

**DEFORMASI KEMBANG SUSUT BALOK BETON YANG  
MENGUNAKAN BAHAN SEMEN JENIS PCC**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ANGGITA YULIANA LESTARI**

**1915011039**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## **ABSTRAK**

### **DEFORMASI KEMBANG SUSUT BALOK BETON YANG MENGUNAKAN BAHAN SEMEN JENIS PCC**

Oleh

**ANGGITA YULIANA LESTARI**

Balok adalah elemen penting dalam konstruksi bangunan yang berfungsi untuk mentransfer beban dari pelat. Kemampuan tersebut tergantung pada perlakuan yang diberikan sebelum beton menerima beban. Perawatan yang benar setelah pengecoran dapat meminimalkan keretakan akibat deformasi. Deformasi beton terjadi dalam bentuk penyusutan dan pengembangan yang dapat dipengaruhi oleh temperatur dan *relative humidity* (RH) sekeliling. Kecenderungan pemakaian semen tipe PCC terus meningkat dibandingkan dengan OPC karena lebih ramah lingkungan dan dapat mengurangi pemanasan global. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana perilaku deformasi balok beton berdasarkan umur benda uji serta hubungannya dengan temperatur dan RH sekeliling beton. Penelitian ini dilakukan selama 90 hari. Digunakan 3 buah benda uji balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm, dengan kuat tekan rencana 20,75 MPa. Benda uji diletakkan di atas dua buah tumpuan. Regangan diperoleh dengan menggunakan kawat getar tertanam (EVWSG) yang berada pada 5 cm dari ujung benda uji. Pengamatan dilakukan segera setelah pengecoran. Data dari ketiga benda uji dianalisis menggunakan kriteria Dixon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kembang susut beton pada umur 90 hari memiliki nilai lebih besar 2,34 kali daripada prediksi ACI 209R. Hal ini berarti ACI 209R tidak dapat diterapkan secara langsung dalam mendesain susut beton dan penggunaan pedoman tersebut harus disesuaikan dengan kondisi lokal dan didukung oleh penelitian dan uji coba yang sesuai di lingkungan Indonesia. Susut beton dipengaruhi oleh temperatur dan RH sekeliling beton, dibuktikan ketika RH sekeliling beton tinggi dan suhu udara yang rendah, maka penyusutan yang terjadi akan rendah, dan sebaliknya.

Kata kunci: balok, susut, temperatur, RH, PCC.

## **ABSTRACT**

### **DEFORMATION OF THE SHRINKAGE OF CONCRETE BEAM USING PCC TYPE CEMENT MATERIAL**

*By*

**ANGGITA YULIANA LESTARI**

*Beams are important elements in building construction that function to transfer loads from plates. This ability depends on the treatment given before the concrete receives the load. Proper care after casting can minimize cracking due to deformation. Concrete deformation occurs in the form of shrinkage and expansion, which can be influenced by the surrounding temperature and relative humidity (RH). The tendency to use PCC type cement continues to increase compared to OPC because it is more environmentally friendly and can reduce global warming. The aim of this research is to determine the deformation behavior of concrete blocks based on the age of the test object and its relationship with the temperature and RH surrounding the concrete. This research was conducted for 90 days. Three test beams measuring 15 cm x 15 cm x 60 cm were used, with a concrete quality of 20.75 MPa. The test object is placed on two supports. The strain was obtained using an embedded vibrating wire (EVWSG) located 5 cm from the end of the test object. Observations were made immediately after casting. Data from the three test objects was analyzed using Dixon's criteria. The research results show that the swelling and shrinkage value of concrete at 90 days is 2.34 times greater than the ACI 209R prediction. This means that ACI 209R cannot be applied directly to the design of concrete shrinkage, and the use of these guidelines must be adapted to local conditions and supported by appropriate research and trials in the Indonesian environment. Concrete shrinkage is influenced by the temperature and RH around the concrete. When the RH around the concrete is high and the air temperature is low, the shrinkage that occurs will be low, and vice versa.*

*Keywords: beam, shrinkage, temperature, RH, PCC.*

**DEFORMASI KEMBANG SUSUT BALOK BETON YANG  
MENGUNAKAN BAHAN SEMEN JENIS PCC**

**Oleh**

**ANGGITA YULIANA LESTARI**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Program Studi S1 Teknik Sipil  
Jurusan Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Skripsi : **DEFORMASI KEMBANG SUSUT BALOK  
BETON YANG MENGGUNAKAN BAHAN  
SEMEN JENIS PCC**

Nama Mahasiswa : **Anggita Yuliana Testari**

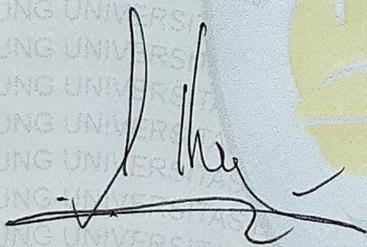
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915011039

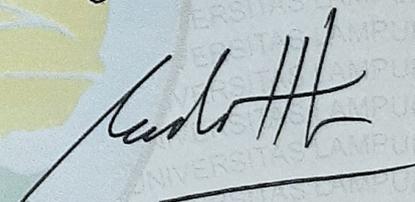
Program Studi : S1 Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**

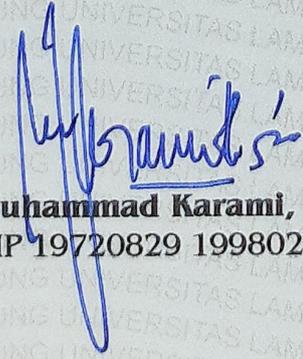
**1. Komisi Pembimbing**

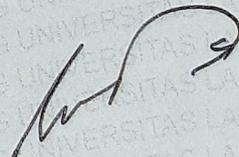
  
**Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU., M.T.**  
NIP 19580613 198403 2 003

  
**Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.**  
NIP 19700430 199703 1 003

**2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil**

**3. Ketua Jurusan Teknik Sipil**

  
**Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP 19720829 199802 1 001

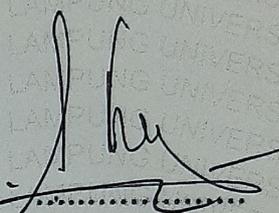
  
**Ir. Laksmi Irianti, M.T.**  
NIP 19620408 198903 2 001

## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

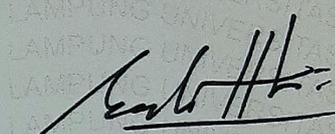
Ketua

: **Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU., M.T.** .....



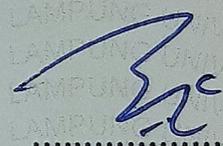
Sekretaris

: **Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.** .....

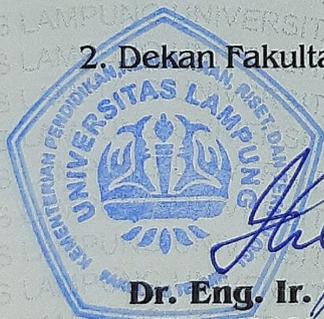


Penguji

Bukan Pembimbing : **Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.** .....



### 2. Dekan Fakultas Teknik



**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 1**

NIP 19750928 200112 1 002



**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 1 November 2023**

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Anggita Yuliana Lestari

NPM : 1915011039

Prodi/Jurusan : S1/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi yang berjudul “*DEFORMASI KEMBANG SUSUT BALOK BETON YANG MENGGUNAKAN BAHAN SEMEN JENIS PCC*” 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 secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Ide penelitian didapat dari Pembimbing I, oleh karena itu baik atas data penelitian berada pada Saya dan Pembimbing I, Ibu Prof. Dr. Ir. C. Niken, DWSBU., M.T.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 1 November 2023



Anggita Yuliana Lestari

## RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Gaya Baru VIII pada tanggal 3 Juli 2002, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Rokhani dan Ibu Suyatini. Penulis memiliki seorang adik laki-laki bernama Pandu Gilang Lestari. Penulis menempuh jenjang pendidikan sekolah dasar di SD Negeri Gaya Baru VIII pada tahun 2008 – 2014, lalu dilanjutkan ke sekolah menengah pertama di SMP Negeri 1 Seputih Surabaya yang diselesaikan pada tahun 2017 dan dilanjutkan ke sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Kotagajah yang diselesaikan pada tahun 2019.

Pada tahun 2019 penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur PMPAP. Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis berperan aktif di organisasi tingkat fakultas yaitu BEM FT Unila selama 2 periode pada tahun 2019 – 2021, dan organisasi jurusan yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) sebagai anggota Departemen Kaderisasi Periode 2020 – 2021 dan Sekretaris Departemen Kerohanian dan Keolahragaan Periode 2021 – 2022. Penulis juga telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) Periode I di Rawa Betik, Kecamatan Seputih Surabaya selama 40 hari, Januari – Februari 2022. Ditahun yang sama, tepatnya dibulan Juli – Oktober penulis juga telah melakukan Kerja Praktik di Proyek Pembangunan Rumah Singgah dan *Community Space*, Urip Sumohardjo selama 3 bulan. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Deformasi Kembang Susut Balok Beton yang Menggunakan Bahan Semen Jenis PCC”.

## MOTTO

“Allahumma Yassir Walaa Tu’assir”  
Ya Allah, mudahkanlah (urusanku) dan janganlah engkau persulit.

“Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan, maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain).”  
QS. Al-Insyirah: 6-7

*“God has perfect timing, never early, never late. It takes a little patience and it takes a lot of faith, but it’s a worth the wait.”*

“Lambat bukan berarti kalah, cepat bukan berarti menang. Nyatanya semua punya garis finishnya masing-masing, diwaktu yang tepat dan tentunya dengan usaha yang maksimal”

## **PERSEMBAHAN**

Tiada lembar skripsi yang paling inti dalam laporan skripsi ini kecuali lembar persembahan. Laporan skripsi ini saya persembahkan untuk Allah SWT yang telah memberikan kemudahan dan pertolongan sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini saya persembahkan sebagai tanda bukti kepada kedua orang tua dan adik saya tercinta yang selalu mendoakan serta memberi motivasi, dorongan dan semangat untuk saya dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih sudah bersusah payah mengantarkan saya sampai ditempat ini.

Tak lupa, diri saya sendiri Anggita Yuliana Lestari, apresiasi sebesar-besarnya karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Terima kasih karena telah mampu berjuang dan tidak pernah menyerah hingga dapat menyelesaikan perkuliahan ini.

Skripsi ini saya persembahkan untuk bapak/ibu Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat berjasa yang selalu membimbing dan mengarahkan saya untuk segera menyelesaikan kewajiban ini.

Sahabat dan teman-teman saya, terima kasih karena selalu mendukung, memotivasi dan menemani dalam suka maupun duka.

## SANWACANA

*Alhamdulillah* *rabbil'alamin*, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Deformasi Kembang Susut Balok Beton yang Menggunakan Bahan Semen Jenis PCC”** dengan tepat waktu, sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata 1 di Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya, serta senantiasa memudahkan dalam segala urusan hamba-Nya.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Prodi S-1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. C. Niken D.W.S.B.U., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama yang memberikan bimbingan, pengarahan dan saran kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.
6. Bapak Ir. Masdar Helmi, S.T.,D.E.A.,Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang memberikan motivasi, saran dan membimbing penulisan skripsi.

7. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji atas kesediaannya memberikan kritik dan saran bagi perbaikan skripsi.
8. Bapak Ir Andius Dasa Putra, S.T., M.T., Ph.D., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan bimbingan dan arahan selama perkuliahan.
9. Seluruh Civitas Akademik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
10. Keluarga tercinta terutama kedua orang tua dan adik, yang selalu mendoakan dan telah sabar dalam memberi dukungan, nasihat, dan motivasi dalam menyelesaikan laporan skripsi ini.
11. Tim penelitian skripsi, Wisnu, Doni, Fatwa dan Aji atas kerjasama dan kebersamaannya dalam menyelesaikan penelitian ini.
12. Mayang, Silfa, Caroline, Tiara dan Naya senantiasa menjadi tempat berkeluh kesah terbaik dan selalu mendukung dalam menjalani proses perkuliahan.
13. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2019 (SOLID 19) yang telah berjuang bersama, berbagi kenangan dan pengalaman yang tak terlupakan.

Penulis menyadari akan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki penulis sehingga masih terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak dan berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung,

2023

**Anggita Yuliana Lestari**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>vi</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Penelitian .....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>8</b>
2.1 Pengertian Beton .....	8
2.1.1 Kelebihan Beton .....	9
2.1.2 Kekurangan Beton .....	9
2.1.3 Sifat Umum Beton .....	9
2.2 Bahan Penyusun Beton .....	15
2.2.1 Semen <i>Portland</i> .....	16
2.2.2 Agregat .....	18
2.2.3 Air.....	21
2.3 Landasan Teori .....	22
2.3.1 Balok Beton .....	22
2.3.2 Deformasi Beton .....	23
2.3.3 Faktor Penyebab Deformasi .....	24
2.3.4 Kuat Tekan.....	30
2.4 Penelitian Sebelumnya .....	31
2.4.1 Deformasi Berdasarkan Penelitian Sebelumnya .....	31
2.4.2 <i>Mix Design</i> Berdasarkan Penelitian Sebelumnya .....	36
2.4.3 Metode dan Durasi Pencampuran Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya .....	37
<b>III. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>38</b>
3.1 Persiapan Alat dan Bahan .....	38
3.2 Pemeriksaan Material .....	44
3.3 Hasil Pengujian <i>Properties</i> Material .....	45
3.4 Perencanaan Campuran ( <i>Mix Design</i> ) .....	46

3.5	Pembuatan Sampel Benda Uji .....	46
3.6	Pengujian <i>Workability</i> Beton Segar .....	47
3.7	Perlakuan Benda Uji .....	48
3.8	Metode Pengamatan Deformasi pada Temperatur dan RH Sekeliling Beton .....	48
3.9	Analisis Hasil Penelitian .....	49
3.10	Diagram Alir Penelitian .....	51
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>52</b>
4.1	Umum .....	52
4.2	Keleccakan Beton .....	52
4.3	Peletakan Benda Uji .....	54
4.3.1	Peletakan Deformasi Beton .....	54
4.3.2	Peletakan Beton Kuat Tekan dengan CTM dan <i>Hammer test</i> .....	58
4.4	Hasil Penelitian Kembang Susut Beton .....	59
4.4.1	Hasil Penelitian Kembang Susut Beton saat 24 Jam Pertama .....	61
4.4.2	Hasil Penelitian Kembang Susut Beton saat Masa <i>Curing</i> ..... ..	68
4.4.3	Penelitian Kembang Susut Beton Setelah <i>Curing</i> .....	73
4.4.4	Perbandingan Kembang Susut Beton Hasil Penelitian dengan ACI 209R-92 .....	77
4.4.5	Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu ..	80
4.5	Hasil Pengujian Kuat Tekan .....	81
<b>V. PENUTUP .....</b>		<b>86</b>
5.6	Kesimpulan .....	86
5.7	Saran .....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>vii</b>
<b>LAMPIRAN A (HASIL UJI MATERIAL)</b>		
<b>LAMPIRAN B (MIX DESIGN)</b>		
<b>LAMPIRAN C (DATA HASIL PENGUJIAN)</b>		
<b>LAMPIRAN D (FOTO PENELITIAN)</b>		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kurva regangan susut dan waktu .....	10
2. Mekanisme defleksi pada balok beton .....	24
3. Skema benda uji balok dengan EVWSG .....	38
4. Alat EVWSG .....	39
5. Alat <i>vibrating wire readout</i> .....	39
6. Alat termometer <i>hygrometer</i> .....	40
7. Alat termometer air .....	40
8. Skema penempatan benda uji saat <i>curing</i> .....	48
9. Diagram alir penelitian .....	51
10. Nilai <i>slump</i> pengecoran 1 (kuat tekan dengan CTM) .....	53
11. Nilai <i>slump</i> pengecoran 2 (deformasi dan kuat tekan dengan <i>hammer test</i> ) .....	54
12. Peletakan EVWSG .....	55
13. Peletakan <i>Styrofoam</i> .....	56
14. Peletakan benda uji saat <i>curing</i> .....	57
15. Peletakan benda uji setelah <i>curing</i> .....	58
16. Peletakan benda uji setelah dipindahkan .....	58
17. Peletakan benda uji silinder .....	59
18. Peletakan benda uji balok .....	59
19. Kembang susut beton saat 24 jam pertama.....	62
20. Suhu dalam beton saat 24 jam pertama .....	62
21. <i>Outlying</i> kembang susut beton saat 24 jam pertama .....	63
22. <i>Outlying</i> suhu dalam beton saat 24 jam pertama .....	63
23. Perilaku kembang susut beton saat 24 jam pertama .....	64
24. Suhu rata-rata dalam beton saat 24 jam pertama .....	64
25. Hidrasi dari C <sub>3</sub> S atau alite .....	65

