

**PENYUSUTAN PERKERASAN KAKU PADA USIA DINI**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**DIEGO MARADONA MAHARDUTA**

**1915011008**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

**PENYUSUTAN PERKERASAN KAKU PADA USIA DINI**

**Oleh**

**DIEGO MARADONA MAHARDUTA**

**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  
2024**

## **ABSTRAK**

### **PENYUSUTAN PERKERASAN KAKU PADA USIA DINI**

**Oleh**

**DIEGO MARADONA MAHARDUTA**

Sering ditemui keretakan pada perkerasan kaku. Salah satu penyebabnya ialah retak yang disebabkan oleh susut yang berlebihan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui deformasi yang terjadi pada jalan beton di Indonesia sejak pengecoran sampai masa *curing* berakhir. Sampel penelitian berupa perkerasan kaku berukuran 5000×4500×300 mm dengan  $f_s'$  4,5 MPa dan  $f_c'$  25 MPa. *Curing* beton dilakukan dengan cara mentelimiti beton dengan *geotextile* dan dibasahi setiap 2 jam sejak beton berusia 13 jam 30 menit. Metode penelitian yang digunakan adalah observasi dan wawancara. Analisis data pada penelitian ini menggunakan analisis deskripsi hasil pengamatan dan pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa deformasi beton yang terjadi pada perkerasan kaku di Indonesia dari yang terbesar hingga yang terkecil secara berurutan dimulai dari bagian tengah, bagian sisi panjang, bagian sisi pendek, lalu bagian sudut segmen. Suhu dan kelembapan relatif lingkungan memiliki pengaruh terhadap deformasi, saat suhu tinggi maka kelembapan relatif rendah sehingga beton mengalami susut. Begitupula sebaliknya, saat suhu rendah maka kelembapan relatif tinggi sehingga beton mengalami kembang.

Kata kunci: beton, kelembapan relatif, perkerasan kaku, regangan, suhu

## **ABSTRACT**

### **EARLY AGE SHRINKAGE OF RIGID PAVEMENTS**

*By*

**DIEGO MARADONA MAHARDUTA**

*Cracks in rigid pavements are often encountered. One of the causes is cracking caused by excessive shrinkage. The purpose of this study is to determine the deformation that occurs on concrete roads in Indonesia from casting until the curing period ends. The research sample is a rigid pavement measuring 5000×4500×300 mm with  $f_s'$  4.5 MPa and  $f_c$  25 MPa. Curing of concrete was carried out by covering the concrete with geotextile and moistened every 2 hours since the concrete was 13 hours 30 minutes old. The research methods used were observation and interview. Data analysis in this study used descriptive analysis of observation and measurement results. The results showed that the deformation of concrete that occurs in rigid pavements in Indonesia from the largest to the smallest in order starts from the centre, the long side, the short side, then the corner of the segment. The temperature and relative humidity of the environment have an influence on deformation, when the temperature is high, the relative humidity is low so that the concrete shrinks. Otherwise, when the temperature is low, the relative humidity is high so that the concrete expands.*

*Keywords: concrete, relative humidity, rigid pavement, strain, temperature*

Judul Skripsi : **PENYUSUTAN PERKERASAN KAKU  
PADA USIA DINI**

Nama Mahasiswa : **Diego Maradona Maharduta**

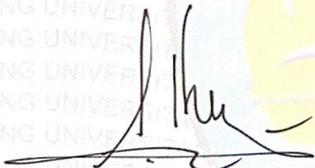
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915011008

Program Studi : S1 Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

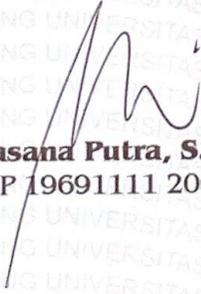
**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

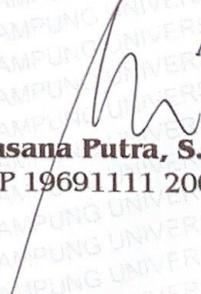
  
**Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU., M.T.**  
NIP 19580613 198403 2 003

  
**Dr. Eng. Ir. Ratna Widayawati, S.T.,  
M.T., IPM., ASEAN Eng.**  
NIP 19710605 199512 2 000

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

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

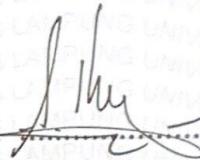
3. Penanggungjawab Program  
Studi S1 Teknik Sipil

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

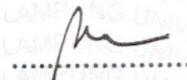
**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

