. Peningkatan</p>				

Tabel 9. (lanjutan)

	<p>kuat tekan beton selama 14 hari perendaman pada lingkungan air laut terhadap beton normal yang direndam air tawar sebesar 10.48%. Persentase kuat tekan beton yang direndam pada lingkungan air laut selama 7 hari dan 14 hari terhadap beton normal yang direndam selama 14 hari sebesar 7,66%. Tidak terjadi penurunan kuat tekan beton direndam pada lingkungan air laut selama 7 juga 14 hari.</p>			
3.	2019	Kajian Kuat Tekan Beton di Lingkungan Laut Tropis Banyuwangi	Syarifah Khirunnis, Mirza Ghulam Rifqi, dan M. Shofi'ul Amin	Jurnal Sipil Politeknik
	<p>Benda uji silinder beton berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang dicuring air tawar (BAT) pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari berturut-turut memiliki kuat tekan sebesar 25.84 MPa, 32.82 MPa, 35.05 MPa, benda uji di <i>atmospheric zone</i> (BAZ) sebesar 24.82 MPa, 25.80 MPa, 32.22 MPa, benda uji di <i>tidal zone</i> (BTZ) sebesar 23.01 MPa, 24.67 MPa, 29.80 MPa, dan benda uji di <i>submerged zone</i> (BSZ) sebesar 22.71 MPa, 24.97 MPa, dan 27.16 MPa. Pengujian umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari dengan kuat tekan benda uji BAT sebagai acuan, berturut-turut benda uji BAZ 4%, 21%, 8%; benda uji BTZ 11%, 25%, 15%; dan benda uji BSZ 12%, 24%, 23%. Semakin besar kontak yang terjadi antara beton dengan air laut maka semakin besar pula penurunan kuat tekan beton yang terjadi. Dalam penelitian ini <i>submerged zone</i> yang merupakan wilayah di mana seluruh bagian beton terendam air laut memiliki nilai kuat tekan yang paling kecil saat umur 28 hari.</p>			
4.	2018	Investigasi Pengaruh Air Laut sebagai Air Pencampuran dan Perawatan terhadap Sifat Beton	Syamsul Bahri Ahmad	Journal INTEK
	<p>Kuat tekan beton yang dicampur dengan air laut (BLT dan BLL) mengalami peningkatan kuat tekan terhadap kuat tekan beton yang dicampur dengan air tawar (BTT dan BTL). Porositas beton yang dicampur dengan air laut dan dirawat dengan air tawar (BLT) dan beton yang dirawat dengan air laut (BLL) mengalami penurunan terhadap porositas beton yang dicampur dengan air tawar dan dirawat dengan air tawar (BTT) sebagai beton pembanding. Kuat tekan beton yang dicampur dan dirawat dengan air laut (BLL) diperoleh 352,29 kg/cm² dengan porositas sebesar beton 17,06%.</p>			

Tabel 9. (lanjutan)

	<p>Kuat tekan beton yang dicampur air laut dan dirawat dengan air tawar (BLT) diperoleh 331,61 kg/cm² dengan porositas beton 16,87%. Kuat tekan beton yang dicampur dengan air tawar dan dirawat dengan air tawar (BTT) sebagai beton pembanding diperoleh 314,05 kg/cm² dengan porositas 17,97%. Kuat tekan beton yang dicampur dengan air tawar dan dirawat dengan air laut (BTL) diperoleh 297,80 kg/cm² dengan porositas 16,44%.</p>		
5.	2017	Long Term Deformation of Beams and Columns of High Performance Concrete	<p>Chatarina Niken, Elly tjahjono, Fransiscus Supartono</p> <p>International Journal of Technology</p>
	<p>Perilaku deformasi jangka panjang ditentukan oleh perilaku autogenous, sedangkan perilaku autogenous pada kolom dipengaruhi oleh pembengkakan abnormal. Pembengkakan Abnormal terjadi akibat disosiasi partikel beton yang cepat karena tekanan beton terhadap dirinya sendiri akibat beratnya sendiri, pertumbuhan Ca²⁺, dan kombinasi tekanan beton dan suhu hidrasi yang tinggi pada umur awal. Pada rentang 1-200 hari, perilaku deformasi kolom menunjukkan pola yang mirip dengan balok (lengkungan). Setelah itu (200 - 410 hari), deformasi kolom menjadi sangat lambat, hampir konstan (datar), karena partikel-partikel di dalam kolom menjadi lebih padat. Pada umur 400 hari, deformasi kolom mencapai 64% dari deformasi balok. Hal ini terjadi ketika terjadi pembengkakan yang tidak normal secara autogenous pada kolom sebelum mengalami penyusutan. Mekanisme ini tidak terjadi di dalam balok.</p>		
6.	2017	Pengaruh Air Laut terhadap Kekuatan Tekan Beton yang Terbuat dari berbagai Merek Semen yang ada di Kota Malang	<p>Sonny Wedhanto</p> <p>Jurnal Bangunan</p>
	<p>Semen Tipe I, pada usia 14 hari telah melampaui target kekuatan yang direncanakan yaitu di atas 17,5 MPa, sedangkan semen tipe II menghasilkan kekuatan tekan beton dibawah target. Semen tipe II memiliki sifat kekuatan awal yang rendah, dan sebelum mencapai kekuatannya yang optimal telah terkena serangan sulfat, sehingga kekuatannya makin lama cenderung makin turun. Jenis semen yang relatif paling tahan terhadap air laut selama perendaman 28 hari adalah semen tipe I.</p>		

Tabel 9. (lanjutan)

7.	2014	The Effect of Sea Water on Compressive Strength of Concrete	Olutoge F, Adeyemi and Amusan.	International Journal of Engineering Science Invention
<p>Beton yang dicor dan <i>curing</i> dengan air laut meningkat secara bertahap melebihi kekuatan beton kontrol (FF). Kekuatan tekan beton FF (cor beton dan <i>curing</i> dengan air tawar) sesuai dengan nilai kekuatan tekan dengan campuran 1:2:4 pada umur 28 hari, yaitu sekitar 19,98 MPa. Kekuatan beton yang dicor dengan air laut dan <i>curing</i> dengan air tawar (SF) meningkat pada umur 28 hari sebesar 20,16 MPa dan 90 hari sebesar 21,85 MPa. Penurunan kekuatan tekan beton yang dicor dengan air tawar dan diawetkan dengan air laut (FS) terjadi pada umur 21 hari dan kembali meningkat pada umur 28 dan 90 hari. Kekuatan tekan maksimum seluruh beton pada umur 90 hari dengan kekuatan tekan terbesar adalah beton yang dicor dan <i>curing</i> dengan air laut (SS) sebesar 23,14 MPa, tetapi dengan lebih dari 90% kekuatan dicapai pada umur 28 hari.</p>				
8.	2013	Pengaruh Air Laut Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu K-175	Wibowo	Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil
<p>Beton normal K-175 yang dirawat menggunakan air laut mengalami penurunan kuat tekan sebesar 1,18 % pada usia 3 hari, 1,05% pada usia 7 hari, 1,24% pada usia 14 hari, 1,1% pada usia 28 hari. Beton yang menggunakan air laut sebagai campuran beton mengalami penurunan kuat tekan beton terhadap beton normal sebesar 8,1% pada usia 3 hari dan 7,24% pada usia 7 hari.</p>				
9.	2012	Concrete Strength and Deformation Property Under Sea Water Erosion Environment	Cai Jianjun, Zhang Feng, Cui Wei, Chen Shoushan, and Liu Pulun	Advanced Materials Research
<p>Tipe kegagalan dan karakteristik retak dangkal spesimen dilaporkan pada siklus basah-kering yang berbeda. Berdasarkan teori mekanika beton, kriteria kekuatan beton Kufer-Gerstle klasik digunakan, sejumlah besar sampel uji data multivariat diregresikan secara nonlinier, kriteria kekuatan beton biaksial ditetapkan dengan mempertimbangkan rasio tegangan dan regangan dan dengan mempertimbangkan rasio tegangan dan jumlah siklus kering-basah.</p>				