26.	Kembang susut beton saat masa <i>curing</i> .....	69
27.	Suhu dalam beton dan suhu udara sekitar saat masa <i>curing</i> .....	69
28.	<i>Outlying</i> kembang susut beton saat masa <i>curing</i> .....	70
29.	<i>Outlying</i> suhu dalam beton saat masa <i>curing</i> .....	70
30.	Perilaku kembang susut beton saat masa <i>curing</i> .....	71
31.	Suhu rata-rata dalam beton, suhu dan kelembapan sekitar saat masa <i>curing</i> .....	71
32.	Kembang susut beton setelah <i>curing</i> .....	74
33.	Suhu dalam beton dan suhu udara sekitar setelah <i>curing</i> .....	74
34.	<i>Outlying</i> kembang susut beton setelah <i>curing</i> .....	75
35.	<i>Outlying</i> suhu dalam beton setelah <i>curing</i> .....	75
36.	Perilaku kembang susut beton setelah <i>curing</i> .....	76
37.	Suhu rata-rata dalam beton setelah <i>curing</i> .....	76
38.	Perbandingan kembang susut beton hasil penelitian dengan ACI 209R ..	79
39.	Kembang susut beton tiga sampel: (a) Semen PCC; (b) Semen OPC .....	80
40.	<i>Outlying</i> kuat tekan dengan <i>hammer test</i> .....	83
41.	<i>Outlying</i> kuat tekan dengan CTM .....	83
42.	Hasil pengujian kuat tekan beton .....	84

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi Semen PCC Merek Tiga Roda .....	17
2. Batas Agregat Kasar Menurut <i>British Standard</i> (B.S) .....	20
3. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia yang Ada dalam Air .....	22
4. Deformasi Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya .....	31
5. <i>Mix Design</i> Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya .....	36
6. Metode dan Durasi Pencampuran Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya.....	37
7. Hasil Pengujian Material Penyusun Beton .....	45
8. Jumlah dan Kode Benda Uji Kuat Tekan .....	46
9. Jumlah dan Kode Benda Uji Deformasi Kembang Susut.....	47
10. Nilai <i>Slump</i> Beton .....	53
11. Data Hasil Penelitian Kembang Susut Beton .....	60
12. Hasil Pengujian Kuat Tekan dengan <i>Hammer Test</i> .....	82
13. Hasil Pengujian Kuat Tekan dengan CTM .....	83

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Beton adalah material bangunan yang paling banyak digunakan di dunia. Beton bertulang lebih banyak digunakan daripada material struktur baja pada beberapa negara (Khodabandeh dkk., 2019). Beton sebagai salah satu bahan konstruksi merupakan material yang cukup ekonomis karena biaya pemeliharaan yang hampir tidak ada. Beton normal terdiri dari campuran air, semen dan agregat, sedangkan beton khusus diberi bahan tambahan (pozzolan, bahan kimia, serat, dll) (Tjokrodinuljo, 2007). Saat ini penggunaan beton tidak semata-mata pada bidang konstruksi saja, tetapi dapat pula digunakan di luar bidang konstruksi. Contoh penggunaan beton di luar bidang konstruksi misalnya, dinding, perabot rumah, kolom praktis, ataupun hiasan rumah lainnya. Beton memiliki sifat yang berbeda dengan material bangunan lainnya, seperti kayu dan baja. Sifat beton yaitu kuat terhadap tekan namun lemah terhadap tarik, sifat kayu kuat tekan dan tariknya tergantung arah seratnya, sedangkan baja memiliki sifat kuat terhadap tarik dan tekan, namun pada kolom rawan terjadi tekuk.

Salah satu bagian struktur yang tidak pernah lepas dalam konstruksi bangunan adalah penggunaan struktur balok. Balok berfungsi untuk mentransfer beban dari pelat. Balok merupakan salah satu komponen struktur bangunan yang kaku. Elemen satu ini didesain khusus untuk mampu menahan dan mentransfer beban ke elemen kolom penopang lainnya (Setiawan, 2016). Menurut Alaydrus dkk. (2016), fungsi utama balok sebagai salah satu elemen struktur yaitu, menahan lentur, geser, dan puntir akibat beban yang ada di atasnya serta berat sendiri balok. Apabila elemen balok menerima beban

dalam arah transversal maka sumbu arah longitudinal akan berpindah posisi, perpindahan ini disebut dengan lendutan atau defleksi. Lendutan pada balok dapat terjadi karena adanya momen lentur dan gaya geser yang bekerja, namun lendutan akibat gaya geser sering diabaikan karena nilainya yang relatif kecil pada balok.

Perancangan balok terhadap lentur dilakukan terlebih dahulu untuk menentukan dimensi penampang balok dan kebutuhan tulangan utamanya. Selanjutnya balok harus dirancang agar dapat menahan gaya geser yang terjadi, apabila tidak dipasang tulangan geser akan menyebabkan kegagalan geser. Dalam mendesain sebuah balok semestinya keruntuhan akibat geser tidak terjadi sebelum keruntuhan lentur, karena umumnya keruntuhan geser terjadi tanpa tanda-tanda terlebih dahulu. Efek gaya geser umumnya terjadi secara bersamaan dengan torsi dalam elemen struktur. Torsi diartikan sebagai terjadinya momen puntir disepanjang batang yang berakibat terpilinnya elemen struktur dalam arah longitudinal. Peristiwa torsi dapat terjadi karena beban transversal yang bekerja tidak segaris dengan posisi garis berat penampang balok (Widodo, 2006).

Deformasi beton dapat berupa pengembangan dan penyusutan. Deformasi tersebut adalah salah satu fenomena yang terjadi pada elemen struktur beton. Balok beton berubah bentuk atau mengalami deformasi seiring waktu karena reaksi hidrasi, faktor lingkungan dan beban yang ditempatkan padanya. Adanya proses hidrasi yang terjadi pada beton menyebabkan terjadinya deformasi secara alami setelah dilakukan pengecoran. Faktor waktu dapat mempengaruhi deformasi pada beton (David dan Supartono, 2023). Deformasi merupakan salah satu kontrol stabilitas suatu struktur balok terhadap keamanannya (Alaydrus dkk., 2016).

Penyusutan atau biasa disebut *shrinkage* adalah fenomena yang terjadi pada beton dimana kehilangan kelembapan dari waktu ke waktu yang menyebabkan perubahan volume. Penyebab penyusutan beton adalah

perubahan kadar air dan fisio-kimiawi dalam beton yang terjadi karena tindakan di luar beton (Nawy, 1998). Penyusutan juga terjadi oleh perubahan volume bahan dasar beton ke produk hidrasi. Pengembangan adalah bertambahnya volume beton dari waktu ke waktu. Deformasi tersebut dapat mengurangi kekuatan dan stabilitas struktur, oleh karena itu diperlukan perawatan yang tepat untuk memperbaikinya. Penyusutan dan pengembangan yang terjadi pada struktur beton dapat mengakibatkan retak atau bahkan keruntuhan pada struktur.

Industri semen berperan terhadap emisi CO<sub>2</sub> global sebanyak 4% dan 7% dalam penggunaan bahan bakar industri. Industri semen di Indonesia berada peringkat pertama penghasil emisi gas rumah kaca sebesar 55%. Oleh sebab itu, industri semen berperan penting terhadap emisi gas rumah kaca dan secara keseluruhan pengurangan emisi pada sektor ini akan berpengaruh cukup besar pada berkurangnya emisi gas rumah kaca yang terjadi (Devia, 2017). Terdapat beberapa jenis semen di Indonesia tergantung dengan tujuan penggunaannya. Saat ini, salah satu tipe semen yang dapat dengan mudah ditemukan di pasaran karena penggunaannya yang terus meningkat dalam proyek besar adalah semen tipe PCC. Kecenderungan pemakaian semen tipe PCC terus meningkat dikarenakan harga semen tipe PCC lebih murah dibandingkan dengan semen tipe OPC dan lebih ramah lingkungan untuk mengurangi pemanasan global. Semen tipe OPC harus melalui pemesanan khusus dan tidak diedarkan di masyarakat, karena semen OPC lebih mahal dan kurang ramah lingkungan sebab tidak mengandung material pozzolan didalamnya (Susanto dkk., 2019).

Menurut SNI 7064:2014, PCC merupakan produk semen yang mengandung klinker lebih sedikit antara 65% - 95% dibandingkan dengan OPC sebesar 95%. Semen PCC juga telah menggunakan limbah sebagai bahan campurannya, yaitu *fly ash* dan *slag* sebagai pengganti klinker. Semen PCC adalah bahan pengikat hidrolisis hasil penggilingan bersama-sama terak semen *portland* dan gypsum dengan satu atau lebih bahan anorganik atau

hasil pencampuran antara bubuk semen *portland* dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik yang digunakan adalah terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silikat, dan batu kapur dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35 % dari massa semen *portland* komposit.

Keunggulan semen PCC adalah materialnya yang ramah lingkungan dikarenakan penggunaan bahan bakar dalam proses produksi PCC dapat dikurangi hingga 20%, material pozzolan digunakan sebagai pengganti sebagian klinker, penggantian ini juga dapat mengurangi potensi emisi gas CO<sub>2</sub>. Dalam proses produksi PCC sudah menggunakan teknologi penangkapan debu mutakhir yang dapat menekan potensi pencemaran udara dan sudah menggunakan bahan bakar alternatif terbarukan. Selain itu, PCC didesain untuk memiliki ketahanan yang tinggi, tahan terhadap sulfat, panas hidrasi yang rendah, dan memiliki kepadatan yang tinggi sehingga mampu meningkatkan ketahanan bangunan dalam jangka waktu yang lebih lama (Indocement, 2018).

*Relative humidity* (RH) merupakan perbandingan antara uap air di udara pada suhu tertentu dengan jumlah uap air maksimal yang dapat dicapai pada suhu tersebut dalam keadaan jenuh. Reaksi kimia yang terjadi pada proses pengerasan beton sangat tergantung pada kadar air. Apabila penguapan air terjadi secara berlebihan, maka proses hidrasi dapat terganggu. Kelembaban relatif dapat mempengaruhi proses penguapan yang dapat menyebabkan kehilangan air pada beton, karena semakin besar nilai kelembapan relatif, maka semakin kecil penguapan air yang terjadi. Selain itu, semakin tinggi temperatur maka semakin besar penguapan air yang terjadi (Neville, 2005).

Niken dkk. (2013), telah melakukan penelitian serupa tentang deformasi menggunakan semen jenis OPC. Jenis semen ini digunakan untuk bangunan umum seperti bangunan bertingkat tinggi, jembatan, dan perumahan, karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi. Namun, dalam penelitian ini digunakan jenis semen yang berbeda yaitu semen jenis PCC dikarenakan banyaknya

masyarakat yang menggunakan jenis semen ini untuk bangunan yang tidak terlalu tinggi. Berdasarkan latar belakang tersebut, perlu dilakukan penelitian bagaimana deformasi kembang susut beton dalam jangka waktu tertentu serta hubungannya dengan suhu dan RH sekeliling beton.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian diatas dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku deformasi balok beton terhadap umur benda uji?
2. Bagaimana hubungan temperatur dan RH sekeliling beton terhadap deformasi beton?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perilaku deformasi balok beton berdasarkan umur benda uji.
2. Menganalisis hubungan temperatur dan RH sekeliling beton terhadap deformasi beton.

## 1.4 Batasan Penelitian

Dalam mengerjakan Tugas Akhir ini penulis mempertimbangkan luasnya faktor-faktor yang sangat berpengaruh dalam penelitian, yaitu menggunakan batasan-batasan penelitian sebagai berikut:

1. Benda uji diilustrasikan sebagai balok yang ditumpu oleh dua tumpuan yang dipasang pada 7,5 cm dari ujung balok.
2. Benda uji yang digunakan berbentuk balok dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm sesuai ASTM C 78-08, sebanyak 3 buah untuk penelitian deformasi dan 3 buah untuk uji kuat tekan dengan *hammer test* serta benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 60 cm sebanyak 9 buah untuk uji kuat tekan dengan CTM.
3. Benda uji ditempatkan pada kondisi terlindung.

4. Beton yang digunakan adalah beton normal dengan kekuatan rencana K-250 (20,75 MPa).
5. Perawatan dilakukan dengan cara direndam di air sampai beton berumur 7 hari.
6. Pengamatan dilakukan selama 90 hari.
7. Penelitian menggunakan satu buah *embedded vibrating wire strain gauge* (EVWSG) yang dipasang pada 5 cm dari ujung balok pada setiap sampel.
8. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Lampung.
9. Material yang digunakan adalah semen PCC dengan merek Tiga Roda, agregat halus berasal dari *quarry* Gunung Sugih, air yang diambil dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Lampung.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian tentang perilaku deformasi kembang susut balok beton memiliki manfaat dalam bidang teknik sipil dan konstruksi. Beberapa manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan pemahaman tentang perilaku deformasi kembang susut balok beton.
2. Menambah pengetahuan tentang temperatur dan RH sekeliling beton terhadap deformasi beton.
3. Menjadi bahan pertimbangan dalam merencanakan konstruksi bangunan yang lebih aman dan tahan lama.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Secara sistematis pembahasan yang diuraikan pada penelitian ini dibagi menjadi lima bab, antara lain sebagai berikut:

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, manfaat, serta sistematika penulisan.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori yang mendasari serta menunjang penelitian yang akan dilakukan dan diperoleh dari berbagai sumber.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan gambaran umum, lokasi penelitian, metode membuat sampel, metode perlakuan sampel, metode pengamatan deformasi pada temperatur dan RH sekeliling sampel, dan metode yang digunakan dalam menganalisis data, serta diagram alir penelitian.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil analisis data serta pembahasan data berdasarkan hasil yang diperoleh dan teori yang ada.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil-hasil yang didapat dari pengolahan data dan memberikan saran untuk hasil tersebut.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pengertian Beton

Menurut SNI 2847:2019, beton merupakan campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Sederhananya, beton terbentuk ketika mengerasnya campuran semen, air, agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil). Terkadang campuran bahan lain (*admixture*) ditambahkan untuk meningkatkan kualitas beton. Pemilihan bahan harus dilakukan sesuai dengan perhitungan kebutuhan yang direncanakan, karena berpengaruh terhadap kualitas, *workability* dan mutu beton itu sendiri. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi sedangkan kuat tariknya rendah. Oleh sebab itu beton dalam struktur selalu dipadukan dengan tulangan baja untuk mencapai kinerja yang tinggi. Beton dengan tulangan baja disebut beton bertulang, dan beton dengan tulangan baja prategang disebut beton prategang (Tjokrodimuldjo, 2007).