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



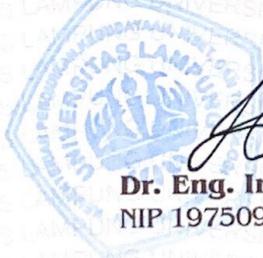
**Sekretaris : Dr. Eng. Ir. Ratna Widyawati, S.T.,  
M.T., IPM., ASEAN Eng.**



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



**2. Dekan Fakultas Teknik**



**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }**  
NIP 19750928 200112 1 002



**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 6 Maret 2024**

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Diego Maradona Maharduta

NPM : 1915011008

Prodi/Jurusan : S1/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi yang berjudul "*PENYUSUTAN PERKERASAN KAKU PADA USIA DINI*" 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, 6 Maret 2024



Diego Maradona Maharduta

## RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Bandar Lampung pada tanggal 14 Maret 2001, merupakan anak keempat dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Mahami dan Ibu Haryati. Penulis memiliki tiga orang kakak perempuan bernama Mia Novrila Savitry, Mia Juniska Dwita dan Mia Triska Ambarwati. Penulis menempuh jenjang pendidikan taman kanak – kanak di TK Cenderawasih pada tahun 2006 – 2007, sekolah dasar di SD Negeri 1 Labuhan Dalam pada tahun 2007 – 2013, lalu dilanjutkan ke sekolah menengah pertama di SMP Negeri 29 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2016 dan dilanjutkan ke sekolah menengah atas di SMA Negeri 5 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2019.

Pada tahun 2019 penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis berperan aktif di organisasi tingkat fakultas yaitu BEM FT Unila selama 1 periode pada tahun 2020 – 2021, dan organisasi jurusan yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) sebagai anggota Departemen Komunikasi dan Informasi Periode 2020 – 2021 dan anggota Departemen Advokasi Periode 2021 – 2022. Penulis juga telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) Periode I di Kemiling Raya, Kecamatan Kemiling selama 40 hari, Januari – Februari 2022. Ditahun yang sama, tepatnya dibulan Juli – Oktober penulis juga telah melakukan Kerja Praktik di Proyek Pembangunan Gedung Kuliah Bersama Politeknik Negeri Lampung selama 3 bulan. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Penyusutan Perkerasan Kaku pada Usia Dini”.

## 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

“Dan berencanakanlah kalian, Allah membuat rencana. Dan Allah sebaik-baik perencana.” (QS. Ali Imran : 54).

“Lambat bukan berarti tertinggal, cepat bukan berarti hebat, nyatanya semua akan sampai garis *finish* di waktu yang Tuhan izinkan”

## **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 kakak-kakak 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 Diego Maradona Maharduta, 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 **“Penyusutan Perkerasan Kaku Pada Usia Dini”** 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. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sidan Penanggung Jawab Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. 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.
5. Ibu Dr. Eng. Ir. Ratna Widyawati, S.T., M.T. IPM. ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang memberikan motivasi, saran dan membimbing penulisan skripsi.
6. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji atas kesediaannya memberikan kritik dan saran bagi perbaikan skripsi.

7. Bapak Ir Ashruri, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan bimbingan dan arahan selama perkuliahan.
8. Seluruh Civitas Akademik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
9. Keluarga tercinta terutama kedua orang tua dan kakak, yang selalu mendoakan dan telah sabar dalam memberi dukungan, nasihat, dan motivasi dalam menyelesaikan laporan skripsi ini.
10. Tim penelitian skripsi, Josep atas kerjasama dan kebersamaannya dalam menyelesaikan penelitian ini.
11. Bububku yang senantiasa menjadi tempat berkeluh kesah terbaik dan selalu mendukung dalam menjalani proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi.
12. 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,

2024

**Diego Maradona Maharduta**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>vii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Batasan Masalah .....	3
D. Tujuan Penelitian.....	4
E. Manfaat Penelitian .....	4
F. Sistematika Penulisan .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
A. Pengertian Perkerasan Jalan .....	6
B. Pengertian Perkerasan Kaku ( <i>Rigid Pavement</i> ).....	6
C. Jenis Perkerasan Kaku ( <i>Rigid Pavement</i> ).....	6
D. Karakteristik Perkerasan Kaku ( <i>Rigid Pavement</i> ).....	8
E. Parameter dalam Desain dan Pelaksanaan Perkerasan Beton.....	8
F. Perbedaan antara Perkerasan Kaku dengan Perkerasan Lentur .....	9
G. Persyaratan Teknis .....	10
H. Jenis Sambungan pada Perkerasan Kaku ( <i>Rigid Pavement</i> ) .....	13
I. Perawatan Beton ( <i>Curing</i> ) .....	16