Tabel 9. (lanjutan)

10.	2003	Long-Term Deformations of Laterized Concrete Short Columns	M.A. Salau	Building and Environment
<p>Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak banyak variasi antara deformasi rangkak pada kolom pendek beton yang disegel dan beton normal. Spesimen beton lateral menunjukkan lebih banyak deformasi rangkak dan susut, baik yang disegel maupun yang tidak disegel dibandingkan dengan beton normal. Campuran beton normal 1:2:4 dan campuran beton laterit 2:3:6 (mengandung 25% pengganti agregat halus dengan laterit) dengan rasio air-semen yang sama yaitu 0,65 menunjukkan kuat tekan yang hampir sama setelah 28 hari, dan tidak ada satupun yang memiliki densitas yang kurang dari 2.300 kg/m³. Nilai penyusutan dari kolom pendek beton lateral yang tidak disegel adalah sekitar 1,6 kali lipat dari spesimen yang disegel, sementara nilai penyusutannya hanya 1,5 kali lipat untuk kolom pendek beton normal.</p>				

Tabel 10. Penelitian Terdahulu Terkait *Mix Design* Beton SNI 03-2834-2000

No	Tahun	Judul Artikel	Penulis	Nama Jurnal
1.	2019	Analisis perbandingan desain campuran beton normal menggunakan sni 03-2834-2000 dan SNI 7656-2012 dengan kuat tekan 30 MPa	Joerda Foulhudan, Dwi Nurtanto dan Krisnamurti	Jurnal Riset Rekayasa Sipil
<p>Penelitian dilakukan agar didapatkan selisih antara SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012 dalam hal modulus elastisitas, kuat tekan, dan jumlah kebutuhan bahan dengan menggunakan dua variasi nilai <i>slump</i> yaitu variasi I (<i>slump</i> 30-60 mm dan <i>slump</i> 25-20 mm) untuk variasi II (<i>slump</i> 60-180 mm dan <i>slump</i> 75-100 mm) untuk mutu rencana 30 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas dan kuat tekan tertinggi didapatkan dengan nilai <i>slump</i> 30-60 mm menggunakan SNI 03-2834-2000.</p>				
2.	2017	Studi Perbandingan Rancang Campur Beton Normal Menurut SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012	Agus Santoso, Darmono, Faqih Ma'arif, Sumarjo H.	Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur
<p>Uji kuat tekan dilakukan pada benda uji dengan kuat tekan 35 MPa,</p>				

Tabel 10. (lanjutan)

	30 MPa dan 25 MPa. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kuat tekan beton rancangan SNI 03-2834-2000 lebih tinggi dari SNI 7656 2012 miliknya kuat tekan diatas 30 MPa.		
3.	2017	Perbandingan Desain Campuran Beton Normal Menggunakan SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012	Elia Hunggu-rami, Margareth E. Bolla, Papy Messakh Jurnal Teknik Sipil
Rasio campuran beton yang dibutuhkan untuk ukuran agregat 20 cm dan 40 cm dibandingkan menggunakan kedua desain campuran. Uji kuat tekan diterapkan pada umur 28 hari dengan kualitas desain (f_c') 25 MPa, 20 MPa, dan 15 MPa. Walaupun dari hasil kajiannya menunjukkan bahwa dua desain campuran menghasilkan kuat tekan tergantung dari kualitas rencana, SNI 7656:2012 menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah dari SNI 03-2834-2000.			

Tabel 11. Penelitian Terdahulu Terkait Proses Pengecoran

No	Tahun	Judul Artikel	Penulis	Nama Jurnal
1.	2022	Perbandingan <i>Mix Design</i> SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012 Ditinjau dari Proses Pengecoran Beton Normal	Joerda Foulhudan, Dwi Nurtanto dan Krisnamurti	Jurnal Riset Rekayasa Sipil
Pada penelitian menunjukkan proses pelaksanaan pengecoran yaitu, kerikil, semen, pasir, dan ditambahkan air pada akhir proses pengecoran (<i>dry mixing</i>) dengan kerikil + semen selama 4 menit, lalu ditambahkan pasir selama 4 menit dan air selama 3 menit menghasilkan kuat tekan paling optimal.				
2.	2018	Effects of Silica Fume, Ultrafine and Mixing Sequences on Properties of Ultra High Performance Concrete	Analisa Kuat Tekan Beton Terhadap Lamanya Waktu Pengadukan	Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil Unidayan
Kuat tekan beton dihasilkan dari lama waktu pencampuran antara 1, 5, 10 dan 15 menit pada umur 3 hari sebesar 95,31 kg/cm ² , 128,5 kg/cm ² , 122,7 kg/cm ² , 111,1 kg/cm ² , umur 7 hari sebesar 108,3 kg/cm ² , 142,9 kg/cm ² , 126,9 kg/cm ² , 115,5 kg/cm ² , dan umur 28 hari sebesar 125,6				

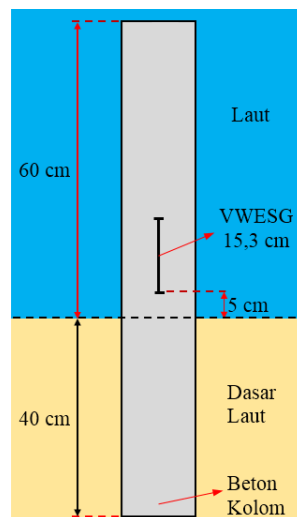
Tabel 11. (lanjutan)

	kg/cm ² , 196,3 kg/cm ² , 158,5 kg/cm ² , 147,2 kg/cm ² . Berdasarkan nilai kuat tekan yang memenuhi kuat tekan yang direncanakan 190 kg/cm² atau 19 MPa terdapat pada lama waktu pencampuran 5 menit.			
3.	2010	Effects of Silica Fume, Ultrafine and Mixing Sequences on Properties of Ultra High Performance Concrete	S. Shihada and M. Arafa	Asian Journal of Materials Science
<p>Pada penelitian ini menggunakan <i>silica fume</i>, bubuk kuarsa sebagai agregat sangat halus, dan urutan prosedur pencampuran untuk mengetahui pengaruh terhadap sifat utama dari <i>ultra high performance concrete</i>. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengecoran dengan urutan mencampur semua material kering (semen, agregat halus, agregat kasar, agregat sangat halus, dan <i>silica fume</i>) kemudian ditambahkan air dengan 40% super plastisizer setelah itu didiamkan 3 menit lalu ditambahkan 60% super plastisizer mendapatkan hasil kuat tekan tertinggi.</p>				