Pada konstruksi gedung, beton digunakan pada elemen struktur pondasi, kolom, balok dan pelat. Dalam konstruksi jalan, beton digunakan untuk perkerasan kaku, saluran samping dan gorong-gorong. Pada bangunan air, beton digunakan untuk bendung, drainase, maupun saluran irigasi. Dari penjelasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa semua konstruksi pada teknik sipil memerlukan penggunaan beton. Tjokrodimuldjo (2007), menyebutkan bahwa beton memiliki kelebihan dan kekurangan dibandingkan bahan lainnya, antara lain sebagai berikut:

### **2.1.1 Kelebihan Beton**

Beton memiliki beberapa kelebihan yaitu harga yang relatif rendah, karena menggunakan bahan dasar yang biasanya ada di sekitar lokasi konstruksi, terkecuali semen *portland*. Selain itu, beton adalah bahan tahan panas karena kebakaran, tahan lama, tahan aus, tahan karat atau pembusukan karena faktor lingkungan, sehingga biaya perawatannya rendah. Kuat tekan beton secara struktural cukup tinggi, sehingga jika dipadukan dengan baja tulangan (yang memiliki kuat tarik tinggi), sangat cocok untuk struktur berat. Beton segar dapat diangkut atau dicetak dengan mudah menjadi ukuran dan bentuk yang diinginkan. Cetakannya juga bisa digunakan berkali-kali agar ekonomis.

### **2.1.2 Kekurangan Beton**

Bahan baku berupa agregat halus dan kasar yang digunakan dalam pembuatan beton berbeda-beda tergantung dari tempat produksinya, sehingga perlu selalu diadakan pemeriksaan bahan dan dihitung komposisinya untuk mencapai kekuatan tertentu. Kekurangan utama beton adalah kekuatan tariknya yang rendah, yang membuatnya mudah retak dan rapuh atau getas sehingga harus dipadukan dengan baja tulangan agar menjadi daktil.

### **2.1.3 Sifat Umum Beton**

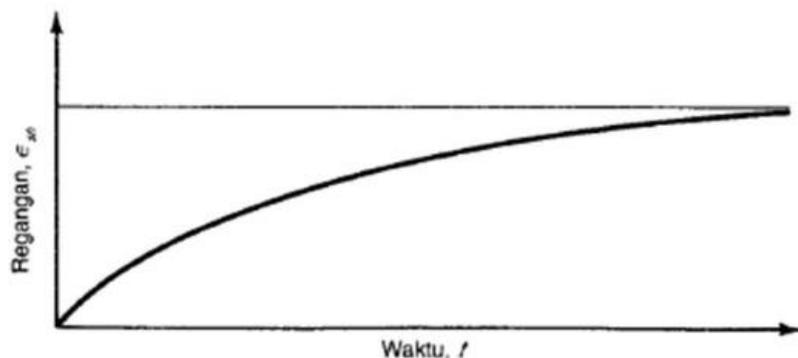
Sifat dan karakteristik bahan penyusun beton dapat berpengaruh terhadap kinerja beton yang dihasilkan. Karakteristik beton harus diperhatikan kaitannya dengan kualitas atau mutu beton yang diperlukan untuk tujuan konstruksi tertentu. Sifat beton biasanya dipengaruhi oleh mutu bahan, cara pelaksanaan dan perawatannya. Kualitas beton ditunjukkan oleh kuat tekannya. Waktu pengerasan beton dipengaruhi oleh karakteristik semen dan gradasi agregat kasar

serta kualitas dan kuantitas air. Kemudahan pengerjaan dipengaruhi oleh gradasi agregat halus. Untuk kebutuhan perencanaan, desain dan pelaksanaan konstruksi beton, perlu diketahui beberapa sifat umum yang dimiliki oleh beton, sebagai berikut:

#### A. Susut Beton (*Shrinkage*)

Nawy (1998) mendefinisikan, susut adalah karakteristik dari beton yang menyebabkan penurunan volume beton karena berkurangnya kandungan air akibat hilangnya kelembapan saat proses pengerasan. Selama proses hidrasi, panas dan air dilepaskan dari beton yang dapat dideteksi dengan kenaikan suhu pada beton, hal tersebut dapat menyebabkan penyusutan. Susut (*shrinkage*) dapat menimbulkan keretakan jika tidak dikontrol dengan baik.

Penyusutan ini dapat menyebabkan keretakan pada beton yang masih dalam kondisi plastis, dan keretakan ini tentu saja dapat mengurangi mutu/kualitas beton yang dihasilkan. Proses susut ini bersifat *irreversibel* (tidak dapat balik), sehingga jika beton yang telah mengalami susut dicelupkan ke dalam air, volume beton tidak akan kembali ke ukuran semula. Kurva regangan susut dan waktu dapat dilihat pada Gambar 1.



(Sumber: Nawy, 1998)

Gambar 1. Kurva regangan susut dan waktu.

Dari Gambar 1 memperlihatkan peningkatan regangan susut ( $\epsilon_{sh}$ ) terhadap waktu. Tingkat penurunannya juga berkurang terhadap waktu karena beton yang bertambah umurnya akan mengalami sedikit perubahan susut. Berbeda dengan Nawy, Niken dkk. (2017), menyatakan bahwa pada beton tidak hanya terjadi penyusutan tetapi juga terjadi pengembangan secara bergantian.

Nawy (1998), membedakan susut beton menjadi 2 jenis yaitu susut plastis dan susut pengeringan, sebagai berikut:

#### 1. Susut plastis

Susut plastis dimulai beberapa jam setelah adukan beton baru dituangkan ke dalam cetakan. Bagian atas yang terbuka seperti pelat lantai lebih rentan terhadap pengaruh udara kering karena memiliki kontak yang lebih luas. Oleh karena itu, penguapan melalui permukaan beton terjadi lebih cepat daripada penyerapan air dari lapisan beton yang lebih dalam. Ketika semen berada dalam keadaan plastis, terjadi pengecilan volume yang dikenal sebagai kontraksi susut plastis.

#### 2. Susut pengeringan

Susut pengeringan dimulai setelah beton mencapai bentuk akhir dan proses pengerasan (hidrasi) semen sudah selesai. Penyusutan ini menandakan penurunan volume elemen beton akibat hilangnya uap air melalui penguapan. Sebaliknya, peningkatan volume akibat penyerapan air disebut pengembangan. Artinya, penyusutan dan pengembangan menandakan adanya pergerakan air ke dalam dan keluar struktur gel pada beton akibat perbedaan kelembapan atau kejenuhan di antara elemen yang berdekatan. Fenomena ini tidak dipengaruhi oleh beban luar. Susut merupakan proses yang tidak dapat dipulihkan. Jika beton yang telah menyusut sepenuhnya direndam dalam air, volume aslinya tidak akan tercapai. Faktor yang dapat menyebabkan susut beton adalah agregat (kasar dan

halus), ukuran struktur beton, rasio air/semen, jumlah tulangan, kelembapan, jenis semen, karbonasi dan bahan tambahan.

#### B. Kemudahan Pengerjaan (*Workability*/Kelecekan)

*Workability* diartikan sebagai tingkat kemudahan dalam pengerjaan campuran beton untuk diaduk, dituang, diangkut, dan dipadatkan. Beton yang dapat dengan mudah dikerjakan dalam pencampuran, dituangkan ke dalam cetakan (*molds*) dan mudah dibentuk didefinisikan sebagai beton yang memiliki *workability*. Uji *slump* dipakai untuk mengetahui tingkat kelecekan/*workability* beton. Campuran beton dapat dikatakan mudah dikerjakan jika nilai *slump* yang dihasilkan masih diantara nilai *slump* rencana. Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat kemudahan dikerjakan antara lain:

1. Jumlah air yang dipakai pada adukan beton. Semakin banyak air yang digunakan, semakin mudah beton segar untuk dikerjakan. Namun pemakaian air juga tidak boleh berlebihan karena kuat tekan beton akan menurun.
2. Penambahan semen ke dalam campuran adukan beton juga memudahkan cara pengerjaan betonnya, karena diikuti dengan penambahan air campuran untuk memperoleh nilai faktor air semen tetap.
3. Gradasi campuran agregrat halus dan agregrat kasar, jika campuran agregrat halus (pasir) dan agregrat kasar (kerikil) mengikuti gradasi yang telah disarankan oleh peraturan maka adukan beton mudah dikerjakan.
4. Pemakaian butiran yang bulat akan memudahkan cara pekerjaan. Pemakaian butir maksimum agregrat kasar (kerikil) yang dipakai berpengaruh terhadap pengerjaan.
5. Cara melakukan pemadatan beton dapat menentukan sifat beton yang berbeda.

6. Jumlah kadar udara yang terdapat di dalam beton dan penggunaan bahan tambah dalam campuran beton.

### C. Tahan Lama (*Durability*)

Tjokrodimuljo (2007), menjelaskan bahwa salah satu kelebihan dari penggunaan beton adalah keawetannya. Yang dimaksud dengan tahan lama adalah kapabilitas beton untuk bertahan dalam waktu yang telah diperhitungkan sebelumnya tanpa mengalami korosi (degradasi). Beberapa unsur yang mempengaruhi sifat *durability*/keawetan dari beton adalah sebagai berikut:

1. Tahan atau awet terhadap pengaruh cuaca seperti adanya perubahan suhu saat musim panas maupun dingin dan akibat terjadinya hujan. Kedua hal tersebut dapat berpengaruh pada kembang susut beton.
2. Tahan oleh pengaruh bahan kimia, contohnya air limbah, air laut, bahan kimia yang berasal dari industri serta air buangan yang kotor, hal tersebut dapat berpengaruh pada keawetan/*durability* beton.
3. Tahan terhadap pengikisan (erosi), pengikisan disebabkan oleh beberapa hal, seperti mobilitas orang atau lalu lintas yang diterima beton, pergerakan ombak di laut, atau unsur yang tergiring oleh air atau angin laut.

### D. *Creep* (Rangkak)

Deformasi (perubahan bentuk) pada elemen struktur disebabkan oleh *creep*/rangkak. Rangkak adalah hasil dari deformasi tak elastis yang disebabkan oleh beban konstan pada struktur beton. Rangkak dapat diukur dari awal terjadinya regangan elastis sampai terjadinya regangan tak elastis (David dan Supartono, 2023). Rangkak atau *creep* ialah fenomena di mana beton mengalami

perubahan bentuk secara terus-menerus secara perlahan seiring waktu akibat beban yang ditanggung. Rangkak menyebabkan deformasi sebesar 1,5 hingga 3 kali lipat dari deformasi elastis. Sekitar 50% dari deformasi terjadi dalam beberapa bulan pertama dan sisanya terjadi dalam waktu sekitar 5 tahun pertama (Wijaya dan Supartono, 2020)

#### E. Kuat Tekan

Tjokrodimuljo (2007), menyebutkan sifat beton yang baik diperoleh bila beton memiliki kuat tekan yang tinggi antara 20 sampai 50 MPa pada umur 28 hari. Dengan demikian, diasumsikan mutu beton hanya dilihat dari kuat tekannya. Kuat tekan merupakan besaran maksimum dari tekanan yang dapat ditahan oleh setiap satuan luas. Kuat tekan sering dikaitkan dengan sifat lainnya, sehingga semakin tinggi kuat tekan maka semakin baik sifat lainnya. Nilai kuat tekan beton yang berumur 28 hari kira-kira antara 10 sampai 65 MPa. Untuk nilai kuat tekan antara 17 sampai 30 MPa biasanya digunakan pada struktur beton bertulang, dan untuk nilai kuat tekan yang lebih tinggi antara 30 sampai 45 MPa digunakan pada beton prategang.

#### F. Kuat Tarik

Sifat penting lain dari beton adalah kekuatannya dalam menahan tarik yang mempengaruhi perambatan dan ukuran retakan pada struktur. Nilai kuat tarik beton yaitu sebesar 10% - 15% dari kuat tekannya. Kekuatan tarik beton adalah sifat yang penting untuk memperkirakan defleksi atau retak balok. Pengukuran kekuatan tarik umumnya dilakukan dengan metode *split cylinder* sesuai dengan standar ASTM C 496. Dalam metode ini, silinder yang memiliki ukuran sama dengan benda uji pada percobaan tekan

ditempatkan pada sisinya di atas mesin uji dan beban tekan P diterapkan secara merata pada arah diameter sepanjang benda uji atau sesuai dengan panjang sampel. Kekuatan tarik tercapai ketika benda uji terbelah menjadi dua bagian.

#### G. Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas adalah perbandingan besarnya tegangan dan regangan material saat kondisi elastis. Modulus elastisitas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti usia beton, karakteristik agregat dan semen, durasi pembebanan, serta jenis dan dimensi benda uji yang digunakan. Berdasarkan SNI 2847:2019, nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (\text{beton normal})$$

$$E_c = W_c^{1.5} \cdot 0,043\sqrt{f'_c} \quad (W_c \text{ antara } 1440 - 2560 \text{ kg/m}^3)$$

Keterangan:

$E_c$  = Modulus elastisitas beton (MPa)

$W_c$  = Berat jenis beton

$f'_c$  = kuat tekan beton (MPa)

## 2.2 Bahan Penyusun Beton

Dalam membuat beton, terdapat bahan penyusun seperti semen *portland*, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa menggunakan material tambahan. Beton terbuat dari serangkaian reaksi kimiawi dan mekanis dari beberapa penyusunnya. Dengan pengetahuan tentang karakteristik dari masing-masing komponen penyusun beton diperoleh pemahaman tentang perilaku beton.

### 2.2.1 Semen *Portland*

Semen merupakan material pengikat yang apabila dicampur dengan air maka akan bereaksi lalu mengeras dan membentuk benda padat yang tahan air, atau disebut juga semen hidrolis. Semen *portland* adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan (PUBI-1982, dalam Tjokrodimuljo, 2007). Semen *portland* merupakan bahan ikat yang penting dan banyak dipakai dalam pembangunan fisik. Menurut Setiawan (2016), semen *portland* adalah material berbentuk bubuk berwarna abu-abu yang banyak mengandung kalsium dan aluminium silika. Dalam bidang konstruksi terdapat berbagai macam semen, dan tiap macamnya digunakan untuk kondisi-kondisi tertentu sesuai dengan sifat-sifatnya yang khusus.

Fungsi semen adalah untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang padat dan juga untuk mengisi rongga-rongga antar butir agregat. Selain itu, juga untuk mengisi rongga-rongga di antara butiran agregat. Walaupun semen hanya mengisi kira-kira 10% saja dari volume beton, namun semen merupakan bahan yang aktif maka perlu dipelajari maupun dikontrol secara ilmiah (Tjokrodimuljo, 2007). Banyak unsur kompleks yang terbentuk pada pembuatan semen, secara garis besar terdiri dari 4 (empat) senyawa kimia utama untuk menyusun semen *portland*, yaitu:

1. Trikalsium silika ( $3\text{CaO} - \text{SiO}_2$ ) yang disingkat menjadi  $\text{C}_3\text{S}$ . Semakin tinggi kadar  $\text{C}_3\text{S}$  pada komposisi semen semakin tinggi pula kualitas semen tersebut dan memiliki kekuatan tinggi dan pengerasan lebih cepat.
2. Dikalsium silika ( $2\text{CaO} - \text{SiO}_2$ ) disingkat menjadi  $\text{C}_2\text{S}$ , yaitu senyawa mineral semen dengan jumlah 32% - 52% berat semen.
3. Trikalsium aluminat ( $3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) disingkat menjadi  $\text{C}_3\text{A}$ .