J. Susut Beton.....	25
K. <i>Strain Gauge</i> .....	33
L. Penelitian Terdahulu.....	34
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>41</b>
A. Identifikasi Masalah .....	41
B. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	41
C. Metode Penelitian.....	42
D. Metode Pengumpulan Data dan Sumber Data .....	42
E. Metode Analisis Data .....	43
F. Prosedur Penelitian .....	43
G. Alat Bantu Pendukung Pengumpulan Data.....	48
H. <i>Flow Chart</i> Penelitian .....	53
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>54</b>
A. Gambar Umum Penelitian.....	54
B. Data Teknis Perencanaan Perkerasan Kaku ( <i>Rigid Pavement</i> ) .....	54
C. <i>Mix Design</i> .....	56
D. Hasil dan Analisis Tes Tekan.....	56
E. Hasil dan Analisis Tes Lentur.....	61
F. Hasil dan Analisis Tes Susut.....	63
G. Hasil Penelitian dibandingkan ACI 209R-92.....	76
<b>V. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>80</b>
A. Kesimpulan.....	80
B. Saran .....	81

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. <i>Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)</i> .....	7
2.2. <i>Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)</i> .....	7
2.3. <i>Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)</i> .....	8
2.4. Gambar Distribusi Pembebanan Perkerasan Kaku dan Perkerasan Lentur ....	9
2.5. Tebal Pondasi Bawah Minimum untuk Perkerasan Beton Semen.....	11
2.6. CBR tanah dasar efektif dan tebal pondasi bawah.....	11
2.7. Pengaruh <i>Joint</i> pada Perkerasan akibat Beban.....	13
2.8. Tipikal sambungan memanjang (potongan melintang).....	15
2.9. Sambungan susut melintang tanpa ruji .....	16
2.10. Sambungan susut melintang dengan ruji.....	16
2.11. Grafik Hubungan antara Kelembapan dengan Kehilangan Air .....	17
2.12. Grafik Hubungan antara Temperatur Udara dan Beton dengan Kehilangan Air.....	18
2.13. Grafik Hubungan antara Kecepatan Angin dengan Kehilangan Air.....	18
2.14. Grafik Hubungan antara Temperatur Beton dengan Kehilangan Air .....	19
2.15. Grafik Suhu <i>Curing</i> terhadap Kuat Tekan Beton.....	23
2.16. Grafik Kuat Tekan Beton dalam Berbagai Perlakuan.....	25
2.17. Grafik regangan susut beton terhadap waktu .....	26
2.18. Susut beton dengan perbedaan jumlah semen (pada suhu 20°C, kelembapan relatif 50%, dan kecepatan angin 2.25 mph) .....	29
2.19. Pengaruh kadar agregat terhadap perbandingan susut beton terhadap susut pada pasta.....	29
2.20. Pengaruh kadar agregat kasar terhadap susut beton.....	30
2.21. Panas hidrasi yang ditimbulkan dari semen yang berbeda.....	31
2.22. Susut pengeringan dan pengarbonasian pada kelembapan berbeda.....	32
2.23. Sensor <i>Strain Gauge</i> .....	34

3.1. Lokasi Penelitian.....	42
3.2. Posisi penempatan <i>strain gauge</i> .....	44
3.3. Tampak atas segmen penelitian .....	45
3.4. <i>Vibrating Wire Readout</i> .....	48
3.5. <i>Vibrating Wire Embedded Strain Gauge</i> .....	49
3.6. <i>Thermometer hygrometer</i> .....	49
3.7. Lembar pemantauan.....	49
3.8. Meteran .....	50
3.9. <i>Smartphone</i> .....	50
3.10. Plastik.....	50
3.11. Benang nilon .....	51
3.12. Laptop .....	51
3.13. <i>Hammer test</i> .....	52
3.14. <i>Frame uji hammer</i> .....	52
3.15. <i>Flow chart</i> penelitian .....	53
4.1. <i>Typical Cross Perkerasan Kaku</i> .....	55
4.2. Titik pengujian <i>Hammer Test</i> .....	58
4.3. Dixon Kuat Tekan <i>Hammer Test</i> .....	60
4.4. Perbandingan Nilai Kuat Tekan di Lapangan dan di Lab.....	61
4.5. Susut di setiap <i>strain gauge</i> .....	66
4.6. Susut selama 24 jam.....	68
4.7. Susut vs Waktu (Hari ke-2).....	69
4.8. Susut vs Waktu (Hari ke-3 s/d 7) .....	69
4.9. Susut vs Waktu (Hari ke-7 s/d 14).....	70
4.10. Kelembapan vs Waktu .....	71
4.11. Suhu Udara vs Waktu.....	72
4.12. Suhu Beton vs Waktu.....	73
4.13. Delta Suhu vs Waktu.....	74
4.14. Letak <i>Strain Gauge</i> Penelitian saat ini.....	75
4.15. Letak <i>Strain Gauge</i> Penelitian saat ini.....	75
4.16. Suhu vs Waktu Saat <i>Curing</i> (ACI 209R).....	79