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

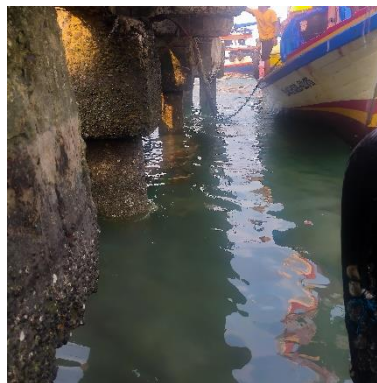
Penelitian ini dilakukan secara eksperimental untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan, seperti kuat tekan, suhu lingkungan sekitar dan suhu dalam benda uji, serta deformasi (regangan dan susut) beton. Benda uji beton kolom dengan kuat tekan rencana 20,75 MPa sebanyak 3 buah. Dimensi 15 cm × 15 cm × 100 cm, yang 40 cm masuk ke dalam dasar laut bertujuan agar kolom beton tetap berdiri tegak, dan 60 cm di atas dasar dan terendam air laut secara terus-menerus. Eksperimen dilakukan pada benda uji kolom balok sesuai ASTM C 78-08 yang berada di atas dasar dan terendam air laut. Sebuah *vibrating wire embedment strain gauge* (VWESG) dengan panjang 15,3 mm ditanam pada setiap benda uji. Posisi VWESG berada pada 5 cm dari bagian bawah benda uji. Kemudian 9 sampel beton silinder berdimensi 15 cm × 15 cm × 30 cm untuk dilakukan uji kuat tekan pada umur 28, 56, dan 90 hari. Skema benda uji beton kolom dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema benda uji beton kolom dengan VWESG.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laut Teluk Betung ($5^{\circ}29'13.0''$ S dan $105^{\circ}15'11.0''$ E) Desa Sukamaju, Kecamatan Telukbetung, Lampung dengan *lowest low water level* $\pm 1,5$ meter dan *highest high water level* ± 2 meter. Sampel diletakan di bawah *jetty* yang bertujuan untuk mendapatkan hasil sesuai dengan lingkungan sebenarnya, yaitu lingkungan laut. Pengujian kuat tekan dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Lokasi Penelitian

3.3 Persiapan Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Alat

1. VWESG (*vibrating wire embedment strain gauge*)

VWESG digunakan untuk mengukur perubahan regangan terhadap waktu yang ditanam pada setiap sampel. VWESG mampu mendeteksi regangan hingga $3000 \mu\epsilon$ dengan akurasi sekitar 0,025% dan suhu beton antara -80° C dan 60° C dengan akurasi sekitar 0,5%. VWESG yang digunakan bertipe tertanam (*embedment*) dengan Merek Geokon 4200. Alat VWESG dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Alat VWESG.

2. *Vibrating wire readout*

Vibrating Wire Readout adalah alat yang digunakan untuk melakukan pembacaan pada kawat getar yang tertanam dalam beton. Pada penelitian ini *readout* yang digunakan yaitu model GK-404 dan sudah dikalibrasi. Alat *vibrating wire readout* dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Alat *vibrating wire readout*.

3. Termometer *hygrometer*

Termometer digunakan untuk mengukur temperatur dan kelembapan relatif atau *relatif humidity* (RH) di lingkungan sekitar benda uji. Suhu air perendaman diukur untuk mengetahui temperatur air saat proses *curing* dilakukan selama 7 hari. Termometer *hygrometer* pada penelitian ini tidak dikalibrasi. Waktu pengukuran suhu dilakukan secara bersamaan dengan waktu pengambilan data deformasi pada benda uji beton kolom pada umur 1 sampai 7 hari. Alat termometer *hygrometer* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Alat termometer *hygrometer*.

4. Bekisting

Bekisting digunakan untuk mencetak benda uji yang terbuat dari kayu dengan dimensi 15 cm × 15 cm × 100 cm. Bagian dalam bekisting yang mengalami kontak langsung dengan campuran beton segar diberi lapisan plastik dengan tujuan agar tidak terjadi penyerapan air oleh bekisting.

5. *Styrofoam*

Styrofoam terbuat dari jenis busa *polystyrene*. *Styrofoam* memiliki kelebihan yaitu kedap air. *Styrofoam* digunakan sebagai penutup benda uji tepat setelah dilakukan pengecoran untuk menghindari penguapan air.

6. Besi penyangga

Besi penyangga digunakan untuk menahan kawat getar yang tertanam agar tidak berpindah tempat saat proses pengecoran. Besi penyangga dibuat dengan cara dilas dan menyesuaikan bentuk cetakan balok.

7. Papan penyangga

Papan penyangga digunakan agar mempermudah saat proses pembacaan data. Papan ini dibuat untuk menyangga kabel yang tersambung dengan alat *readout*.

8. Timbangan

Timbangan berfungsi untuk mengukur berat masing-masing material penyusun beton sesuai dengan komposisi yang direncanakan. Timbangan yang digunakan yaitu timbangan manual dengan kapasitas maksimum 50 kg digunakan untuk mengukur berat beton (timbangan besar) dan timbangan elektronik dengan kapasitas maksimum 20 kg digunakan untuk mengukur berat bahan campuran beton.

9. Oven

Oven adalah alat yang digunakan untuk mengeringkan material yang akan di uji. Oven yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kapasitas suhu maksimum 110°C dan memiliki daya sebesar 2800 Watt.

10. Satu set saringan

Alat ini digunakan untuk mengukur gradasi agregat sehingga dapat ditentukan nilai modulus kehalusan butir agregat halus dan agregat kasar. Pada penelitian ini gradasi agregat halus dan agregat kasar berdasarkan standar ASTM C-33.

11. Satu set alat *slump test*

Kerucut abrams biasa digunakan dengan tilam pelat baja dan tongkat baja untuk mengetahui kelecakan (*workability*) adukan dengan percobaan *slump test*. Kerucut abrams mempunyai diameter 100 mm di bagian atas dan 200 mm di bagian bawah, dan tinggi 300 mm. Sedangkan ukuran tongkat baja dengan diameter 16 mm dan panjang 600 mm.