4. Tetrakalsium aluminoforit ( $4\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) disingkat menjadi  $\text{C}_4\text{AF}$ .

*American for Testing and Materials* (ASTM) mengategorikan semen menjadi lima tipe, yaitu:

1. Semen tipe I yaitu semen untuk keperluan konstruksi umum.
2. Semen tipe II yaitu semen yang memiliki panas hidrasi lebih rendah dengan ketahanan sulfat sedang.
3. Semen tipe III yaitu semen dengan kekuatan awal tinggi.
4. Semen tipe IV yaitu semen dengan panas hidrasi rendah untuk proses pengecoran struktur beton yang masif.
5. Semen tipe V yaitu semen dengan ketahanan sulfat tinggi.

Menurut PT. Semen Tiga Roda, semen PCC (*Portland Composite Cement*) digunakan untuk konstruksi atau bangunan umum seperti penggunaan semen *portland* tipe 1 dengan kuat tekan yang sama. PCC mempunyai panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pengerasan, sehingga pengerjaannya akan lebih mudah dan menghasilkan permukaan beton atau plester yang lebih rapat dan lebih halus. Pada PCC komposisi bahan bakunya terdiri dari 3 macam, yaitu 70% – 90% klinker hasil pembakaran, sekitar 5% gypsum, dan zat tambahan berupa kapur serta abu terbang (Susanto, 2019). Komposisi semen PCC merek Tiga Roda terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Semen PCC Merek Tiga Roda

No	Oksida	Persentase (%)
1	$\text{SiO}_2$ (Silika)	23,04
2	Fe (Besi)	3,36
3	$\text{SO}_4$ (Sulfat)	2,00
4	Ca (Kalsium)	57,38
5	Mg (Magnesium)	1,91
6	Al (Aluminium)	7,40

(Sumber: PT. Tiga Roda)

### 2.2.2 Agregat

Agregat menurut SNI 2847:2013, menyebutkan, agregat adalah bahan butiran seperti pasir, kerikil, batu pecah dan slag tanur (*blast-furnace slag*), yang digunakan dengan media perangkat untuk menghasilkan adukan mortar atau beton semen hidraulis. Agregat merupakan butiran mineral alami yang digunakan sebagai pengisi dalam campuran mortar atau beton. Kandungan agregat dalam campuran beton biasanya sangat tinggi berkisar antara 60% - 70% dari berat campuran beton (Tjokrodimuljo, 2007).

Umumnya agregat dapat dibedakan berdasarkan ukuran butirnya, yaitu agregat yang tertahan pada saringan no.4 atau ukuran 4,75 mm diklasifikasikan sebagai agregat kasar, dan agregat yang lolos saringan no.4 atau ukuran 4,75 mm diklasifikasikan sebagai agregat halus. Agregat yang biasa digunakan dalam campuran beton berukuran kurang dari 40 mm. Ukuran butiran maksimum agregat menurut SNI 2847:2013, disyaratkan bahwa batas ukuran agregat tidak melebihi:

1. 1/5 kali jarak terkecil antara bidang samping cetakan
2. 1/3 kali tebal pelat
3. 3/4 kali jarak bersih antar tulangan, jaring kawat baja, bundel tulangan, tendon, atau bundel tendon prategang

Tujuan digunakannya agregat dalam campuran beton sebagai berikut:

1. Menghemat penggunaan semen *Portland*.
2. Menghasilkan kekuatan besar pada beton.
3. Mengurangi penyusutan pada perkerasan beton.
4. Menghasilkan beton padat bila gradasi agregat cukup baik.
5. Menghasilkan sifat mudah dikerjakan (*workability*) pada adukan beton dengan gradasi yang baik.

Dari ukurannya agregat diklasifikasikan menjadi 2 jenis, yaitu:

## 1. Agregat Halus

Sesuai dengan SNI 1970:2008, agregat halus merupakan pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butiran lebih kecil dari 4,75 mm (No.4). Berdasarkan ASTM C 125-03 “*Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*” agregat halus adalah agregat yang lolos saringan 4,75 mm (No. 4) dan tertahan pada saringan 75 mm (No. 200). Dilihat dari sumbernya agregat halus (pasir) dalam campuran beton menggunakan pasir yang berasal dari galian tambang (*quarry*) ataupun sungai.

Untuk mendapatkan kualitas beton yang baik, pasir yang digunakan harus memenuhi persyaratan tertentu. Agregat halus (pasir) sebaiknya berbentuk butiran tajam, keras dan kekal. Dalam pasir tidak boleh terdapat banyak kandungan lumpur dan bahan organiknya karena dapat menurunkan kekuatan beton. Agregat halus sebagai material pembentuk mortar, bersama semen dan air digunakan untuk mengikat agregat kasar menjadi satu kesatuan yang padat dan kaku.

Persyaratan agregat halus yang baik sebagai material konstruksi terdapat dalam SK SNI S-04-1989-F, sebagai berikut:

- a. Butiran agregat halus harus tajam dan keras dengan indeks kekerasan kurang dari 2,2.
- b. Bersifat kekal, artinya tidak hancur karena pengaruh cuaca.
  - 1) Apabila diuji dengan cairan natrium sulfat bagian hancur maksimal 12%,
  - 2) Apabila diuji dengan garam magnesium sulfat bagian hancur maksimal 18%.
- c. Kandungan lumpur dalam agregat halus (pasir) tidak boleh lebih dari 5% jika lebih dari itu maka pasir harus dicuci.

- d. Pasir tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak, pembuktian dilakukan dengan percobaan warna menggunakan larutan NaOH 3% dengan hasil warna larutan diatas endapan pasir tidak berwarna gelap dibanding warna standar atau warna pembanding.
- e. Variasi/ragam butiran pasir memiliki modulus kehalusan antara 1,5 sampai 3,8 sesuai standar gradasi.
- f. Agregat halus (pasir) dari laut tidak boleh digunakan, kecuali dengan petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan bangunan yang diakui.

## 2. Agregat Kasar

Sesuai dengan SNI 1969:2008, agregat kasar yaitu kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm (No. 4) sampai 40 mm (No. 1½ inci). Sesuai dengan *British Standar* (B.S), gradasi agregat kasar yang baik masuk ke dalam batas-batas yang telah disyaratkan, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas Agregat Kasar Menurut *British Standard* (B.S)

Lubang ayakan (mm)	Persen butir lewat ayakan, besar butir maksimum		
	40 (mm)	20 (mm)	12,5 (mm)
40	95 – 100	100	100
20	30 – 70	95 – 100	100
12,5	-	-	90 – 100
10	10 – 35	25 – 55	40 – 85
4,8	0 - 5	0 -10	0 - 10

(Sumber: *British Standard*)

Persyaratan agregat kasar (kerikil/batu pecah) yang baik sebagai material konstruksi terdapat dalam SK SNI S-04-1989-F, sebagai berikut:

- a. Butiran agregat kasar harus keras dan tidak berpori.
- b. Butiran agregat kasar yang berbentuk pipih hanya boleh sebanyak 20% berat butir agregat keseluruhan.
- c. Bersifat kekal, artinya agregat kasar tidak hancur karena pengaruh cuaca.
- d. Kandungan lumpur dalam agregat kasar (kerikil/batu pecah) tidak boleh lebih dari 1% jika lebih dari itu maka pasir harus dicuci sebelum digunakan.
- e. Agregat kasar tidak boleh mengandung bahan-bahan yang reaktif terhadap alkali karena dapat merusak beton.
- f. Butiran agregat kasar memiliki modulus kehalusan antara 6,0 sampai 7,1.

### 2.2.3 Air

Air adalah unsur yang sangat penting dalam produksi beton. Air merupakan komponen yang dapat berfungsi sebagai pereaksi kimia antara pasta semen dan agregat (kasar dan halus), sehingga dapat membentuk suatu ikatan kimia antar bahan penyusun beton. Air tidak hanya berfungsi sebagai bahan pereaksi, tetapi juga berperan sebagai bahan pelumas antar butiran agregat sehingga lebih mudah dalam pengerjaan dan pemadatan. Agar dapat bereaksi dengan semen, hanya diperlukan air sebesar 25% dari berat semen. Fungsi lain dari air yaitu sebagai bahan perawatan beton (*curing*) dengan cara membasahi seluruh struktur yang telah dilakukan pengecoran (Tjokrodimuldjo, 2007).

Air yang digunakan untuk campuran atau perawatan harus bersih dan bebas dari minyak, garam, asam, bahan nabati, lanau, lumpur atau bahan-bahan lain yang dalam jumlah tertentu dapat membahayakan. Air harus berasal dari sumber yang telah terbukti baik dan memenuhi persyaratan yang ditentukan. ASTM C 1602 (2006), menyebutkan

persyaratan kandungan zat kimia yang ada dalam air dengan batasan maksimum dalam adukan beton, dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia yang Ada dalam Air

No	Kandungan Unsur Kimia	Konsentrasi Maksimum (ppm)
1	Chlorida (Cl)	
	Untuk Beton Prategang	500
	Untuk Beton Bertulang	1.000
2	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	3.000
3	Alkali (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O)	600
4	Total Solid	50.000

(Sumber: ASTM C 1602, 2006)

## 2.3 Landasan Teori

### 2.3.1 Balok Beton

Balok merupakan bagian dari struktural sebuah bangunan yang memikul beban-beban yang bekerja secara horizontal, balok akan menghubungkan satu kolom dengan kolom lainnya yang dirancang untuk menanggung beban pelat lantai kemudian beban yang terjadi didistribusikan ke kolom. Balok merupakan salah satu komponen struktur bangunan yang kaku (Setiawan, 2016). Pada umumnya balok dicetak secara monolit dengan pelat lantai, sehingga akan membentuk balok penampang T pada balok interior dan balok penampang L pada balok tepi. Balok dikenal sebagai elemen lentur, yaitu elemen struktur yang dominan memikul gaya dalam berupa momen lentur dan gaya geser.

Balok menurut letak dan fungsinya terdiri dari dua tipe yaitu balok induk dan balok anak. Balok induk merupakan balok yang menghubungkan antar kolom dan memiliki dimensi yang besar yang

berfungsi sebagai penerima beban dari pelat lantai dan beban terpusat dari reaksi balok anak, sedangkan fungsi balok anak untuk mengurangi beban lendutan dari pelat lantai, yang biasanya dimensinya lebih kecil dari balok induk.

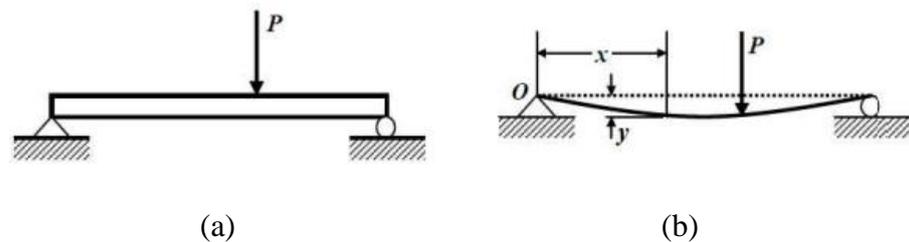
### 2.3.2 Deformasi Beton

Deformasi beton adalah perubahan bentuk atau dimensi beton sebagai akibat dari beban atau gaya yang bekerja pada struktur beton tersebut. Deformasi timbul tidak hanya dari pembebanan vertikal, tetapi juga dari perlakuan yang berbeda dari balok atau batang. Sedangkan defleksi atau lendutan merujuk pada perubahan bentuk yang terjadi pada balok karena beban vertikal yang diterapkan pada batang balok. Selain itu, deformasi pada balok dapat mengubah bentuk dan ukuran balok, sedangkan defleksi hanya mengubah bentuk (lendutan) pada balok. Penjelasan tentang deformasi pada balok yaitu berdasarkan defleksi balok dari posisi awal sebelum mengalami pembebanan. Pengukuran defleksi dimulai dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah deformasi (Basori dkk., 2015). Pemeriksaan defleksi atau kelenturan memiliki peranan yang sangat penting dalam pengujian material untuk mengetahui sejauh mana benda uji dapat melentur saat dikenakan beban. Hal ini sangat penting dalam perancangan bidang konstruksi bangunan, karena dapat menciptakan konstruksi yang kuat dan mampu menahan beban sesuai dengan desain yang telah direncanakan.

Menurut Frick (2003), pada suatu konstruksi batang defleksi dapat ditentukan sebagai bidang atau diagram momen  $\bar{M}$  oleh beban diagram momen  $M_0$  yang direduksi dengan  $-1/EI$ . Garis elastis menjadi garis sisi diagram momen  $\bar{M}$  itu. Garis elastis adalah garis sumbu suatu batang yang lurus, yang akan melengkung oleh pengaruh gaya atau momen yang membebaninya.

Menurut Soefiawati dan Bie (1987), struktur beton diberi beban bertahap sampai mencapai tegangan maksimum. Bila tegangan yang diberikan pada beton masih dalam batas elastisnya maka akan terjadi deformasi elastis. Sedangkan, beton yang diberi tegangan lebih besar dari tegangan elastisnya maka akan mengalami deformasi in-elastis. Saat merencanakan elemen konstruksi, perhitungan defleksi dan tegangan ketika diberi beban harus diperhatikan. Hal tersebut sangat penting, terutama dalam segi kekuatan dan kekakuan. Dalam hal ini batang horizontal yang diberi beban lateral akan mengalami lendutan.

Defleksi dan tegangan pada elemen yang dibebani harus berada dalam batas yang diizinkan, apabila melebihi batas yang diizinkan maka elemen tersebut atau elemen lainnya akan rusak. Defleksi balok dapat diartikan sebagai jarak perpindahan  $y$ . Untuk menerapkan konsep ini, terkadang perlu menentukan defleksi pada setiap nilai  $x$  di sepanjang bentang balok. Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral disebut sebagai kurva elastis dari balok (Basori dkk., 2015).



(Sumber: Basori dkk., 2015)

Gambar 2. Mekanisme defleksi pada balok beton: (a) Balok sebelum terjadi deformasi, (b) Balok setelah terjadi deformasi.

### 2.3.3 Faktor Penyebab Deformasi

Menurut Soefiawati dan Bie (1987), beton merupakan material yang memiliki sifat elastis bila diberi beban dalam durasi yang singkat. Regangan yang terjadi pada saat ini masih mempunyai sifat elastis, yang berarti bila beban dihapuskan maka struktur akan kembali seperti

semula. Regangan yang terjadi pada beton yang diberi beban tetap secara terus menerus akan meningkat perlahan-lahan sejalan dengan waktu, ini disebabkan sebagian karena rangkak (*creep*) dan sebagian karena susut (*shrinkage*). Regangan tersebut semakin lama akan bersifat tidak elastis, karena adanya pertumbuhan produk hidrasi pada beton yang menyebabkan beton mengeras. Seringkali masalah rangkak dihubungkan dengan susut, secara teori keduanya dapat dibedakan, namun secara praktis keduanya sulit dibedakan karena rangkak dan susut terjadi secara bersamaan dan memberikan efek yang sama pada beton. Efeknya yaitu deformasi beton seiring berjalannya waktu. Rangkak dan susut adalah fenomena yang berbeda dan tidak saling ketergantungan. Rangkak bergantung pada beban yang diberikan pada struktur beton, sedangkan susut tidak.