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1. Rentang Waktu Pengamatan Segmen Penelitian .....	46
4.1. <i>Mix Design</i> .....	56
4.2. Nilai Kuat Tekan <i>Hammer Test</i> pada <i>Strain Gauge</i> 1 dan 2.....	57
4.3. Nilai Kuat Tekan <i>Hammer Test</i> pada <i>Strain Gauge</i> 3 dan 4.....	57
4.4. Nilai Kuat Tekan Uji Sampel Silinder .....	57
4.5. Kriteria Dixon .....	58
4.6. Data Kuat Tekan <i>Hammer Test</i> SG 1 & 2 Urut .....	59
4.7. Data Kuat Tekan <i>Hammer Test</i> SG 3 & 4 Urut .....	59
4.8. Nilai Kuat Tekan berdasarkan Uji Lapangan.....	60
4.9. Perbandingan Nilai Kuat Tekan di Lapangan dan di Laboratorium .....	61
4.10. Tabel Hasil Lentur.....	62
4.11. Perbandingan Hasil Tes Lentur terhadap Perhitungan Teoritis.....	63
4.12. Hasil Pengukuran di Lapangan .....	64
4.13. Faktor Koreksi Kelembapan Relatif.....	77
4.14. Faktor Koreksi Tebal Penampang .....	78

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Penggunaan perkerasan kaku merupakan pilihan yang cukup baik untuk jalan tol yang dilewati oleh beban cukup berat dan kecepatan cukup tinggi. Sifatnya yang lebih kuat dan lebih tahan lama, dibandingkan dengan perkerasan lentur menyebabkan perkerasan kaku menjadi pilihan yang tepat.

Perkerasan kaku menawarkan masa pakai jangka panjang dan penerapan yang sangat baik untuk lalu lintas padat. Teknik perkerasan ini memberikan efektivitas biaya dan daya tahan yang luar biasa. Namun demikian, perbaikan yang memadai pada perkerasan kaku lebih sulit daripada perkerasan lentur jika terjadi degradasi atau kerusakan dan membutuhkan pekerjaan dengan skala yang lebih besar (Yang SC dkk, 2000).

Penyebab umum retak pada perkerasan beton adalah retak pada saat awal hidrasi beton, retak susut plastis, retak lingkungan yang disebabkan oleh perubahan termal pada bagian atas perkerasan, retak susut pengeringan akibat pengerasan beton, dan retak yang disebabkan oleh proses jangka panjang reaksi alkali-silika.

Perbedaan kelembapan relatif antara lingkungan dan elemen itu sendiri menyebabkan deformasi susut volumetrik (penurunan volume) yang disebut susut pengeringan. Susut pengeringan terjadi dari waktu ke waktu dan setiap kali ada perbedaan kelembapan. Akibat dari penurunan volume ini, retakan dapat muncul pada elemen beton, yang dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan daya tahan elemen beton. Konsekuensinya, ketahanan terhadap

serangan karbonasi dan klorida pada elemen beton menurun, yang memfasilitasi korosi pada tulangan. Akibatnya terjadi penurunan kemampuan tulangan. Ketika hal ini terjadi, maka perlu dilakukan perbaikan pada elemen struktur yang terpengaruh atau bahkan menghancurkan dan menggantinya dengan elemen yang baru.

Meskipun susut pengeringan adalah susut yang paling penting untuk beton konvensional (rasio air/semen kurang dari 0,4) (Tran dkk, 2021), terdapat deformasi susut lainnya seperti susut autogenous, yang disebabkan oleh hilangnya kelembapan oleh reaksi hidrasi semen; susut plastis, yang terjadi sebelum beton mengeras (selama 24 jam pertama) dan susut total, yang meliputi susut pengeringan dan susut autogenous (Holt & Leivo, 2004). Oleh karena itu, susut pengeringan untuk suatu elemen tidak dapat ditentukan tanpa mempertimbangkan susut autogen dari elemen tersebut.

Biasanya, penyusutan autogenous beton berbanding terbalik sebanding dengan rasio air terhadap semen. Semakin tinggi rasio air terhadap rasio semen, semakin rendah penyusutan autogenous. Beton mutu tinggi umumnya memiliki rasio air terhadap semen yang rendah, oleh karena itu penyusutan autogenous yang nyata dapat terjadi pada struktur beton mutu tinggi (Zhang dkk 2012; Zhang dkk 2011). Untuk menghindari retak yang disebabkan oleh penyusutan pada beton mutu tinggi atau struktur beton mutu tinggi, perlu untuk mengkompensasi hilangnya kelembapan yang dihasilkan dari hidrasi semen.