12. Meteran/penggaris

Alat ini digunakan untuk mengukur tinggi penurunan *test* pada pengujian *slump test* beton dan untuk mengukur dimensi bahan saat proses pembuatan bekisting benda uji sehingga diperoleh hasil yang sesuai dengan rencana.

13. Cetakan benda uji

Cetakan benda uji adalah alat yang digunakan untuk mencetak beton sesuai dengan bentuk dan kebutuhan. Cetakan benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah berbentuk kolom berdimensi 15 cm x 15 cm x 100 cm dan silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

14. Piknometer

Piknometer merupakan alat yang digunakan untuk menguji kandungan zat organik dan berat jenis agregat halus.

15. *Concrete mixer*

Concrete mixer adalah alat yang digunakan untuk mencampur semua material. Alat *concrete mixer* yang digunakan pada penelitian ini adalah molen mini yang memiliki kapasitas maksimal yaitu 0,125 m³ yang memiliki kecepatan 20-30 putaran per menit.

16. Cetakan kerucut pasir

Cetakan kerucut pasir adalah alat yang digunakan untuk melihat kondisi SSD dari pasir (*saturated surface dry*).

17. Bejana silinder

Bejana silinder adalah alat yang digunakan untuk pengujian berat volume pada agregat halus dan kasar. Terdapat 2 bejana yang digunakan yaitu bejana yang berkapasitas 5 liter digunakan untuk pengujian berat volume agregat halus dan bejana yang berkapasitas 10 liter digunakan untuk pengujian berat volume agregat kasar.

18. Bak perendaman

Bak perendaman adalah alat yang digunakan saat proses perawatan beton. Hal ini dilakukan untuk menjaga kelembapan beton agar beton tidak cepat kehilangan air. Proses perawatan beton dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

19. *Compression testing machine (CTM)*

Compression testing machine (CTM) adalah alat yang digunakan untuk menguji kuat tekan beton. Alat *Compression testing machine (CTM)* yang digunakan memiliki kapasitas beban maksimal 3000 kN dengan merek CONTROLS. Alat CTM dikalibrasi dengan menggunakan *load cell* berupa silinder besi dengan kapasitas tekanan hingga 3000 kN. *Load chell* dihubungkan dengan indikator sehingga pembacaan nilai kuat tekan pada CTM dan indikator menunjukkan hasil yang sama.

20. Alat bantu

Alat bantu adalah alat yang digunakan untuk membantu dan memperlancar penelitian, seperti tongkat pemadat, kode warna, sekop, sendok semen, ember, *container*, *rolley*, *stopwatch*, gelas ukur, dan alat tulis.

b. Bahan

1. Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Semen berfungsi sebagai bahan pengikat campuran beton dan mengisi ruang antar agregat sehingga terbentuk massa yang padat setelah mengeras. Semen yang digunakan berjenis PCC dengan merek Tiga Roda. Semen ini diperoleh dari toko dengan keadaan tertutup dalam kemasan berukuran 50 kg/zag.

2. Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Air yang digunakan merupakan air bersih, tidak mengandung minyak, lumpur, garam dan benda-benda merusak lainnya yang dapat dilihat secara visual serta tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan merusak beton.

3. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian sudah memenuhi standar ASTM dalam beberapa pengujian seperti kadar air, gradasi agregat kasar, berat jenis dan penyerapan, dan berat volume. Agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini yaitu berasal dari PT. Sumber Batu Berkah, Lampung Selatan.

4. Agregat Halus

Agregat halus atau pasir yang digunakan melalui beberapa tahap pengujian yang memenuhi standar ASTM. Pengujian yang dilakukan yaitu kadar air, berat jenis dan penyerapan, kadar lumpur, gradasi agregat kasar, berat volume, kandungan zat organis dalam pasir. Agregat halus yang digunakan berasal dari Kecamatan Gunung Sugih, Lampung Tengah.

3.4 Pemeriksaan Material

Pemeriksaan material berupa agregat kasar, agregat halus dan semen. Data-data yang diperoleh disesuaikan dengan ASTM. Data yang sudah memenuhi syarat digunakan untuk perhitungan campuran beton normal.

Pengujian agregat halus yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Kadar air agregat halus sesuai ASTM C 566-78.
- b. Berat jenis dan penyerapan agregat halus sesuai ASTM C 128-98.
- c. Kadar lumpur agregat halus sesuai ASTM C 117-80.
- d. Kandungan zat organis agregat halus sesuai ASTM C 40-92.
- e. Gradasi agregat halus sesuai ASTM C 33-93.
- f. Berat volume agregat halus sesuai ASTM C 29.

Pengujian agregat kasar yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Kadar air agregat kasar sesuai ASTM C 556-78.
- b. Berat jenis dan penyerapan agregat kasar sesuai ASTM C 127-88.
- c. Gradasi agregat kasar sesuai ASTM C 33-93.
- d. Berat volume agregat kasar sesuai ASTM C 29.

Pengujian semen yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Berat jenis semen sesuai ASTM C 188-95.
- b. Waktu pengikatan awal semen sesuai ASTM C 191-08.
- c. Kehalusan semen sesuai ASTM C 430.

3.5 Hasil Pengujian *Properties* Material Campuran Beton Normal

Pengujian pada material bertujuan untuk mengetahui data fisik material yang akan digunakan pada campuran beton normal. Pengujian material meliputi kadar air, berat jenis, penyerapan, gradasi, berat volume, kadar lumpur, dan kandungan zat organis. Data yang diperoleh digunakan untuk perhitungan campuran beton normal. Hasil pengujian material dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Pengujian *Propeties* Material Campuran Beton Normal

Jenis pengujian	Material yang dipakai	Nilai hasil pengujian	Standar ASTM
Kadar Air	Agregat Halus	0,88 %	0 – 1 %
	Agregat Kasar	2,35 %	0 – 3 %
Berat Jenis	Agregat Halus	2,50 %	2,0 – 2,9
	Agregat Kasar	2,66 %	2,5 – 2,9
Penyerapan	Semen PCC	3,05 %	3,0 – 3,2
	Agregat Halus	1,03 %	1 – 3 %
Modulus	Agregat Kasar	2,22 %	1 – 3 %
	Agregat Halus	2,73	2,3 – 3,1
Kehalusan	Agregat Kasar	7,37	6 – 8
	Agregat Halus	1535 kg/m ³	-
Berat Volume	Agregat Kasar	1537,90 kg/m ³	-
	Agregat Halus	2,67 %	< 5 %
Kandungan Zat Organik	Agregat Halus	Nomor Warna 2	< Nomor Warna 3
Waktu Pengikatan Awal Semen	Semen PCC	115,91 Menit	> 60 Menit
Kehalusan Semen	Semen PCC	Saringan No. 100 = 0 %	0 %
		Saringan No. 200 = 19,68 %	< 22 %

Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 12, material sudah memenuhi standar ASTM dan dapat digunakan sebagai campuran beton normal.