Deformasi dipengaruhi oleh beberapa hal, sebagai berikut:

1. Kekakuan batang, semakin kaku batang maka akan semakin kecil lendutan yang dihasilkan.
2. Besar kecilnya gaya yang diberikan, apabila gaya yang diterima batang besar maka lendutan yang terjadi akan semakin besar begitu juga sebaliknya, artinya lendutan batang berbanding lurus dengan gaya yang diberikan pada batang.
3. Jenis tumpuan, total dan arah reaksi berbeda-beda pada setiap jenis tumpuannya; sehingga penggunaan tumpuan yang berbeda mengakibatkan besarnya lendutan yang tidak sama. Semakin banyak gaya maka akan semakin banyak pula reaksi yang terjadi pada tumpuan sehingga lendutan pada tumpuan akan semakin besar. Besarnya defleksi dari jenis tumpuan yaitu tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (engsel), dan keduanya lebih besar dari tumpuan jepit. Rol merupakan tumpuan yang hanya dapat menerima gaya reaksi vertikal. Jenis tumpuan ini mampu melawan gaya-gaya dalam suatu garis aksi yang spesifik. Engsel merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertikal dan gaya reaksi

horizontal. Tumpuan yang berpasak ini mampu melawan gaya yang bekerja dalam setiap arah dari bidang. Sedangkan jepit merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertikal, gaya reaksi horizontal dan momen akibat jepitan dua penampang. Tumpuan jepit ini mampu melawan gaya dalam setiap arah dan juga mampu melawan suatu kopel atau momen.

4. Jenis beban pada batang, beban merata dan beban terpusat mempunyai kurva defleksi yang berbeda. Pada beban merata defleksi paling besar cenderung terjadi pada pertengahan rentang bentang. Sedangkan pada beban terpusat defleksi hanya terjadi pada titik dimana beban bekerja. Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Jasron (2015), diperoleh hasil bahwa defleksi terbesar terjadi di titik tengah setiap bentangnya dan disimpulkan bahwa semakin jauh letak beban dari tumpuan maka semakin besar momennya. Elemen struktur balok harus cukup kuat menahan beban yang bekerja yang menyebabkan batang melentur melebihi batas yang diizinkan.

#### A. *Creep* (Rangkak)

Rangkak beton merupakan tambahan nilai regangan yang terdapat pada beton yang mengalami tegangan terus-menerus. *Creep* diukur mulai dari adanya tegangan elastis hingga regangan yang terjadi pada durasi tertentu. Pada konstruksi yang sesungguhnya, beton mengalami deformasi secara terus-menerus akibat menahan berat sendiri beton. Oleh karena itu *creep* terjadi selama masa layan konstruksi tersebut. Secara praktik, ketika koefisien rangkak beton meningkat maka regangan akan bertambah, tetapi peningkatan regangan akan berkurang seiring waktu. Rangkak adalah fenomena yang sangat beragam. Wijaya dan Supartono (2020), menyebutkan terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi deformasi rangkak, sebagai berikut:

1. Tipe, komposisi bahan dasar seperti jenis semen yang digunakan, persentase agregat kasar dan halus.
2. Perbandingan *water cement ratio*.
3. Kelembapan relatif di sekeliling struktur beton.
4. Temperatur *curing* atau suhu beton saat pengeringan.
5. Dimensi struktur, perbandingan volume terhadap luas permukaan struktur.
6. Lamanya waktu pembebanan.
7. Nilai slump

Menurut ACI 209.2R-08 metode untuk menghitung nilai rangkak adalah sebagai berikut:

$$Vt = \frac{t^{0,6}}{10+t^{0,6}} \times Vu$$

Keterangan:

- $Vt$  = Koefisien rangkak dalam waktu  $t$  (hari)  
 $t$  = Waktu setelah pengerasan awal  
 $\tau$  = Umur beton saat diberi beban  
 $Vu$  = Koefisien rangkak batas (2,35 KC)  
 $Kc$  = Koefisien koreksi untuk rangkak apabila kondisi diluar standar.

$$Kc = K_{AC} \times K_{RH} \times K_P \times K_S \times K_{AG} \times K_A$$

Keterangan:

- $K_{AC}$  = faktor koreksi akibat umur beton saat pembebanan  
 $K_{AC} = 1,25 \times \tau^{-0.118}$ , untuk *moist cured concrete*  
 $K_{AC} = 1,13 \times \tau^{-0.095}$ , untuk *steam cured concrete*  
 $K_{RH}$  = Faktor koreksi yang dipengaruhi oleh kelembapan relatif dengan nilai  $H$  dalam persen  
 $K_{RH} = 1,27 - 0,0067 \times H$ , untuk  $H > 40\%$   
 $K_P$  = Faktor koreksi yang dipengaruhi rasio penampang (inchi)  
 $K_P = 1,12 - 0,08 \times V/S$

$K_S$  = Faktor koreksi yang dipengaruhi nilai slump beton (mm)

$$K_S = 0,82 + 0,00264 \times S$$

$K_{AG}$  = Faktor koreksi yang dipengaruhi perbandingan agregat halus dengan total agregat (%)

$$K_{AG} = 0,88 + 0,0024 \times \psi$$

$K_A$  = Faktor koreksi yang dipengaruhi oleh kadar udara (%)

$$K_A = 0,46 + 0,09 \times A$$

## B. *Shrinkage* (Susut)

Susut adalah karakteristik dari beton yang menyebabkan penurunan volume beton karena mengurangnya kandungan air akibat hilangnya kelembapan saat proses pengerasan (Nawy, 1998). Susut (*shrinkage*) yang terjadi pada beton segar disebut "*Plastic Shrinkage*", yang terjadi selama proses hidrasi disebut "*Autogeneous Shrinkage*", dan yang terjadi pada saat beton yang telah mengeras disebut "*Drying Shrinkage*". Namun, ada peristiwa khusus pada *drying shrinkage* yaitu ketika semen yang sudah mengalami hidrasi bereaksi dengan karbon dioksida ( $CO_2$ ) di udara, peristiwa ini disebut "*Carbonation Shrinkage*".

Nilai susut dilambangkan dengan  $\varepsilon_{sh}$  (regangan susut). Susut disebabkan oleh banyak faktor, antar lain:

1. Kadar air agregat.
2. Faktor air semen
3. Dimensi struktur
4. Kondisi lingkungan
5. Penulangan
6. Jenis semen

Menurut ACI 209.2R-08 metode untuk menghitung nilai susut adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{t}{35+t} \times \varepsilon_{shu}; \text{ untuk } t \text{ setelah 7 hari}$$

$$\varepsilon_{sh} = \frac{t}{55+t} \times \varepsilon_{shu}; \text{ untuk } t \text{ setelah 1-3 hari}$$

dengan  $\varepsilon_{sh}$  = Regangan susut batas;  $780 \times 10^{-6}$ .  $K_{sh}$  (in/in). Untuk kondisi diluar standart maka harus dikali dengan faktor koreksi.

$$K_{sh} = K_{RH} \times K_P \times K_S \times K_{PC} \times K_{AG} \times K_A$$

Keterangan:

$K_{RH}$  = Faktor koreksi akibat kelembapan relatif (%)

$$K_H = 1,4 - 0,0102 \times H, \text{ untuk } H \text{ antara } 40\% - 80\%$$

$$K_H = 3 - 0,030 \times H, \text{ untuk } H \text{ antara } 80\% - 100\%$$

$K_P$  = Faktor koreksi akibat rasio penampang (mm)

$$K_P = 1,2 \times \exp(-0,00472 \times V/S)$$

$K_S$  = Faktor koreksi akibat nilai slump beton (mm)

$$K_S = 0,89 + 0,00161 \times S1$$

$K_{PC}$  = Faktor koreksi akibat kandungan semen ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$$K_{PC} = 0,75 + 0,00061 \times c$$

$K_{AG}$  = Faktor koreksi akibat perbandingan agregat halus dengan total agregat (%)

$$K_{AG} = 0,3 + 0,014 \times \psi, \text{ untuk } \psi < 50\%$$

$$K_{AG} = 0,9 + 0,002 \times \psi, \text{ untuk } \psi > 50\%$$

$K_A$  = Faktor koreksi akibat kadar udara

$$K_A = 0,95 + 0,008 \times A$$

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Niken, dkk (2013), metode menghitung nilai susut untuk HPC (*High Performance Concrete*) adalah:

$$\varepsilon_{sh} = \left[ \frac{t}{C+t^\alpha} \times \varepsilon_{(sh)u} \right]^P$$

Keterangan:

$\varepsilon_{sh}$  = Regangan susut

$\varepsilon_{(sh)u}$  = Regangan susut ultimit,  $587 \times 10^{-6}$  untuk HPC tanpa *fly*

- ash* dan  $499 \times 10^{-6}$  untuk HPC dengan *fly ash*
- t = Waktu setelah *curing*
- C = 50 untuk HPC tanpa *fly ash*; 45,2 untuk HPC dengan *fly ash*
- A = 0,98 untuk HPC tanpa *fly ash*; 0,992 untuk HPC dengan *fly ash*
- P = 1 untuk HPC tanpa *fly ash*; 1,009 untuk HPC dengan *fly Ash*

#### 2.3.4 Kuat Tekan

Kuat tekan diukur dengan pembebanan benda uji silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, dengan pengukuran dalam satuan MPa ( $\text{N/mm}^2$ ) sesuai dengan standar SK SNI 1991. Kekuatan tekan beton akan meningkat seiring dengan naiknya umur beton jadi dapat dikatakan bahwa kuat tekan merupakan salah satu parameter mutu beton. Untuk mengetahui kekuatan beton, perlu dilakukan pengujian kuat tekan pada sampel silinder beton yang berumur 28, 56 dan 90 hari. Sampel tersebut akan diberi beban tekan menggunakan alat CTM (*Compression Testing Machine*) dan *Hammer Test*. Rumus kuat tekan beton yaitu:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

- $f'c$  = Kuat tekan beton (MPa)
- P = Beban maksimum (N)
- A = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )

Dengan rumus di atas maka dapat disimpulkan kuat tekan adalah besaran beban persatuan luas penampang yang dapat di pikul oleh benda uji sampai benda uji hancur dan tidak dapat menahan penambahan beban lagi sehingga menghasilkan nilai kekuatan beban maksimum.

## 2.4 Penelitian Sebelumnya

### 2.4.1 Deformasi Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

Terdapat beberapa penelitian terdahulu terkait dengan deformasi beton yang disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Deformasi Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

No	Penulis (tahun)	Intisari
1	Murison <i>et al.</i> (2022)	Tiang bor beton bertulang dipasang pada profil tanah liat yang luas di dekat Vredefort, Afrika Selatan. Setiap tiang pancang dilengkapi dengan 6 pengukur regangan kawat getar (VWSG) dan 20 kisi-kisi serat Bragg (FBG). Panjang pengukur VWSG 150 mm dan FBG 8 mm. Studi ini membandingkan distribusi momen lentur yang ditentukan dengan menggunakan dua jenis pengukur regangan. FBG memberikan hasil yang serupa dengan pengukur kawat getar ketika mengukur regangan tarik, namun regangan tekan kurang dari yang diperkirakan. Karena jarak yang lebih dekat, distribusi regangan yang ditentukan dari kisi-kisi Bragg mengilustrasikan detail yang lebih besar dari regangan lokal di mana retak terjadi pada sisi tegangan tiang pancang. <b>FBG melaporkan regangan tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan VWSG. Pembacaan regangan tekan VWSG secara konsisten lebih dari 20% lebih besar daripada pembacaan FBG. Penginderaan serat optik disarankan sebagai pilihan yang lebih cocok untuk pemantauan kesehatan struktur. VWSG dianggap lebih cocok untuk pemodelan fisik skala besar dari struktur prototipe.</b>
2	Sahusilawane dan Frans (2021)	Penyelidikan defleksi telah dilakukan sebelum tahun 1970-an dan analisisnya memberikan batasan tegangan beton sekitar 45% dari kekuatan tekannya dan tegangan baja 50% dari kekuatan lelehnya pada balok beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku <b>defleksi balok beton tulangan sistem rangka</b> dengan jarak spasi seperdua dari tinggi efektif balok dilakukan secara ekeperimental laboratorium dengan rancangan benda uji sebanyak 6 buah yang terdiri dari 3 balok normal (BN) sebagai balok variabel kontrol dan 3 balok tulangan sistem rangka dengan jarak spasi 0,50d (BTR50) sebagai variabel bebas. Data dianalisis menggunakan metode kekuatan. <b>Hasil penelitian adalah perilaku defleksi</b>

Tabel 4. (Lanjutan)

No	Penulis (tahun)	Intisari
		<b>balok beton tulangan sistem rangka dengan jarak spasi 0,5d dari tinggi efektif balok mempunyai kemampuan layan lebih baik dan meningkatkan kapasitas lentur balok Mu hingga 7,47% serta dapat mengurangi besar lendutan dari balok BN.</b>
3	Syahputra (2021)	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai deformasi, tegangan dan regangan balok beton dengan campuran abu sekam padi, serbuk cangkang telur, serat kelapa, <i>fly ash</i> , dan serbuk cangkang sawit dengan software elemen hingga. Metode yang digunakan yaitu pengujian secara simulasi untuk mewakili pengujian eksperimen dan membuat perbandingan dalam membuat penelitian dengan menggunakan software elemen hingga. Didapat hasil dari simulasi deformasi balok beton dengan 5 <i>filler</i> bahwa balok beton yang menggunakan <i>filler fly ash</i> dan serbuk kaca hanya berdeformasi sebesar 6,31 mm akibat gaya aksial sebesar 500 KN. Sedangkan <b>deformasi yang paling besar adalah balok beton dengan filler serabut tempurung kelapa sebesar 10,88 mm akibat gaya aksial yang sama.</b>
4	Prasetyo (2020)	Salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya kapasitas lentur balok adalah mekanisme bond antara tulangan dengan matriks beton dimana mekanisme bond terbentuk dari adanya adhesi, friksi dan <i>interlocking</i> . Penggunaan tulangan plat baja yang dipuntir pada penelitian bertujuan untuk meningkatkan kapasitas <i>interlocking</i> antara tulangan dengan matriks beton untuk memperkecil terjadinya <i>bondslip</i> , sehingga memperkecil defleksi dan lentur. <b>Metode yang digunakan pada penelitian meliputi pengujian kuat tekan beton dan kuat tarik belah beton pada sampel beton silinder berukuran 150 x 300 mm, pengujian kuat tarik plat baja dengan ukuran 3 x 15 x 400 mm, pengujian <i>pull out</i> dengan plat baja ukuran 3 x 15 x 1000 mm yang dipuntir 0, 3, 4, 5, dan 6 kali yang ditanam pada silinder beton dengan panjang penyaluran 300 mm, dan pengujian lentur murni berukuran 100 x 150 x 1000 mm dengan masing-masing balok menggunakan 2 buah tulangan puntir plat baja segi empat.</b> Hasil pengujian menunjukkan bahwa defleksi hasil uji kurang dari defleksi hasil perhitungan secara analitis. Sedangkan besar kapasitas momen hasil uji lebih besar dari kapasitas momen hasil perhitungan analitis dan terus bertambah seiring dengan penambahan jumlah puntiran pada plat. <b>Kesimpulannya bahwa variabel</b>

Tabel 4. (Lanjutan)