Kadar air dan distribusinya di dalam beton perlu dijaga untuk memastikan proses hidrasi berjalan dengan baik. Beberapa metode *curing* dipelajari dan dapat dipilih sesuai dengan kondisi lapangan. Contohnya penutupan dengan goni basah, *geotextile* basah, pengolesan senyawa pengawet secara populer telah diaplikasikan pada beton (J. Shi dkk 2020; Deghfel dkk 2019; Wasserman & Bentur 2013; Al-Gahtani 2010). Deghfel dkk 2019 menyelidiki pengaruh *curing* pada kinerja beton yang dipadatkan dengan *roller trotoar* yang membuktikan efisiensi *curing* dengan goni lembap untuk proses hidrasi.

Wasserman & Bentur 2013 menemukan bahwa perawatan dengan kain geotekstil basah sama efektifnya dengan perawatan air standar dalam pengembangan kekuatan beton.

Untuk alasan ini, sangat penting untuk memvalidasi berbagai strategi untuk mengurangi atau bahkan menghindari fenomena penyusutan sehingga elemen beton dimasa depan memiliki masa pakai yang lebih lama dan mengurangi konsumsi sumber daya alam, serta meningkatkan keberlanjutan sektor konstruksi. Penelitian ini membahas deformasi pada struktur perkerasan kaku sejak pengecoran sampai masa *curing* berakhir.

## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang sudah diterangkan dalam latar belakang, maka dapat ditentukan rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Bagaimana deformasi yang terjadi pada jalan beton di Indonesia sejak pengecoran sampai masa *curing* berakhir?
- b. Bagaimana pengaruh suhu dan kelembapan relatif terhadap deformasi yang terjadi pada jalan beton sejak pengecoran sampai masa *curing* berakhir?

## C. Batasan Masalah

Agar pembahasan dari masalah-masalah yang telah diuraikan tidak menyimpang jauh, maka masalah dalam penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

- a. Penelitian dilakukan langsung di lapangan.
- b. Semen yang digunakan tipe *Ordinary Portland Cement* (OPC).
- c. Beton yang digunakan adalah *ready mix*.
- d. Kuat lentur rencana ( $f_s$ ) sebesar 4,5 MPa.
- e. Metode *curing* yang digunakan adalah penggunaan *geotextile* dengan penyiraman air.

- f. Pengamatan dilakukan sejak proses pengecoran beton selesai sampai akhir masa *curing* yakni sekitar 14 hari (sampai beton sudah dapat dilewati kendaraan).

#### D. Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui deformasi yang terjadi pada jalan beton di Indonesia sejak pengecoran sampai masa *curing* berakhir.
- b. Mengetahui pengaruh suhu dan kelembapan relatif terhadap deformasi yang terjadi pada jalan beton sejak pengecoran sampai masa *curing* berakhir.

#### E. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

- a. Memberikan ilmu pengetahuan dan wawasan tambahan mengenai perkerasan kaku.
- b. Mengetahui deformasi perkerasan kaku selama masa *curing* yang dilindungi dengan *geotextile*.
- c. Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya
- d. Bahan pertimbangan untuk pelaksana terhadap pekerjaan serupa.

#### F. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan adalah:

##### 1) BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang penelitian yang dilakukan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penulisan karya tulis serta sistematika penulisan.

2) BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi studi literatur yang digunakan, terdiri atas teori-teori dan hipotesa yang mendukung penelitian.

3) BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode penelitian berupa penyajian prosedur penelitian yang dilakukan, tata cara pemeriksaan benda uji dan pengukuran regangan.

4) BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisis regangan jalan beton berdasarkan hasil pengukuran di lapangan disertakan dengan data-data dari kondisi temperatur dan kelembapan yang bervariasi.

5) BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan mengenai pendahuluan, tinjauan pustaka, dan metodologi penelitian untuk mencapai tujuan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Pengertian Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan adalah campuran antara agregat dan bahan ikat yang digunakan untuk melayani beban lalu lintas. Agregat yang biasanya dipakai adalah batu pecah, batu belah atau batu kali ataupun bahan lainnya, sedangkan bahan ikat yang digunakan adalah aspal, semen, ataupun tanah liat. (Zanius, 2012)

### B. Pengertian Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku atau *rigid pavement* adalah jenis perkerasan jalan yang menggunakan beton sebagai bahan utama perkerasan tersebut. Perkerasan kaku merupakan salah satu jenis perkerasan jalan yang digunakan selain dari perkerasan lentur (asphalt). Perkerasan ini umumnya dipakai pada jalan yang memiliki kondisi lalu lintas yang cukup padat dan memiliki distribusi beban yang besar, seperti pada jalan- jalan lintas antar provinsi, jembatan layang (*fly over*), jalan tol, maupun pada jalan pelabuhan. Jalan-jalan tersebut umumnya menggunakan beton sebagai bahan perkerasannya (Azanurfausi, 2010).