3.6 Perencanaan Campuran Beton Normal

Campuran beton normal direncanakan dengan perhitungan berdasarkan SNI 03-2834-2000. Perencanaan yang baik sesuai metode yang digunakan mempengaruhi kuat tekan yang diinginkan agar tercapai. Kekuatan beton ($f'c$) yang direncanakan adalah 20,75 MPa.

3.7 Pemberian Kode Sampel Benda Uji

Penelitian ini menggunakan benda uji silinder sebanyak 9 buah berdimensi 15 cm x 15 cm x 30 cm dan benda uji beton kolom berjumlah 3 buah 15 cm x 15 cm x 100 cm. Penelitian ini meliputi dua bagian, yaitu uji kuat tekan untuk beton silinder menggunakan CTM pada umur 28, 56, dan 90 hari dan uji deformasi beton kolom pada umur 1 sampai 90 hari. Kode dan Jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Kode dan Jumlah Benda Uji

Pengujian	Kode			Umur Beton (Hari)
Kuat Tekan CTM	BS-1-28	BS-2-28	BS-3-28	28
	BS-1-56	BS-2-56	BS-3-56	56
	BS-1-90	BS-2-90	BS-3-90	90
Deformasi	BK-1	BK-2	BK-3	1 s.d. 90
Total 14 benda uji				

3.8 Pembuatan Benda Uji

Tahapan pembuatan benda uji adalah sebagai berikut:

a. Mempersiapkan bahan campuran beton

Bahan campuran beton yang meliputi agregat kasar, agregat halus, dan semen harus dalam kondisi SSD (*saturated surface dry*) agar tidak terjadi penyerapan air.

b. Mencampurkan bahan

Bahan yang telah disiapkan kemudian dicampur menjadi adukan beton dengan komposisi bahan sesuai dengan perhitungan *mix design*. Bahan-bahan tersebut dimasukkan ke dalam mesin *mixer* sesuai dengan urutan berdasarkan metode pencampuran *dry mixing*.

c. Pengujian nilai *slump*

Beton segar dilakukan pengujian *slump test* sesuai SK SNI M-12-1989-F untuk mengetahui tingkat kelacakannya. Tahapan *slump test* adalah sebagai berikut:

1. Kerucut abrams disiapkan dalam keadaan bersih kemudian diletakkan di atas pelat baja.
2. Adonan beton dimasukkan ke dalam kerucut abrams hingga 1/3 bagian, kemudian ditumbuk sebanyak 25 kali menggunakan tongkat besi ujung bulat agar menjadi padat. Adukan beton ditambah hingga 2/3 bagian, dan ditumbuk kembali sebanyak 25 kali. Setelah itu, adukan beton ditambahkan sampai 3/3 bagian kemudian ditumbuk sebanyak 25 kali. Isi adukan beton pada kerucut sampai penuh lalu diratakan.
3. Kerucut abrams diangkat ke atas dengan tegak secara perlahan-lahan.
4. Tinggi penurunan dari adukan beton diukur terhadap tinggi kerucut. Tinggi penurunan ini disebut nilai *slump*.

d. Pencetakan benda uji

Adukan beton dituangkan ke dalam cetakan silinder dan balok yang sudah diolesi oli pada bagian dalamnya sampai penuh lalu dipadatkan menggunakan *vibrator* dan diratakan permukaannya. Untuk benda uji beton kolom, sebelum adukan beton dituangkan, VWESG dimasukkan kedalam bekisting dengan cara diikat menggunakan benang yang digantungkan ke tongkat yang berada melintang di atas bekisting. Panjang benang telah disesuaikan sehingga alat pengukur regangan tepat berada 5 cm dari bagian bawah benda uji. Kemudian adukan beton dituangkan secara perlahan sampai penuh dan digetarkan menggunakan *vibrator* lalu diratakan.

e. Pemberian kode

Cetakan dibongkar pada beton umur 24 jam setelah dilakukan pengecoran. Benda uji diberi kode pada permukaan beton sesuai rencana.

f. Perawatan benda uji (*curing*)

Perawatan beton dilakukan menggunakan karung goni yang disiram air selama 7 hari. Perawatan benda uji ini bertujuan untuk menjaga kelembapan pada beton agar proses hidrasi dan pengerasan beton menjadi masa padat berjalan dengan optimal sehingga mutu beton tercapai.

3.9 Perlakuan Benda Uji

Benda uji dibawa dan diletakkan ke lokasi penelitian yaitu laut Teluk betung setelah proses *curing* selesai. Benda uji diletakkan di dasar laut dengan kondisi terendam sepenuhnya sehingga harus berada di bawah kedalaman level permukaan air terendah (*lowest low water level*). Hal ini bertujuan agar benda uji tidak timbul ke permukaan air laut saat terjadi surut pada lokasi tersebut. Perlakuan benda uji dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Perlakuan benda uji.

3.10 Metode Pengamatan Deformasi pada Temperatur dan RH Lingkungan Sekitar Benda Uji

Pengamatan terhadap benda uji beton kolom dilakukan tepat setelah penuangan beton dengan ketentuan pembacaan sebagai berikut: 0 – 24 jam, setiap 15 menit; 24 – 48 jam, setiap 60 menit; 3 – 7 hari, setiap 2 jam; 8 – 14 hari, 2 kali sehari; 15 – 21 hari, 1 kali sehari; 22 – 28 hari, 1 kali setiap 2 hari; 29 – 56 hari, 2 kali setiap minggu; dan 57 – 90 hari, 1 kali setiap minggu. Pengamatan deformasi beton kolom dilihat menggunakan alat *readout* yang terhubung dengan alat pengukur regangan yang tertanam pada beton. Pengecekan suhu (*temperature*) dan kelembapan relatif (*relatif humidity*) di lingkungan sekitar benda uji beton menggunakan alat termometer digital atau disebut *hygrometer*.