No	Penulis (tahun)	Intisari
		<p><b>jumlah puntiran pada plat baja segi empat sebagai tulangan berpengaruh signifikan terhadap kapasitas <i>interlocking</i>, momen, dan lentur balok. Penggunaan tulangan puntir plat baja segi empat dapat meningkatkan kapasitas momen dan <i>interlocking</i> balok namun mengurangi defleksi.</b></p>
5	Niken (2019)	<p>Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan perbedaan susut usia dini antara balok dengan skala laboratorium dan skala penuh. Digunakan beton mutu tinggi dengan <b>kuat tekan 60 MPa</b>. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Indonesia selama 24 jam menggunakan <b>tipe semen OPC. Tiga buah benda uji berukuran laboratorium 150 mm 150 mm x 600 mm, dan satu buah benda uji berukuran 200 mm 600 mm x 3000 mm sebagai benda uji skala penuh.</b> Semua spesimen ditutup <i>styrofoam</i> untuk mengurangi penguapan. Penyusutan usia awal diperoleh dengan menggunakan pengukur regangan kawat getar tertanam untuk setiap spesimen ukuran laboratorium dan empat pengukur regangan kawat getar tertanam untuk spesimen skala penuh. Hasilnya, jenis penyusutan spesimen skala penuh adalah jenis yang serupa dengan ukuran laboratorium. Penyusutan pada spesimen ukuran laboratorium adalah 31,5% lebih besar daripada spesimen skala penuh. Penyusutan maksimum pada benda uji skala penuh sekitar 0,8E-04 terjadi pada umur beton 15,8 jam, sedangkan pada benda uji ukuran laboratorium sekitar 1.255E-04 terjadi pada umur 22,2 jam. Fluktuasi muai dan susut lebih halus pada benda uji skala penuh dibandingkan dengan benda uji ukuran laboratorium. <b>Deformasi tinggi pada kedua skala spesimen terjadi pada rentang usia 5-9 jam. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa perilaku balok beton mutu tinggi yang sesungguhnya mirip dengan balok ukuran laboratorium.</b></p>
6	Niken dkk. (2018)	<p>Makalah ini menyajikan hubungan antara kelembapan relatif dan suhu sekitar terhadap perilaku deformasi satu sampel pelat beton dengan kuat tekan 60MPa. Penelitian ini dilakukan di Indonesia yang beriklim tropis lembab. <b>Spesimen berukuran 3000 mm × 1600 mm × 150 mm.</b> Perilaku diperoleh dengan menggunakan empat pengukur regangan kawat getar tertanam (EVWSG). Akibatnya ada hubungan yang sangat kuat antara kelembapan dan deformasi pada rentang umur 7 sampai 21 hari. <b>Deformasi terbesar terjadi pada sudut dan fluktuasi deformasi pada posisi samping lebih</b></p>

Tabel 4. (Lanjutan)

No	Penulis (tahun)	Intisari
		<p><b>besar dibanding pada sudut dan tengah.</b> Pengaruh kelembapan relatif sekitar terhadap perilaku beton lebih cepat dan lebih lama dari suhu sekitar. Pengaruh suhu sekitar pada cuaca tropis lembab lebih singkat dibandingkan dengan cuaca tropis tidak lembab.</p>
7	Niken dkk. (2017)	<p>Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan penyebab terjadinya perbedaan deformasi jangka panjang akibat susut antara balok dan kolom beton kinerja tinggi dengan kuat tekan 60 MPa. Penelitian dilakukan secara eksperimental di Indonesia selama 410 hari, digunakan semen jenis OPC. <b>Benda uji berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm, 3 buah untuk balok dan 2 buah untuk kolom.</b> Deformasi diperoleh dengan menggunakan pengukur regangan kawat getar tertanam (EVWSG) pada setiap spesimen. Pengamatan dilakukan tepat setelah penuangan sebagai berikut: 0– 24 jam, setiap 15 menit; 24–48 jam, setiap 60 menit; hari 3–7, setiap 2 jam; dan satu kali setiap hari menggunakan pembacaan. <b>Perbedaan deformasi jangka panjang pada kolom dan balok terletak pada perilaku deformasi autogenousnya.</b> Fenomena ini tidak terjadi pada balok. Pada rentang 1 - 200 hari, perilaku deformasi balok memiliki pola yang mirip dengan perilaku deformasi kolom dengan laju deformasi yang tinggi. Pada hari ke 200–410, deformasi kolom berubah menjadi laju deformasi yang sangat lambat. Deformasi jangka panjang pada kolom lebih rendah (64%) dibandingkan pada balok pada umur 410 hari.</p>
8	Alaydrus dkk. (2016)	<p>Pengujian deformasi pada struktur balok beton bertulang dengan lubang <i>hollow core</i> di tengah balok. <b>Digunakan benda uji balok penampang persegi dengan tiga buah lubang persegi dengan arah memanjang balok di tengah badan balok, panjang bentang balok 2,2 m.</b> Hasil dari penelitian ini adalah berat volume balok beton dengan lubang 5 cm x 10 cm x 60 cm, lubang 7 cm x 10 cm x 60 cm, dan lubang 9 cm x 10 cm x 60 cm berturut-turut mengalami penurunan sebesar 14,10%; 15,17%; dan 18,47% dibanding dengan balok beton tanpa lubang. <b>Deformasi balok beton mengalami naik turun karena beban maksimum yang diterima berbeda. Nilai deformasi pada lubang 7 cm x 10 cm x 60 cm memiliki nilai deformasi paling besar. Nilai rata-rata terbesar deformasi balok beton berlubang 5 cm, 7 cm, dan 9 cm berturut turut sebesar 4 mm; 5,16 mm; dan 3,14 mm.</b></p>

Tabel 4. (Lanjutan)

No	Penulis (tahun)	Intisari
9	Mointi (2014)	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa seberapa besar perbandingan antara lebar dan panjang retak yang terjadi pada elemen struktur balok beton bertulang dan menggambarkan pola pembentukan retak yang terjadi pada balok. <b>Menggunakan benda uji balok beton bertulang tampang empat persegi panjang dengan dimensi 20 cm x 30 cm x 160 cm sebanyak 2 buah dengan tulangan tarik 3 <math>\Phi</math> 12 dan tulangan tekan 2 <math>\Phi</math> 8 sedangkan mutu beton yang direncanakan adalah 40 MPa.</b> Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai balok mengalami keruntuhan. Setiap tahap pembebanan dilihat berapa besar retak yang terjadi pada balok. <b>Hasil penelitian menunjukkan bahwa gambaran pola retak yang terjadi adalah semakin panjang retak pada balok lebar retak yang terjadi semakin kecil hal ini disebabkan karena proses pengukuran retak yang bersifat non struktur cenderung dipengaruhi oleh kekuatan balok pada daerah permukaan saja, sedangkan untuk panjang retak yang pendek dengan lebar retak yang besar cenderung bersifat struktur.</b></p>
10	Niken dkk. (2013)	<p>Makalah ini adalah model empiris susut jangka panjang beton HPC dengan dan tanpa <i>fly ash</i>, penelitian secara eksperimental dengan kuat tekan 60 MPa <b>menggunakan 6 benda uji berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm.</b> Spesimen di <i>curing</i> setelah demoulding dengan cara ditetesi air pada spesimen sampai umur 7 hari, setelah itu spesimen ditempatkan di ruangan ber-AC (suhu <math>28\pm 3^{\circ}\text{C}</math>) dan kelembapan relatif (<math>72\pm 5\%</math>). Pengamatan dilakukan tepat setelah penguangan. Pengamatan retakan menggunakan loop 50 kali lebih besar. Panjang spesimen juga dibaca pada interval 1, 4, 7, 14, dan 28 hari, dan 8, 16, 32, dan 64 minggu. <b>Hasil percobaan menunjukkan bahwa metode ACI 209R dan Eurocode 2 menghasilkan penyusutan yang rendah untuk DB dan TB. Sedangkan metode AS 3600 menghasilkan penyusutan yang rendah untuk DB dan tinggi untuk TB. Perbedaan penyusutan utama antara daerah tropis dan daerah 4 musim adalah: Penyusutan umur dua tahun di daerah tropis masih meningkat secara signifikan, sebaliknya berdasarkan ACI 209R (350 hari) dan AS 3600 (300 hari), penyusutan sudah mencapai nilai tetap masing-masing.</b></p>

### 2.4.2 *Mix Design* Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

Terdapat beberapa penelitian terdahulu terkait dengan *mix design* beton yang disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. *Mix Design* Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

No	Penulis (tahun)	Intisari
1	Kuntari dkk. (2019)	Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan selisih perbandingan jumlah kebutuhan bahan, kuat tekan dan modulus elastisitas beton normal antara metode SNI 03-2834-2000 dan metode SNI 7656:2012 untuk mutu rencana 30 MPa dengan menggunakan dua variasi nilai slump. Benda uji dibuat sebanyak 72 cetakan silinder dengan Ø 15 cm dan tinggi 30 cm. <b>Hasil dari pengujian menunjukkan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas tertinggi menggunakan metode SNI 03-2834-2000 dengan value slump 30-60 mm.</b>
2	Hunggurami dkk. (2019)	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kebutuhan bahan dan kuat tekan beton normal antara metode SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656-2012 dengan menggunakan ukuran agregat kasar maksimum 20 mm dan 40 mm, yang diterapkan pada mutu rencana ( $f_c'$ ) 15 MPa, 20 MPa dan 25 MPa. Metode penelitian yang digunakan adalah pengujian material dan uji tekan pada spesimen silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, pada hari ke 28. <b>Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai kuat tekan pada kedua metode tersebut telah memenuhi mutu rencana, namun metode SNI 03-2834-2000 menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar dari pada metode SNI 7656: 2012.</b>
3	Santoso dkk. (2019)	Pada kajian ini benda uji yang digunakan adalah silinder beton dengan dimensi 150 x 300 mm. Benda uji terdiri dari 2 varian yaitu : beton normal SNI 2000 (BN-00), dan beton normal SNI 2012 (BN-12). Tiap varian terdiri dari 3 spesimen kuat tekan rencana yaitu: 25 MPa, 30MPa, dan 35 MPa. <b>Berdasarkan hasil pengujian didapatkan kuat tekan rerata beton dengan rancangan SNI 2000 berturut-turut sebesar 27,24 MPa, 38,99 MPa, dan 44,85 MPa. Sedangkan tekan rerata beton dengan rancangan SNI 2012 berturut-turut sebesar 31,43 MPa, 36,54 MPa, dan 39,76 MPa.</b>

### 2.4.3 Metode dan Durasi Pencampuran Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

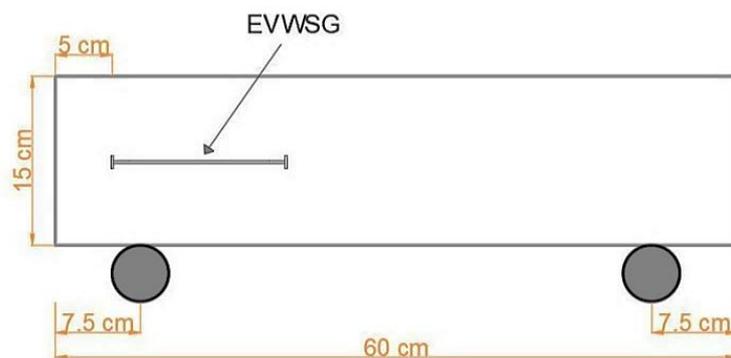
Terdapat beberapa penelitian terdahulu terkait dengan *mix design* beton yang disajikan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Metode dan Durasi Pencampuran Beton Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

No	Penulis (tahun)	Intisari
1	Foulhudan dkk. (2022)	Penelitian ini bertujuan untuk menentukan <i>mix design</i> serta proses pengecoran dengan durasi 11 menit agar menghasilkan kuat tekan optimum. Dua <i>mix design</i> digunakan yaitu berdasar SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012. Proses pengecoran beton dilaksanakan berdasarkan urutan pemasukan material (agregat halus, agregat kasar, dan semen) serta dua cara penambahan air yaitu, di akhir proses pencampuran ( <i>dry mixing</i> ) dan pada setiap proses pencampuran ( <i>wet mixing</i> ). <b>Disimpulkan bahwa kuat tekan optimum beton diperoleh menggunakan <i>mix design</i> SNI 7656:2012 melalui proses pengecoran kerikil dan semen dalam waktu 4 menit, kemudia ditambahkan pasir selama 4 menit, dan ditambahkan air pada akhir langkah (<i>dry mixing</i>) dengan durasi 3 menit.</b>
2	Agus (2018)	Lama pengadukan divariasi sebanyak 4 waktu berbeda yakni 1, 5, 10, dan 15 menit yang mana dari setiap variasi waktu tersebut dilakukan pengujian kuat tekan beton. Pengujian ini dilakukan pada umur perawatan 3 hari, 7 hari dan 28 hari, dengan dimensi benda uji silinder 15 cm x 30 cm, setiap perbandingan di buat dengan 9 benda uji dimana jumlah keseluruhan sebanyak 36 benda uji. <b>Berdasarkan nilai kuat tekan yang memenuhi kuat tekan yang direncanakan 190 kg/cm<sup>2</sup> atau 19 MPa terdapat pada lama waktu pencampuran 5 menit.</b>
3	Shihada and Arafa	Pada penelitian ini menggunakan silica fume, bubuk kuarsa sebagai agregat sangat halus, dan urutan prosedur pencampuran untuk mengetahui pengaruh terhadap sifat utama dari ultra HPC. <b>Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengecoran dengan urutan mencampur semua material kering (semen, agregat halus, agregat kasar, agregat sangat halus, dan silica fume) kemudian ditambahkan air dengan 40% superplastisizer setelah itu didiamkan 3 menit lalu ditambahkan 60% superplastisizer mendapatkan hasil kuat tekan tertinggi.</b>

### III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung dengan menggunakan 3 benda uji balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm sesuai ASTM C 78-08 (*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete – Using Simple Beam with Third-Point Loading*) yang diletakkan di atas dua buah tumpuan yang dipasang pada 7,5 cm dari ujung benda uji. Penelitian menggunakan satu buah pengukur regangan tertanam kawat getar yang disebut EVWSG (*Embedded Vibrating Wire Strain Gauge*) dengan panjang 153 mm pada setiap benda uji. Posisi EVWSG berada pada 5 cm dari ujung benda uji. Skema dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema benda uji balok dengan EVWSG.

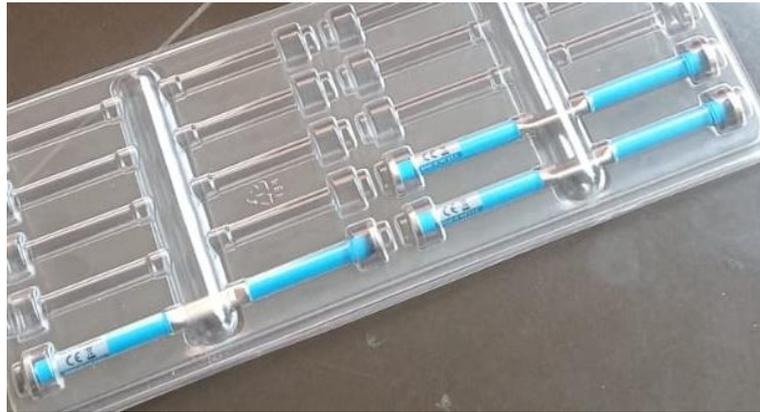
#### 3.1 Persiapan Alat dan Bahan

Dalam melakukan penelitian ini, perlu dilakukan terlebih dahulu persiapan seluruh peralatan dan bahan yang akan digunakan. Alat dan bahan yang dibutuhkan adalah:

## 1. Alat

### a. EVWSG (*Embedded Vibrating Wire Strain Gauge*)

EVWSG digunakan sebagai pengukur perubahan regangan terhadap waktu yang dipasang pada setiap spesimen. EVWSG mampu mendeteksi regangan hingga  $3000 \mu\epsilon$  dengan akurasi sekitar 0,025% dan suhu beton antara  $-80^{\circ}\text{C}$  dan  $60^{\circ}\text{C}$  dengan akurasi sekitar 0,5%. EVWSG yang digunakan adalah tipe Geokon 4200.