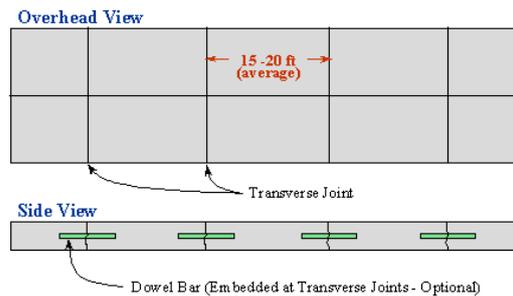
### C. Jenis Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku terdiri dari 4 jenis, yaitu:

1. Perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan.
2. Perkerasan kaku bersambung dengan tulangan.
3. Perkerasan kaku menerus (tanpa sambungan) dengan tulangan.
4. Perkerasan kaku pra-tegang (pra-tekan).

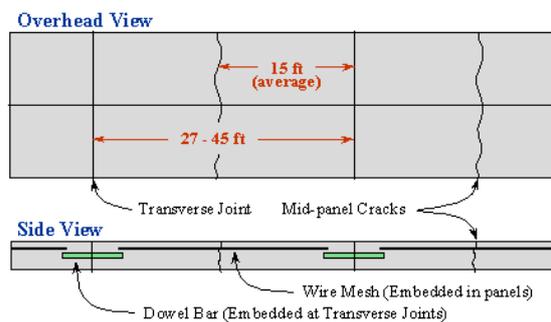
Perkerasan kaku dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis menurut ada tidaknya sambungan dan tulangan pelat beton di dalamnya antara lain sebagai berikut:

1. Perkerasan kaku dengan sambungan tanpa tulangan untuk kendali retak.



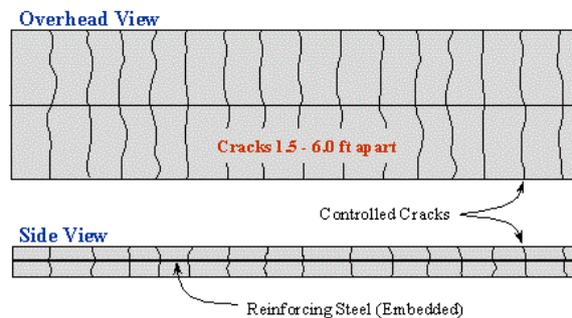
Gambar 2.1 *Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)*  
(Sumber: *American Concrete Pavement Association, 2016*)

2. Perkerasan kaku dengan sambungan dan tulangan untuk kendali retak, bagian yang berperan sebagai kendali retak yakni *wiremesh* yang dipasang diantara siar yang dipakai secara independen terhadap tulangan dowel.



Gambar 2.2 *Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)*  
(Sumber: *American Concrete Pavement Association, 2016*)

### 3. Perkerasan kaku dengan tulangan tanpa sambungan.



Gambar 2.3 *Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)*  
(Sumber: *American Concrete Pavement Association, 2016*)

#### D. Karakteristik Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Konstruksi perkerasan kaku karena dari beton memakai bahan pengikat semen portland.

- a. Sifat lapisan utama (pelat beton) yaitu memikul sebagian besar beban lalu lintas.
- b. Sering terjadi retak-retak pada permukaannya.
- c. Pengaruhnya terhadap penurunan tanah dasar yaitu, bersifat sebagai balok di atas dukungan elastis.

#### E. Parameter dalam Desain dan Pelaksanaan Perkerasan Beton

Parameter penting dalam desain dan pelaksanaan perkerasan beton adalah kuat lentur dari beton itu sendiri. Oleh karena itu, dalam desain dan pelaksanaan perkerasan beton semen harus menggunakan beton mutu tinggi serta harus sesuai dengan perencanaan sebelumnya. Ada beberapa alasan mengapa harus menggunakan beton dengan mutu tinggi, diantaranya sebagai berikut:

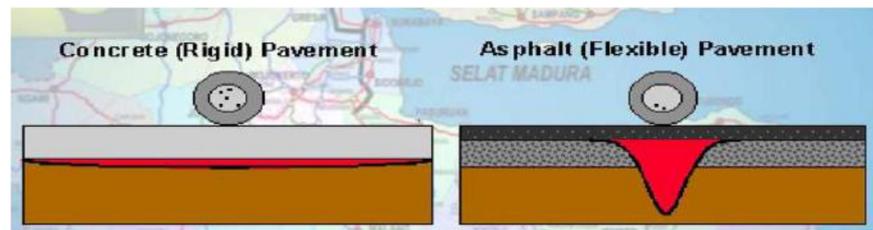
- a. Agar tahan aus terhadap roda lalu-lintas.
- b. Agar lebih tahan terhadap pelapukan akibat cuaca.
- c. Agar tidak memerlukan pemeliharaan yang terlalu sering.