3.11 Analisa Data Hasil Penelitian

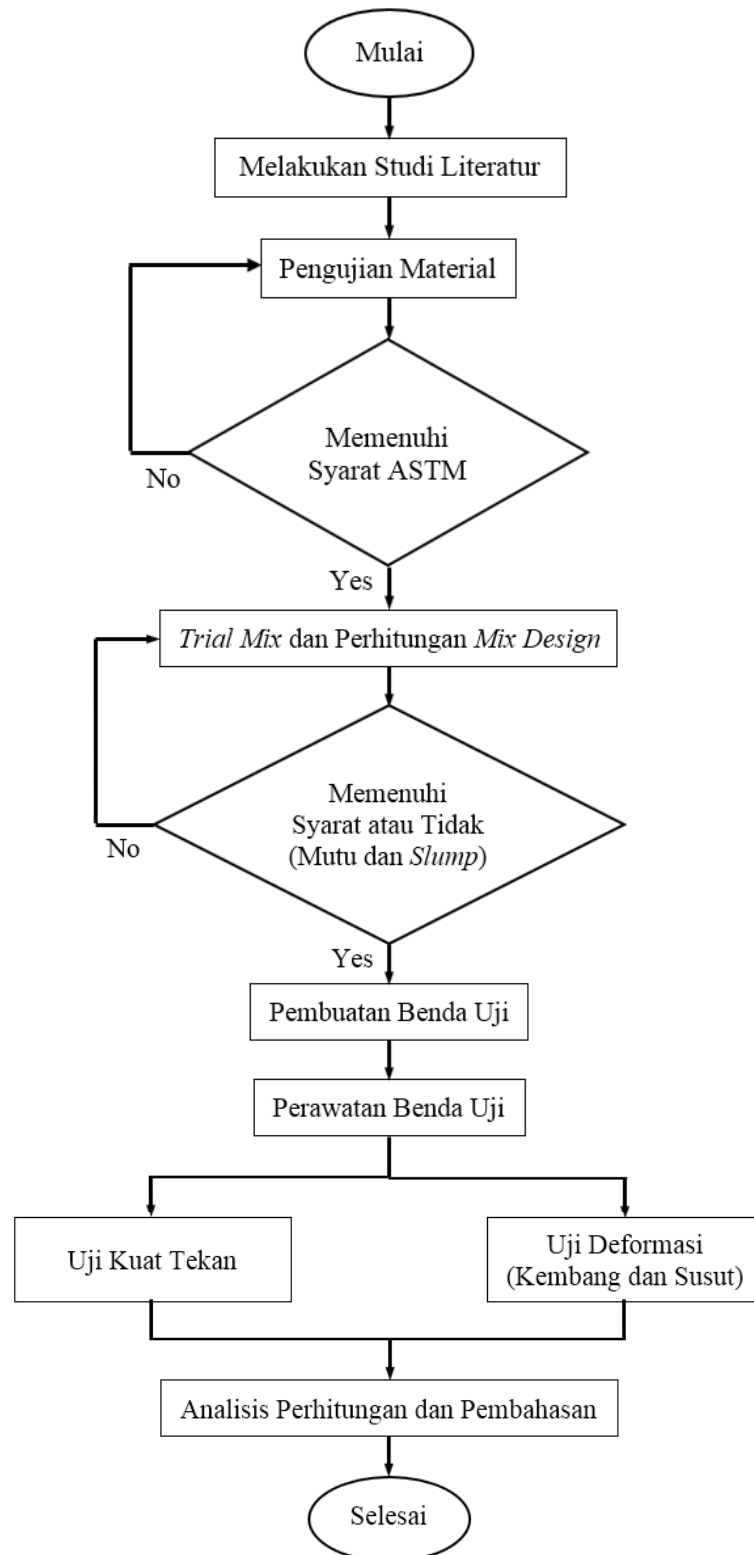
Data hasil penelitian dianalisis menggunakan kriteria *dixon*. ASTM E 178-02 telah menyebutkan bahwa kriteria *dyxon* yang sepenuhnya didasarkan pada rasio perbedaan antara pengamatan dapat digunakan dalam kasus di mana diinginkan untuk menghindari perhitungan deviasi standar atau penilaian cepat diperlukan (Niken dkk., 2019). Uji *dyxon* dilakukan dengan menyusun data dari yang terendah (X_1) ke tertinggi (X_n). Persamaan kriteria *dyxon* untuk 3-7 sampel dengan $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$ adalah sebagai berikut:

- Kriteria Dixon data terendah : $D_{3-7} = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1}$
- Kriteria Dixon data tertinggi : $D_{3-7} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1}$

Jika $D_{hitung} > D_{tabel}$, maka data tersebut merupakan pencilan dan dapat dibuang. Hal tersebut dilakukan terhadap data selanjutnya hingga tidak ada lagi data pencilan. Setelah melakukan pengamatan, maka dapat dilakukan perhitungan dan analisis data sebagai berikut:

- a. Menghitung kuat tekan beton pada benda uji silinder dengan umur beton 28, 56 dan 90 hari menggunakan kriteria *Dixon*.
- b. Dari hasil pengujian kuat tekan dibuat grafik sampai umur beton 90 hari.
- c. Dari hasil pengamatan deformasi pada beton kolom dibuat grafik dari tiga sampel benda uji.
- d. Analisis data pengamatan deformasi tiga sampel berdasarkan ASTM E 178-02 yaitu kriteria Dixon pada data umur 15, 30, 45, 60, 75 dan 90 hari.
- e. Analisis data hasil pembacaan temperatur dan RH pada sekeliling beton.
- f. Analisis data pengamatan deformasi tiga sampel, lalu diolah menjadi satu data terakhir dan dibandingkan dengan data temperatur dan RH sekeliling beton.
- g. Analisis perilaku pengembangan dan penyusutan beton yang dihubungkan dengan temperatur dan RH sekeliling beton.

3.12 Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram alir penelitian.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian mengenai pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi pada kolom beton yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Perilaku deformasi kolom beton dibagi pada 3 fase, yaitu pada umur 0-24 jam, proses *curing* dan lingkungan air laut.

a. Beton umur 0-24 jam

Deformasi minimum dan maksimum pada beton kolom umur 0-24 jam secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7,75 jam dengan besaran $5,4000 \text{ E-}07 \text{ (m/m)}$ dan $5,6808 \text{ E-}05 \text{ (m/m)}$ dengan rata-rata $3,0341 \text{ E-}05 \text{ (m/m)}$. Perubahan suhu maksimum dalam kolom beton secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7-7,50 jam sebesar $29,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $36,1 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan rata-rata $32 \text{ }^\circ\text{C}$. Menurut (ACI 305.1-06) suhu maksimum beton segar yang diizinkan adalah $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ($95 \text{ }^\circ\text{F}$). Fenomena deformasi kembang susut berbanding lurus dengan perubahan suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam.

b. Proses *curing*

Beton kolom mengalami deformasi kembang dan susut secara beraturan. Perubahan suhu dalam beton terjadi secara bergantian naik dan turun dengan laju yang sama. Deformasi maksimum dan minimum beton kolom saat masa *curing* secara berurutan terjadi pada umur 25 jam dan 158 jam sebesar $2,1852 \text{ E-}05 \text{ (m/m)}$ dan $-1,6248 \text{ E-}05 \text{ (m/m)}$ dengan rata-rata $-4,8505 \text{ E-}06 \text{ (m/m)}$. Kelembapan relatif dan suhu udara lingkungan sekitar juga berkontribusi pada perilaku deformasi beton kolom.