Gambar 4. Alat EVWSG.

### b. *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.



Gambar 5. Alat *vibrating wire readout*.

c. Termometer *hygrometer*

Termometer ini digunakan untuk mengukur temperatur dan kelembapan relatif atau *relatif humidity* (RH) di sekeliling beton.



Gambar 6. Alat termometer *hygrometer*.

d. Termometer air

Termometer air digunakan untuk mengukur suhu air saat proses perawatan (*curing*). Pada penelitian ini digunakan termometer tipe TP300.



Gambar 7. Alat termometer air.

e. *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.

f. 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.

g. Papan penyangga

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

h. Kaca pembesar

Kaca pembesar adalah alat optik yang digunakan untuk memperbesar suatu benda atau obyek. Dalam penelitian ini digunakan kaca pembesar 45x untuk mengamati keretakan pada benda uji.

i. *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.

j. *Hammer test*

*Hammer test* adalah metode pengujian kuat tekan beton dengan alat berbentuk *hammer* untuk mengukur kekerasan permukaan beton. Prinsipnya adalah memberikan tumbukan pada beton dengan massa yang diaktifkan oleh energi tertentu, dan mengukur jarak pantulan massa untuk memperkirakan kekerasan permukaan beton.

k. 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.

l. 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.

m. 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*. Untuk ukuran kerucut 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 60 cm.

n. Meteran/penggaris

Alat ini digunakan untuk mengukur tinggi *slump test* pada pengujian *slump test* beton.

o. 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 daya sebesar 2800 Watt.

p. Piknometer

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

q. *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 m<sup>3</sup> yang memiliki kecepatan 20-30 putaran per menit.

r. Cetakan kerucut pasir

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

s. 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.

t. Bak perendam

Bak perendam adalah alat yang digunakan saat proses perawatan beton. Hal ini dilakukan untuk menjaga kelembapan beton agar beton tidak cepat kehilangan air.

u. Alat bantu

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

2. Bahan

a. Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Semen berfungsi sebagai pengikat butiran agregat dan mengisi ruang antar agregat sehingga terbentuk massa yang padat. Semen yang digunakan dalam pembuatan beton ini adalah semen jenis PCC dengan merek Tiga Roda. Semen ini diperoleh dari toko dengan keadaan tertutup dalam kemasan berukuran 50 kg per zag.

b. 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.

c. 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 pada penelitian ini yaitu pasir yang berasal dari daerah Gunung Sugih, Lampung Tengah.

d. Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Air yang digunakan harus 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.

### 3.2 Pemeriksaan Material

Pada penelitian ini dilakukan pemeriksaan material pada agregat kasar, agregat halus dan semen. Data-data yang didapat kemudian disesuaikan dengan syarat ASTM yang ada. Data yang didapat dari hasil pemeriksaan material tersebut digunakan untuk perhitungan *mix design* beton.

Pada agregat halus dilakukan pengujian, sebagai berikut:

1. Kadar air agregat halus (ASTM C 566-78)
2. Berat jenis dan penyerapan agregat halus (ASTM C 128-98)
3. Kadar lumpur agregat halus (ASTM C 117-80)
4. Kandungan zat organis agregat halus (ASTM C 40-92)
5. Pengujian gradasi agregat halus (ASTM C 33-93)
6. Berat volume agregat halus (ASTM C 29)

Pada agregat kasar dilakukan pengujian, sebagai berikut:

1. Kadar air agregat kasar (ASTM C 556-78)
2. Berat jenis dan penyerapan agregat kasar (ASTM C 127-88).
3. Gradasi agregat kasar (ASTM C 33-93)
4. Berat volume agregat kasar (ASTM C 29)

Pada semen dilakukan pengujian, sebagai berikut:

1. Berat jenis semen (ASTM C 188-95)

2. Waktu pengikatan awal semen (ASTM C 191-08)
3. Kehalusan semen (ASTM C 430)

### 3.3 Hasil Pengujian *Properties Material*

Pengujian pada material bertujuan untuk mengetahui data fisik material yang akan digunakan pada campuran beton. Adapun pengujian material diantaranya kadar air, berat jenis, penyerapan, gradasi, berat volume, kadar lumpur, dan kandungan zat organis. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk perhitungan *mix design*. Hasil pengujian dan perhitungan material dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Material Penyusun Beton

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	2,51 %	2,0 – 2,9
	Agregat Kasar	2,66	2,5 – 2,9
	Semen PCC	2,91	3,0 – 3,2
Penyerapan	Agregat Halus	1,03 %	1 – 3 %
	Agregat Kasar	2,22 %	1 – 3 %
Modulus	Agregat Halus	2,97	2,3 – 3,1
Kehalusan	Agregat Kasar	6,66	6 – 8
Berat Volume	Agregat Halus	1535 kg/m <sup>3</sup>	-
	Agregat Kasar	1537,90 kg/m <sup>3</sup>	-
Kadar Lumpur	Agregat Halus	2,67 %	< 5 %
Kandungan Zat Organik	Agregat Halus	Nomor warna 2	< Nomor warna 3
Waktu Pengikatan Awal Semen	Semen PCC	138 menit	> 60 menit
Kehalusan Semen	Semen PCC	Saringan No. 100 = 0 %	0 %
		Saringan No. 200 = 16,2 %	< 22 %

Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 7, maka dapat dikatakan bahwa material penyusun beton yang digunakan telah memenuhi standar ASTM sehingga dapat digunakan sebagai campuran beton.

### 3.4 Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Pada perancangan campuran beton ini dilakukan dengan menggunakan metode SNI 03-2834-2000 yang kemudian komposisinya disesuaikan dengan syarat yang sesuai dengan metode SNI. Rencana campuran antara semen, air dan agregat sangat penting untuk mendapatkan kekuatan beton yang diinginkan. Kekuatan beton yang direncanakan adalah kuat tekan ( $f'c$ ) = 20,75 MPa atau K-250.

### 3.5 Pembuatan Sampel Benda Uji

Setelah perancangan campuran yang sesuai diperoleh, selanjutnya dilakukan pembuatan sampel benda uji. Penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu uji kuat tekan dengan *Hammer test* dan CTM serta deformasi pada balok. Benda uji yang akan dibuat berupa silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm sebanyak 9 sampel serta balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm berjumlah 6 sampel untuk uji kuat tekan sebanyak 3 sampel dan untuk pengujian deformasi sebanyak 3 sampel yang akan diamati selama 90 hari. Kode benda uji kuat tekan dan deformasi balok dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Jumlah dan Kode Benda Uji Kuat Tekan

Benda Uji	Kode benda uji			Jumlah
Kuat Tekan dengan CTM	KTC 1	KTC 2	KTC 3	9
Kuat Tekan dengan <i>Hammer Test</i>	KTH 1	KTH 2	KTH 3	3
	Jumlah			12

Tabel 9. Jumlah dan Kode Benda Uji Deformasi Kembang Susut

Jenis pengamatan	Kode benda uji		
Kembang Susut 24 Jam Pertama	KS.BC 1	KS.BC 2	KS.BC 3
Kembang Susut saat Curing	KS.DC 1	KS.DC 2	KS.DC 3
Kembang Susut Setelah Curing	KS.AC 1	KS.AC 2	KS.AC 3
Suhu dalam Beton 24 Jam Pertama	TI.BC 1	TI.BC 2	TI.BC 3
Suhu dalam Beton saat Curing	TI.DC 1	TI.DC 2	TI.DC 3
Suhu dalam Beton Setelah Curing	TI.AC 1	TI.AC 2	TI.AC 3
Jumlah	1	1	1

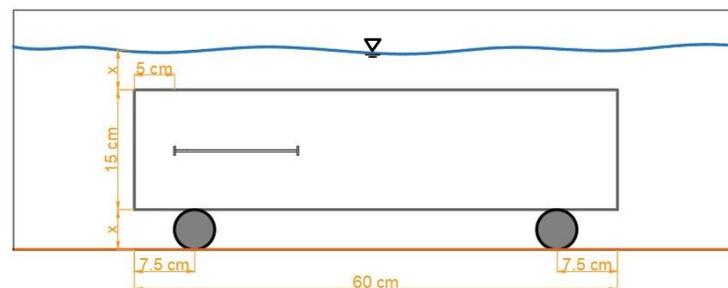
### 3.6 Pengujian *Workability* Beton Segar

Pada saat beton dalam kondisi segar diuji kelecakannya dengan menggunakan *slump test*. Menurut SK SNI M-12-1989-F, tahapan pelaksanaan pengujian nilai *slump test* sebagai berikut:

1. Kerucut abrams bagian dalam dan bagian luar dibersihkan dengan air.
2. Cetakan kerucut diletakkan di atas pelat baja.
3. Adonan beton dimasukkan hingga 1/3 tinggi kerucut kemudian dipadatkan dengan cara menumbuknya menggunakan tongkat besi ujung bulat sebanyak 25 kali, dengan memegang kaki kerucut kuat-kuat.
4. Adonan selanjutnya dimasukkan sampai dua lapis berikutnya dan dipadatkan dengan cara yang sama seperti sebelumnya sampai cetakan terisi penuh, pada bagian atas diratakan dengan sendok semen.
5. Cetakan diangkat perlahan-lahan tegak lurus ke atas.
6. Penurunan yang terjadi diukur dari tinggi mula-mula, besar penurunan ini disebut nilai *slump test*.

### 3.7 Perlakuan Benda Uji

Tepat setelah dilakukan pengecoran, benda uji ditutup menggunakan *styrofoam* untuk menghilangkan penguapan air. Setelah benda uji dituang kedalam cetakan selama 24 jam, benda uji dibuka dan direndam di dalam bak air tawar sampai umur 7 hari dengan posisi seperti balok. Tinggi air perendaman pada bagian atas sebaiknya sama dengan tinggi tumpuan yang dibuat. Diharapkan terjadi keseimbangan antara gaya tarik ke atas dan gaya tekan pada beton sehingga mekanisme balok tetap terjaga. Skema penempatan benda uji saat *curing* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Skema penempatan benda uji saat *curing*.

Hal ini dilakukan untuk menjamin proses hidrasi dapat berlangsung dengan baik dan proses pengerasan terjadi dengan sempurna sehingga tidak terjadi retak-retak pada beton dan mutu betonnya dapat terjamin. Setelah itu benda uji ditempatkan diruangan khusus dan terlindung yang jarang dilewati oleh orang lain agar pengamatan tidak terganggu. Sebaiknya benda uji tidak berpindah ruangan sampai penelitian selesai dilakukan agar tidak terjadi perbedaan temperatur dan RH sekeliling sampel secara signifikan. Benda uji balok dibuat selayaknya balok beton sesungguhnya yang ditopang oleh dua buah tumpuan.

### 3.8 Metode Pengamatan Deformasi pada Temperatur dan RH Sekeliling Sampel

Pada penelitian ini pengamatan 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 dapat dilihat dengan menggunakan alat *readout* yang tersambung dengan kawat getar tertanam pada beton. Sedangkan untuk pembacaan temperatur dan RH di sekeliling beton menggunakan alat termometer digital atau disebut *hygrometer*.

### 3.9 Analisis Hasil Penelitian

Data dari tiga spesimen ukuran laboratorium balok dianalisis menggunakan kriteria Dixon sebagai praktik standar untuk menangani pengamatan data pencilan. Kriteria Dixon dapat digunakan untuk pengujian yang jumlah sampelnya mulai dari 3 buah. ASTM E 178-02 telah menyebutkan bahwa kriteria Dixon, yang sepenuhnya didasarkan pada rasio perbedaan antara pengamatan dapat digunakan dalam kasus di mana diinginkan untuk menghindari perhitungan deviasi standar atau di mana penilaian cepat diperlukan (Niken dkk., 2019).

Tahap awal yang dilakukan adalah menyusun data dari yang terkecil ( $X_1$ ) hingga terbesar ( $X_n$ ). Tergantung pada jumlah datanya, pada uji Dixon kumpulan data dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu kelompok pertama untuk jumlah data 3 – 7, kelompok kedua jumlah data 8 – 12 dan kelompok terakhir jumlah data 13 – 40. Masing-masing kelompok dibagi lagi dalam dua bagian, yaitu bagian data terendah dan tertinggi. Persamaan kriteria Dixon untuk 3 – 7 sampel dengan  $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$  adalah sebagai berikut:

- Kriteria Dixon data terkecil :  $D_{3-7} = (X_2 - X_1) / (X_n - X_1)$
- Kriteria Dixon data terbesar :  $D_{3-7} = (X_n - X_{n-1}) / (X_n - X_1)$

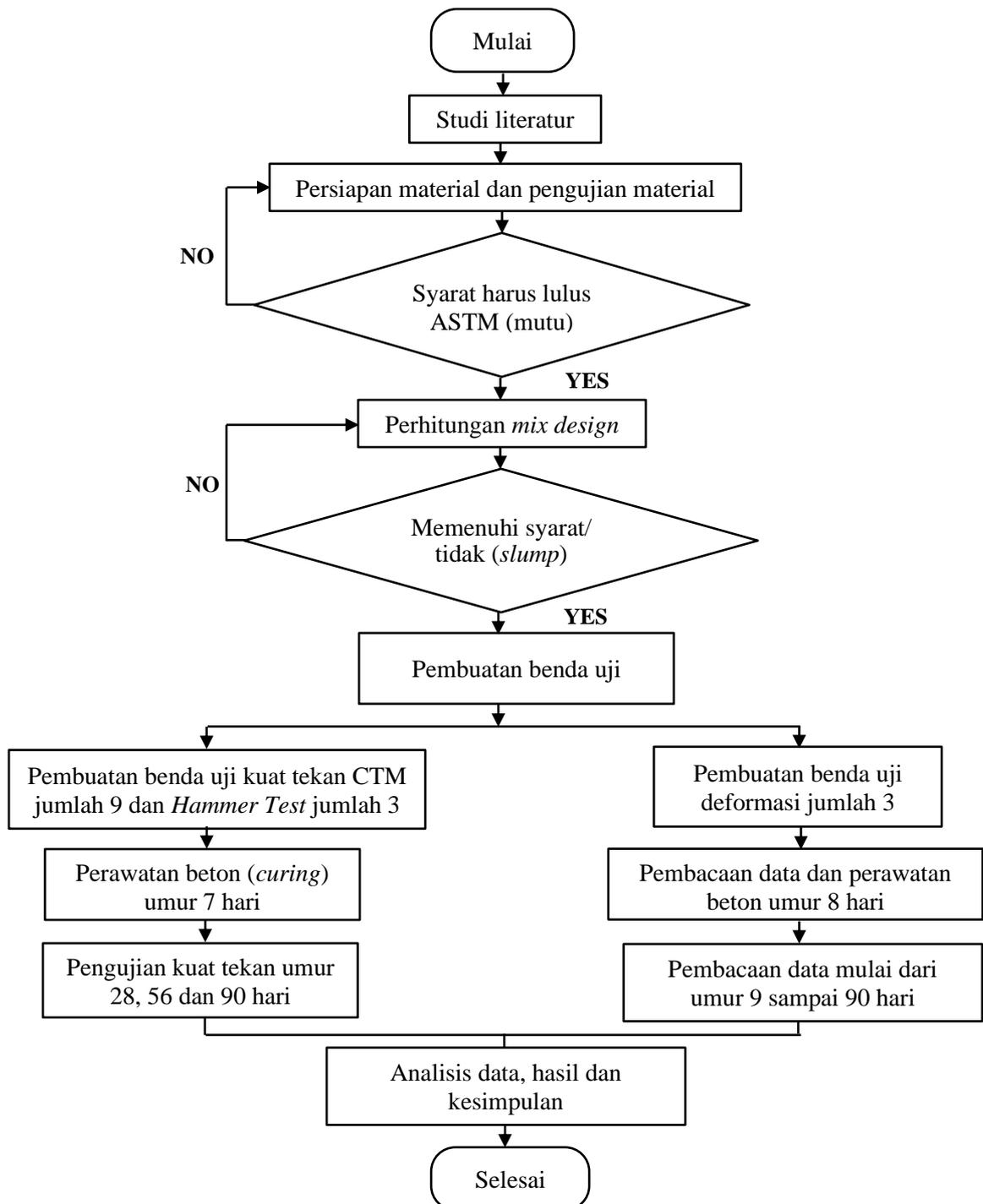
Jika  $D_{hitung} > D_{tabel}$ , maka data tersebut merupakan pencilan dan dapat dibuang. Hal tersebut dilakukan terhadap data selanjutnya hingga tidak ada lagi data pencilan.