## F. Perbedaan antara Perkerasan Kaku dengan Perkerasan Lentur

Perkerasan kaku memiliki beberapa perbedaan terhadap perkerasan lentur, yakni:

### a. Distribusi Pembebanan

Keunggulan perkerasan kaku dibandingkan perkerasan lentur (*asphalt*) terletak pada distribusi beban yang disalurkan ke *subgrade*. Perkerasan kaku mempunyai kekakuan (*stiffness*) yang lebih tinggi dibanding perkerasan lentur, karenanya akan mendistribusikan beban pada daerah yang relatif luas pada tanah dasar (*subgrade*), sedangkan pada perkerasan lentur karena dibuat dari material yang kurang kaku, maka persebaran beban yang dilakukan tidak sebaik pada beton, sehingga memerlukan ketebalan yang lebih besar untuk meneruskan beban ke *subgrade* (tanah dasar). Distribusi pembebanan dapat lihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Gambar Distribusi Pembebanan Perkerasan Kaku dan Perkerasan Lentur  
(Sumber: Hadi.M, 2018)

### b. Ketahanan Terhadap Pelapukan/Oksidasi

Konstruksi semen relatif lebih sedikit mengandung bahan-bahan organik dari pada aspal, jadi perkerasan beton semen lebih tahan terhadap oksidasi (penuaan/*ageing*) dari pada perkerasan aspal.

### c. Kebutuhan Pemeliharaan

Pemeliharaan perkerasan kaku lebih kecil dari pada perkerasan lentur.

## G. Persyaratan Teknis

Persyaratan teknis pada perkerasan kaku, menyangkut beberapa hal, yaitu:

### a. Tanah dasar

Daya dukung tanah dasar ditentukan dengan pengujian CBR insitu sesuai dengan SNI 031731-1989 atau CBR laboratorium sesuai dengan SNI 03-1744-1989, masing-masing untuk perencanaan tebal perkerasan lama dan perkerasan jalan baru. Apabila tanah dasar mempunyai nilai CBR lebih kecil dari 2 %, maka harus dipasang pondasi bawah yang terbuat dari beton kurus (*Lean-Mix Concrete*) setebal 15 cm yang dianggap mempunyai nilai CBR tanah dasar efektif 5 %.

### b. Pondasi bawah

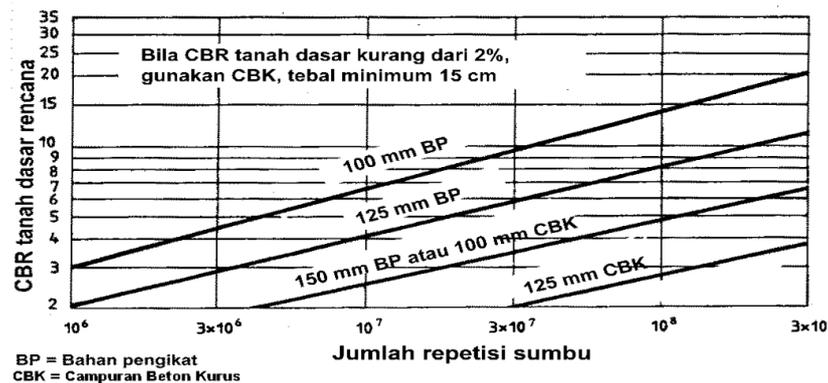
Bahan pondasi bawah dapat berupa:

- Bahan berbutir.
- Stabilisasi atau dengan beton kurus giling padat (*Lean Rolled Concrete*)
- Campuran beton kurus (*Lean-Mix Concrete*).