Perubahan suhu maksimum dan minimum dalam beton kolom secara berurutan terjadi pada umur 25 jam dan 108 jam sebesar 30,0 °C dan 23,3 °C dengan rata-rata 25,4 °C. Hubungan kelembapan relatif dengan suhu udara lingkungan sekitar berbanding terbalik, namun hubungan suhu udara lingkungan sekitar dengan suhu dalam beton kolom berbanding lurus.

c. Lingkungan air laut

Penyusutan terjadi pada umur 8-11 hari diikuti oleh kenaikan suhu dalamnya dengan puncak pada hari ke-11 sebesar 1,3416E-05 (m/m) dan 29,9 °C. Rata-rata kelembapan relatif, suhu udara dan suhu air laut pada hari ke 8-11 secara berurutan adalah 64,4 %, 30,9 °C dan 29,2 °C. Perilaku penyusutan beton kolom ini dipengaruhi oleh air laut yang menyebabkan penurunan laju (*degradation*) mutu sebagai akibat dari proses kerusakan kimia seperti erosi sulfat atau pencucian dan kerusakan oleh klorida. Pada umur 12-90 hari terjadi ekspansi atau pengembangan, perilaku deformasi berupa ekspansi (pengembangan) pada beton kolom relatif kecil sebesar -2,3772E-05 (m/m) pada umur 90 hari dengan suhu dalam beton kolom 24,5 °C.

2. Perilaku deformasi beton menurut ACI 209R-92 dan VWESG terdapat perbedaan. Perbedaan ini sebagai akibat dari kondisi iklim, bahan baku, dan lingkungan antara Indonesia (negara asal penelitian) dengan Amerika Serikat (pedoman ACI 209R-92 berasal). Perilaku deformasi beton menurut ACI 209R-92 yang signifikan terjadi pada umur 8-10 hari dan terus mengembang hingga umur 90 hari dengan nilai 7,20 E-05 (m/m). Penyusutan terjadi pada umur 8-11 hari menurut hasil penelitian dengan VWESG. Setelah umur 11 hari, perilaku deformasi beton kolom mengalami perubahan, terjadi ekspansi atau pengembangan hingga 90 hari. Ekspansi yang signifikan terjadi pada umur 12-28 hari dan terus mengembang hingga umur 90 hari dengan nilai sebesar -2,38 E-05 (m/m) dengan VWESG dan sebesar 7,20 E-05 (m/m) berdasarkan ACI 209R-92.

5.2 Saran

Penelitian tentang pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi kolom beton masih dapat dikembangkan. Saran yang dapat penulis berikan adalah:

1. Penelitian mengenai pengaruh lingkungan air laut terhadap perilaku deformasi kolom beton dengan jangka panjang (*long term*) perlu dilakukan, sehingga dapat diperoleh data yang lebih beragam dan dapat mengetahui dampak yang terjadi terhadap struktur pada masa layannya.
2. Perlu diperhatikan dalam perencanaan (*mix design*) dan pembuatan campuran beton karena mempengaruhi kualitas beton yang dihasilkan.
3. Perlu diperhatikan pada saat proses pengecoran agar adukan beton terdistribusi dengan merata karena mempengaruhi homogenitas beton.
4. Perlu diperhatikan pada saat proses *curing* agar kelembapan tetap terjaga dan proses hidrasi berjalan dengan optimal karena dapat mempengaruhi deformasi.
5. Perlu diperhatikan pada saat proses pemindahan beton menuju laut agar meminimalisir getaran yang terjadi karena dapat mempengaruhi deformasi.
6. Perlu diperhatikan keselamatan pada saat proses penurunan beton agar tidak terjadi hal-hal yang tidak direncanakan dan proses berjalan dengan baik.
7. Perlu diperhatikan pada saat proses pengambilan data agar tidak melewati waktu yang telah direncanakan.
8. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan tulangan agar mendekati keadaan pada kondisi lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 305.1-06. 2007. *Specification for Hot Weather Concreting* by ACI Committee 305. American Concrete Institute.
- ACI 209R-92. 1997. *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures* by ACI Committee 209. American Concrete Institute.
- ASTM C 430. 2008. *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by No. 325 Sieve*. USA: Annual Books of ASTM Standard.
- ASTM C 618-03. 2003. *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. Annual Book of ASTM Standard USA.
- ASTM C 127. 2002. *Standard Test Method for Materials, Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. USA: Annual Books of ASTM Standard.
- ASTM C 29. 2002. *Standard Practice Making and Curing Concrete Test Specimens in Field*. USA: Annual Books of ASTM Standard.
- ASTM E 178-02. 2002. *Standard Practice for Dealing with Outlying Observation*. American Society for Testing and Materials. 1-18.
- ASTM C 40-92. 1992. *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. West Conshohocken, PA. USA: ASTM International.
- ASTM C 33. 1882. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. United States: ASTM.
- ASTM C 117-80. *Test Method for Materials Finer than Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. American Society for Testing and Material.
- ASTM C 188-95. *Density Test of Hydraulic Cement*. American Society for Testing and Material.
- ASTM C 191-08. *Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. American Society for Testing and Material.
- ASTM C 566-89. 1993. *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate By Drying*. American Society for Testing and Material.

- Aslam, M., Rahman, M. A., Hassan, S., dan Hwang, S. 2019. The Effect of Seawater Exposure on The Pore Structure and Physico-Mechanical Properties of Blended Cement Mortars. *Journal of Building Engineering*, 26, 100.
- Aïtcin, Pierre Claude. 2016a. Phenomenology of cement hydration. Hlm. 15–25 dalam *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier Inc.
- Aïtcin, Pierre Claude. 2016b. Portland cement. Hlm. 27–51 dalam *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier Inc.
- Ahmad, I. A., Taufieq, N., A., S. dan Aras, A. H. 2009. Analisis Pengaruh Temperature terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Sipil*. 16(2) 0853-2982.
- BSN. 2019. *SNI 2847-2019 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 2004. *SNI 03-2834-2000 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 2004. *SNI 15-7064-2004 Semen Portland Komposit*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 2002. *SNI 03-6815-2002 Spesifikasi Agregat Ringan untuk Batu Cetak Beton Pasangan Dinding*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- BSI. 1976. *SNI 812-1976 Method for Sampling and Testing of Material Aggregates, Sands, and Filler*. British Standard Institution. London.
- Brown, P. W., and Badger, S. 2000. The Distributions of Bound Sulfates and Chlorides Subjected to Mixed NaCl, MgSO₄, Na₂SO₄ Attack. *Cement and Concrete Research* 30, 1535-1542.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1991. *SK SNI T-15-1991-03 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Yayasan LPMB.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1989. *SK SNI M-12-1989-F Pengujian Slump Beton*. Jakarta: Yayasan LPMB.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1971. *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI 1971)*. Bandung: Yayasan Lembaga Penyelidikan Bangunan.
- De Weerd, K., Justnes, H., dan Geiker, R. M. 2014. Changes in the Phase Assemblage of Concrete Exposed to Sea Water. *Cement dan Concrete Composites*. 53-63.
- Emmanuel, A. O., Oladipor, F. A., dan Olabode, O. 2012. Investigation of Salinity Effect on Compressive Strength of Reinforced Concrete. *Journal of*