Setelah melakukan pengamatan, maka dapat dilakukan perhitungan dan analisis data sebagai berikut:

- Dari hasil pengamatan deformasi pada balok beton dibuat grafik dari tiga sampel benda uji.
- Analisis data pengamatan deformasi tiga sampel berdasarkan ASTM E 178-02.
- Analisis data hasil pembacaan temperatur dan RH pada sekeliling beton.
- Analisis data pengamatan deformasi tiga sampel, lalu diolah menjadi satu data terakhir dan dibandingkan dengan data temperatur dan RH sekeliling beton.
- Analisis perilaku pengembangan dan penyusutan beton yang dihubungkan dengan temperatur dan RH sekeliling beton.
- Membandingkan hasil penelitian dengan ACI 209R-92 (*Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*)
- Membandingkan dengan penelitian sebelumnya “*Long-term Deformation of Beams and Columns of High Performance Concrete*”.
- Menghitung kuat tekan beton pada uji CTM pada umur beton 28, 56 dan 90 hari menggunakan kriteria Dixon.
- Menghitung kuat tekan beton pada uji *hammer* pada umur beton 21 – 90 hari menggunakan kriteria Dixon.
- Dari hasil pengujian kuat tekan dibuat grafik sampai umur beton 90 hari.

### 3.11 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian adalah tahapan yang dilakukan untuk mendukung proses penyelesaian penelitian agar proses penelitian berjalan lebih terstruktur. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram alir penelitian.

## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian mengenai deformasi kembang susut balok beton yang menggunakan bahan semen jenis PCC (*Portland Cement Composite*) yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kembang susut beton dibagi pada 3 tahap, yaitu saat 24 jam pertama, masa *curing*, dan setelah masa *curing*.
  - a. Saat 24 jam pertama, beton mengalami pengembangan dan penyusutan yang hanya disebabkan oleh reaksi hidrasi setelah pengecoran. Peningkatan suhu dalam beton mulai terjadi pada rentang umur 2,75 – 7,75 jam setelah pengecoran dengan suhu terbesar sebesar 31,2 °C saat umur beton 7,75 jam. Perilaku kembang susut beton memiliki pola yang sama dengan suhu dalam beton saat 24 jam pertama.
  - b. Saat masa *curing*, beton mengalami pengembangan dan penyusutan yang relatif sama besarnya dan stabil. Perilaku kembang susut beton memiliki pola yang sama dengan suhu dalam beton. Temperatur ruangan di sekitar beton sedikit mempengaruhi besarnya kembang susut beton saat masa *curing*. Perilaku kembang susut beton memiliki pola yang sama dengan fluktuasi kenaikan dan penurunan temperatur di sekitar beton.
  - c. Setelah proses *curing*, beton terus mengalami penyusutan dengan laju yang semakin lambat seiring berjalannya waktu. Terdapat hubungan yang erat antara RH dengan perilaku kembang susut beton. Pada penelitian ini nilai suhu dalam beton semakin lama semakin

mendekati suhu di sekitar beton. Bila dibandingkan dengan ACI 209R kembang susut beton pada umur 90 hari memiliki nilai lebih besar 2,34 kali daripada prediksi ACI. Hal ini menunjukkan perlu adanya penyesuaian ketika menerapkan pedoman ACI atau pedoman dari negara lain di Indonesia. Apabila dibandingkan dengan HPC (*High Performance Concrete*), nilai susut pada beton yang menggunakan semen PCC saat beton berumur 90 hari sekitar  $4 \times 10^{-4}$  (m/m), sedangkan untuk beton OPC memiliki nilai susut yang lebih rendah yaitu sekitar  $3,5 \times 10^{-4}$  (m/m) pada umur yang sama. Dengan demikian, penggunaan semen jenis PCC cenderung mengalami penyusutan yang lebih besar dibandingkan dengan semen jenis OPC.

2. Deformasi kembang susut beton dipengaruhi oleh temperatur dan RH sekeliling beton. Hal ini dibuktikan ketika RH sekeliling beton tinggi dan suhu udara yang rendah, maka penyusutan yang terjadi akan rendah. Sebaliknya, ketika RH sekeliling beton rendah dan suhu udara tinggi, akan mengakibatkan beton mengalami penyusutan yang lebih besar. Kondisi lingkungan yang tepat selama proses pengerasan dan perawatan beton sangat krusial. Pengelolaan yang baik dari faktor-faktor ini akan membantu meminimalkan deformasi yang tidak diinginkan dan menghindari terjadinya keretakan.

## 5.2 Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini, maka perlu diadakan penelitian yang lebih lanjut untuk melengkapi dan mengembangkan penelitian ini. Saran yang dapat penulis berikan adalah:

1. Penelitian mengenai deformasi kembang susut balok beton yang menggunakan bahan semen jenis PCC (*Portland Cement Composite*) perlu dilakukan penelitian yang lebih lama agar mendapatkan data deformasi kembang susut jangka panjang.

2. Perlu diperhatikan saat perencanaan campuran (*mix design*) dan pengujian material serta ketelitian dalam penimbangan bahan karena berpengaruh pada kualitas beton yang dihasilkan.
3. Perlu diperhatikan pada saat pengecoran bahwa adukan beton harus terdistribusi sempurna karena berpengaruh pada homogenitas beton.
4. Hasil penelitian harus dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya agar tidak bertentangan dengan pedoman atau konsep yang ada.
5. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan tulangan agar mendekati keadaan pada konstruksi dilapangan.
6. Lebih teliti pada saat menembakan *hammer* ke sampel beton karena posisi penembakan dapat akan mempengaruhi nilai rebound.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI. 1992. ACI 209R-92. *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- Agus, I. 2018. Analisa Kuat Tekan Beton Terhadap Lamanya Waktu Pengadukan. *Jurnal MEDIA INOVASI Teknik Sipil Unidayan*. Vol. 7 (2).
- Alaydrus, M., Nurlina, S., & Remayanti, C. N. 2016. Analisis Deformasi Struktur Balok Beton Bertulang dengan Lubang Hollow Core pada Tengah Balok. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Brawijaya*.
- ASTM C 125-03. 2003. *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. USA: American Society For Testing and Materials.
- ASTM C 1602. 2006. *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, Annual Books of ASTM Standards*. USA: American Society For Testing and Materials.
- ASTM C 78-08. 2008. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. American Society for Testing and Materials. 1-4.
- ASTM E 178-02. 2002. *Standard practice for dealing with outlying observation*. American Society for Testing and Materials. 1-18.
- BSN. 2019. *SNI 2847-2019 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 2014. *SNI 15-7064-2014 Semen Portland Komposit*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 2013. *SNI 2847-2013 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standard Nasional.
- BSN. 2008. *SNI 1969-2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 2008. *SNI 1970-2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

- BSN. 2002. *SNI 2847:2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 1997. *SNI 4430-1997 Metode pengujian elemen struktur beton dengan Hammer Test*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. 1991. *SNI 2493:1991 Metoda Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- Basori, Syafrijal, & Suharwanto. 2015. Analisis Defleksi Batang Lentur Menggunakan Tumpuan Jepit dan Rolpada Material Aluminium 6063 Profil U dengan Beban Terdistribusi. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*. <https://dx.doi.org/10.21009/JKEM.2.1.8>
- Devia, D., Lestari, P., & Sembiring, E. 2017. Life Cycle Assessment of Portland Cement Composite (Case Study: Pt X). *Jurnal Teknik Lingkungan*. Vol. 23(2), 1-10.
- David, W., & Supartono, F. X. 2023. Analisis Pengaruh Construction Stage Terhadap Deformasi dan Gaya Dalam Struktur Gedung Bertingkat Dengan Dinding Geser. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*. Vol. 109-122.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1989. *SK SNI M-12-1989-F Pengujian Slump Beton*. Jakarta: Yayasan LPMB.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1989. *SK SNI S-04-1989-F Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bangunan Bukan Logam)*. Bandung: Yayasan LPMB.
- Foulhudan, J., Nurtanto, D., & Krisnamurti, K. 2022. Perbandingan *Mix Design* SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656: 2012 Ditinjau dari Proses Pengecoran Beton Normal. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*. Vol. 5(2), 98-107.
- Frick, H. 2003. *Mekanika Teknik 1 Statika dan Kegunaannya (20 ed.)*. Kanisius. Yogyakarta.
- Gartner, E., Kurtis, K., & Monteiro, P. 2000. Proposed mechanism of C-S-H growth tested by soft X-ray microscopy. *Cement Concrete Res*. Vol 30 (5).
- Holzer, P., Gasser & Muench, B. 2006. Quantification of capillary pores and Hadley grains in cement paste using FIB-Nanotomography. Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties. *Conference paper, (Springer, Midtown Manhattan, NY)*. 509-516.
- Hunggurami, E., Bolla, M. E., & Messakh, P. 2017. Perbandingan Desain Campuran Beton Normal Menggunakan SNI 03-2834-2000 Dan SNI 7656: 2012. *Jurnal Teknik Sipil*. Vol. 6(2), 165-172.

- Indocement, PT, Tbk. 2018. PCC Tiga Roda: Produk Hijau yang diakui oleh Green Listing Indonesia.
- Jasron, J. U. 2015. Analisis Pengaruh Letak Bahan terhadap Defleksi Balok Segi Empat dengan Tumpuan Engsel-Roll-Roll. *Jurnal Rekayasa Mesin*. Vol. 6(3), 167-170. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.03.5>
- Khodabandeh, P., Shekarchi, M., Rafiee, A., & Azar H. F. 2019. Mix Design of Ultra High Performance Concrete in Modified Andreasen and Andersen model. *Elev. Natl. Concr. Conf. Tehran Iran*. 56, 29–39.
- Kuntari, H. D., Lingga, A. A., & Supriyadi, A. 2019. Analisis Perbandingan Desain Campuran Beton Normal Menggunakan SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656: 2012 dengan Kuat Tekan 30 Mpa. *JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*. Vol. 6(3). <http://dx.doi.org/10.26418/jelast.v6i3.38813>
- Mointi, R. (2014). Kajian Eksperimental Mekanisme Retak Pada Balok Beton Bertulang. *RADIAL: Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa dan Teknologi*. Vol. 2(2), 104-115. <https://doi.org/10.37971/radial.v2i2.52>
- Murison, R., Jacobsz, S., Silva, T., Gaspar, T., & Osman, A. 2022. Monitoring bending moment distributions in large-scale laterally loaded piles using fibre Bragg gratings and vibrating wire strain gauges. *Korean Geotechnical Society (KGS)*.
- Neville, A. 2005. *Properties of Concrete 4th Edition*. Prentice Hall. London.
- Nawy, E. G. 1998. *Beton bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Cetakan kedua. PT. Refika Aditama. Bandung.
- Niken, C. 2019. Early–Age Shrinkage of High-Performance Concrete Beam in Laboratory and Full-Scale. *Civil and Environmental Research*. Vol. 11(4).
- Niken, C., Elly, T., Supartono, F. X., & Laksmi, I. 2018. Deformation of high performance concrete plate under humid tropical weather. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 316, (1). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/316/1/012036>
- Niken, C., Elly, T., & Supartono, F. X., 2017. Long-term deformation of beam and column of high performance concrete. *International Journal of Technology*. Vol. 8(5), 811-819.
- Niken, C., Elly, T., & Franciscus, S. 2013. Long-term shrinkage empirical model of high performance concrete in humid tropical weather. *IISTE Civil and Environmental Research*. Vol. 3(2), 35-46.
- Paulini, P. 1990. Reaction mechanisms of concrete admixture. *Cement Concrete Res*. 20, 910-918. <https://doi.org/10.1016/0008-8846%2890%2990053-Z>

- Prasetyo, I. 2020. *Studi Eksperimen Lentur dan Defleksi Balok Beton dengan Tulangan Puntir Plat Baja Segi Empat Ukuran 3 x 15 x 1000 mm.* (Skripsi). Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Qomaruddin, M., Abda, R., Irene, S., & Lie, H. 2017. Studi Pengaruh Air Laut Pada Mortar Beton Normal dan Mortar Beton dengan Fly ash. *Teknik Sipil Journal*. Vol 14 (3), 153 – 160. <https://doi.org/10.24002/jts.v14i3.1979>
- Sahusilawane, T., & Frans, P. L. 2022. Perilaku Defleksi Balok Beton Tulangan Sistem Rangka dengan Jarak Spasi Seperdua Tinggi Efektif Balok. *Jurnal Simetrik*. Vol. 12 (1), 520-525. <https://doi.org/10.31959/js.v12i1.1066>
- Santoso, A., Darmono, D., Ma'arif, F., & Sumarjo, H. 2017. Studi Perbandingan Rancang Campur Beton Normal Menurut Sni 03-2834-2000 Dan Sni 7656: 2012. *Inersia: Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*. Vol. 13 (2).
- Setiawan, A. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. Erlangga. Jakarta.
- Shihada, S., & 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.
- Soefiawati, L., & Bie, L. S. 1987. *Pengaruh Rangkak dan Susut terhadap Defleksi Balok Beton Bertulang*. (Skripsi). Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Sumajouw, A. 2018. Perbandingan Kuat Tekan Menggunakan Hammer Test pada Benda Uji Portal Beton Bertulang dan Menggunakan Mesin Uji Kuat Tekan Pada Benda Uji Kubus. *Jurnal Sipil Statik*. Vol. 6 (11).
- Susanto, D., Djauhari, Z., & Olivia, M. 2019. Karakteristik Beton *Portland Composite* Cement (PCC) Dan Silica Fume Untuk Aplikasi Struktur di Daerah Laut. *Jurnal Rekayasa Sipil*. Vol. 15 (1), 1-11.
- Syahputra, J. 2021. *Perbandingan Deformasi Balok Beton Antara 5 Filler Menggunakan Aplikasi Elemen Hingga*. (Skripsi). Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Medan.
- Tjokrodimuldjo. 2007. *Teknologi Beton*. Biro Penerbit. Yogyakarta
- Widodo, S. 2006. *Mekanika Teknik III*. Departemen Pendidikan Nasional, Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta.
- Wijaya, K., & Supartono, F. X. 2020. Analisis Pengaruh Rangkak Susut Beton Terhadap Tegangan Dan Lendutan Berdasarkan Beberapa Peraturan Pada Jembatan Prategang. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*. 1271-1282. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i4.8368>