Sustainable Development. Vol. 5(6). 2012. ISSN 1913-9063 E-ISSN 1913-9071 pp: 74-82. *Published by Canadian Center of Science and Education.*

- E. Holt., 2005. Contribution of Mixture Design to Chemical and Autogeneous Shrinkage of Concrete at Early Ages. *Cement and Concrete Research*, 35(3)pp: 464-472.
- Gupta, S. M., Sehgal, V. K., dan Kaushik, S. K. 2017. Shrinkage of High Strength Concrete. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. Vol. 3(2), 154-157.
- Ginting, A. 2011. Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur pada Berbagai Umur Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 7(2) 98-192.
- Indocement, PT, Tbk. 2018. *PCC Tiga Roda: Produk Hijau yang Diakui oleh Green Listing Indonesia.*
- Islam, M., Islam, S., dan Mondal, B.,. 2012. Deterioration of Concrete in Ambient Marine Environment. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications* 25(4):289–301.
- Islam, M. M., Islam, S., Mondal, B., dan Islam, M. R. (2010). Strength Behavior of Concrete Using Slag with Cement in Sea Water Environment. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 38(2) (2010)pp:129-140.
- Khirunnisa, S., Rifqi, M. G., dan Amin, M. S. 2019. Kajian Kuat Tekan Beton di Lingkungan Laut Tropis Banyuwangi. *Potensi*, 21(2).
- Kurdowski, W. 2004. The Protective Layer and Decalcification of C-S-H in The Mechanism of Chloride Corrosion of Cement Paste. *Cement and Concrete Research* 34, 1555-1559.
- Liu, G., Wu, Q., dan Wang, X. 2019. Effect of Seawater on The Shrinkage Deformation and Cracking Behavior of Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, 221, 659-671.
- Mangi, S. A., Makhija, A., Raza, M. S, Hussain, K. S., dan Ahmed, J. A. 2020. A Comprehensive on Effect of Seawater on Engineering Properties of Concrete. *Sillicon* 13, 4519-4526.
- Marchon, D., dan Robert J. Flatt. 2016. Mechanisms of cement hydration. Hlm. 129–45 dalam *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier Inc.
- Metha, P. K., dan Monteiro, P. J. 2014. *Concrete Microstructures, Properties, and Materials*, McGraws-Hill Education.
- Mulyono, T. 2006. *Teknologi Beton*. Andi. Yogyakarta.

- Metha, P. K. 1991. *Concrete in The Marine Environment*. Elsevier Applied Science. London.
- Metha, P. K. 1986. *Durability, Chapter-5, Concrete Structure, Properties and Materials*. Printice-Hall, Eaglewoods Cliffs, New Jersey.
- Niken, Chatarina. 2019. Early-Age Shrinkage of High-Performance Concrete Beam in Laboratory and Full-Scale. doi: 10.7176/CER.
- Niken, C., Elly, T., dan Supartono, F. X., 2017. Long-term Deformation of Beam and Column of High Performance Concrete. *International Journal of Technology*. Vol. 8(5), 811-819.
- Neville, A. M. 2011. *Properties of Concrete 5th Edition*. Longman. England.
- Neville, A. 2005. *Properties of Concrete 4th Edition*. Prentice Hall. London.
- Neville, A. M., dan Brooks, J. J. 1987. *Concrete Technology*. Longman Scientific dan Technical. Longman Group UK Limited.
- Olutoge, F. A., dan Amusan, G. M. 2014. The Effect of Sea Water on Compressive Strength of Concrete. *International Journal of Engineering Sciences Inventuon*, 3(7), 23-31.
- Putra, R. A., Yusuf, M., dan Lubis, F. 2020. The Effect of Chloride and Sulfate Ions on The Compressive Strength and Elasticity Modulus of Concrete Exposed to Seawater. *MATEC Web of Conferensces*, 276, 05002.
- Pratama, A. R., Setyowibowo, H., dan Wijanto, S. H. 2019. The Effect of Shrinkage on the Behavior of Concrete Columns in Marine Environment. *Materials Science Engineering*, 546(1), 012051.
- Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V. W. Y., dan Yu, T. 2021. Durability Deterioration of Concrete Under Marine Environment from Material to Structure: A Critical Review. *Journal of Building Engineering*, 35-10274.
- SII. 1980. *SII 0052-1980 Mutu dan Cara Uji Agregat*. Departemen Perindustrian Republik Indonesia.
- Sulaiman, L., Suppa, R., Indriani, N. K., dan Wahyuni, S. 2020. Ketahanan Beton Agregat Recycle Terhadap Lama Perendaman Air Laut. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan-CENTECH*, 1(2), 66-74.
- Setiawan, F. 2018. Analisis Pemanfaatan Batu Kapur di Daerah Semanding Tuban sebagai Pengganti Agregat Kasar pada Campuran Beton. *Universitas 17 Agustus 1945*, 12.

- Santhanam, M., and M. Otieno. 2016. Deterioration of Concrete in the Marine Environment. Pp. 137–49 in *Marine Concrete Structures*. Elsevier.
- Setiawan, A. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. Erlangga. Jakarta.
- Shihada, S., dan Arafa, M. 2010. Effects of Silica Fume, Ultrafine and Mixing Sequences on Properties of Ultra High Performance Concrete. *Asian Journal of Materials Science*. Vol. 2 (3), 137-146.
- Scherer, G. W., 2004. Stress from Crystallization of Salt. *Cement and Concrete Research* 36, 1557-1575.
- Tumingan. 2017. Sifat Mekanik Kuat Tarik Belah dan Porositas Beton Menggunakan Limbah Abu Batu Bara (Pond Ash). *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri*. ITN Malang. 2085-4218.
- Tjokrodimuldjo. 2007. *Teknologi Beton*. Biro Penerbit. Yogyakarta
- Tazawa, E., and Miyazawa, S., 1997. Influence of Constituents and Composition on Autogenous Shrinkage of Cementitious Materials. *Magazine of Concrete Research*, 49(178) 15-22.
- Tjokrodimuljo, K. 1996. *Buku Ajaran Teknologi Beton*. Nafiri. Yogyakarta.
- Untu, G. E., Kumaat, E. J., dan Windah, R. S. 2015. Pengujian Kuat Tarik Belah dengan Variasi Kuat Tekan Beton. *Jurnal Sipil Statik*, 3(10), 703-708.
- Wang, P., Huang, R., Yang, Y., dan Wu, K. 2018. Experimental Study on Deformation Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Seawater Corrosion. *Jurnal of Marine Science and Engineering*, 6(1), 15.
- Wedhanto, S. 2017. Pengaruh Air Laut terhadap Kekuatan Tekan Beton yang Terbuat dari Berbagai Merk Semen yang ada di Kota Malang. *Bangunan*. 22(2), 21-30.
- Wora, M., dan Segu, Y. 2014. Pengaruh Waktu Perendaman Beton dalam Air Laut dapat Menurun Kualitas Beton. *Teknosiar*. 8(2), 23-34.