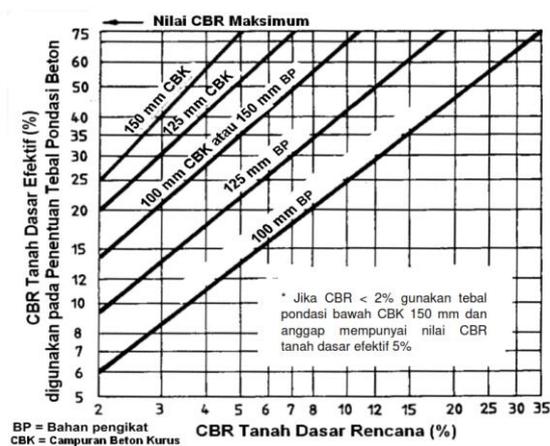
Lapis pondasi bawah perlu diperlebar sampai 60 cm di luar tepi perkerasan beton semen. Untuk tanah ekspansif perlu pertimbangan khusus perihal jenis dan penentuan lebar lapisan pondasi dengan memperhitungkan tegangan pengembangan yang mungkin timbul. Pemasangan lapis pondasi dengan lebar sampai ke tepi luar lebar jalan merupakan salah satu cara untuk mereduksi perilaku tanah ekspansif.

Tebal lapisan pondasi minimum 10 cm yang paling sedikit mempunyai mutu sesuai dengan SNI No. 03-6388-2000 dan AASHTO M-155 serta SNI 03-1743-1989. Bila direncanakan perkerasan beton semen bersambung tanpa ruji/dowel (sistem penyalur beban agar pelat yang bersebelahan dapat bekerja sama tanpa terjadi perbedaan penurunan yang berarti), pondasi bawah harus menggunakan campuran beton kurus

(CBK). Campuran Beton Kuras (CBK) harus mempunyai kuat tekan beton karakteristik pada umur 28 hari minimum 5 MPa ( $50 \text{ kg/cm}^2$ ) tanpa menggunakan abu terbang, atau 7 MPa ( $70 \text{ kg/cm}^2$ ) bila menggunakan abu terbang, dengan tebal minimum 10 cm. Tebal lapis pondasi bawah minimum yang disarankan dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan CBR tanah dasar efektif didapat dari Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Tebal pondasi bawah minimum untuk perkerasan beton semen (Sumber: Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, 2002)



Gambar 2.6 CBR tanah dasar efektif dan tebal pondasi bawah (Sumber: Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, 2002)

c. Beton Semen

Kekuatan beton harus dinyatakan dalam nilai kuat tarik lentur (*flexural strength*) umur 28 hari, yang didapat dari hasil pengujian balok dengan

pembebanan tiga titik (ASTM C-78) yang besarnya secara tipikal sekitar 3–5 MPa (30-50 kg/cm<sup>2</sup>).

Kuat tarik lentur beton yang diperkuat dengan bahan serat penguat seperti serat baja, aramit atau serat karbon, harus mencapai kuat tarik lentur 5–5,5 MPa (50-55 kg/cm<sup>2</sup>). Kekuatan rencana harus dinyatakan dengan kuat tarik lentur karakteristik yang dibulatkan hingga 0,25 MPa (2,5 kg/cm<sup>2</sup>) terdekat.

Hubungan antara kuat tekan karakteristik dengan kuat tarik-lentur beton dapat didekati dengan rumus beriku:

$$f_{cf} = K (f_c')^{0,50} \text{ dalam MPa atau} \dots\dots\dots(1.1)$$

$$f_{cf} = 3,13 K (f_c')^{0,50} \text{ dalam kg/cm}^2 \dots\dots\dots(1.2)$$

Dengan pengertian:

$f_c'$  : kuat tekan beton karakteristik 28 hari (kg/cm<sup>2</sup>)

$f_{cf}$  : kuat tarik lentur beton 28 hari (kg/cm<sup>2</sup>)

K : konstanta, 0,7 (agregat tidak dipecah) dan 0,75 (agregat pecah).

Kuat tarik lentur dapat juga ditentukan dari hasil uji kuat tarik belah beton yang dilakukan menurut SNI 03-2491-1991 sebagai berikut:

$$f_{cf} = 1,37 \cdot f_{cs}, \text{ dalam MPa atau} \dots\dots\dots(1.3)$$

$$f_{cf} = 13,44 \cdot f_{cs}, \text{ dalam kg/cm}^2 \dots\dots\dots(1.4)$$

Dengan pengertian:

$f_{cs}$  : kuat tarik belah beton 28 hari

Beton dapat diperkuat dengan serat baja (*steel-fibre*) untuk meningkatkan kuat tarik lenturnya dan mengendalikan retak pada pelat khususnya untuk bentuk tidak lazim. Serat baja dapat digunakan pada campuran beton, untuk jalan plaza tol, putaran dan perhentian bus. Panjang serat baja antara 15 mm dan 50 mm yang bagian ujungnya melebar sebagai angker dan/atau sekrup penguat untuk meningkatkan ikatan. Secara tipikal serat dengan

panjang antara 15 dan 50 mm dapat ditambahkan ke dalam adukan beton, masing-masing sebanyak 75 dan 45 kg/m<sup>3</sup>.

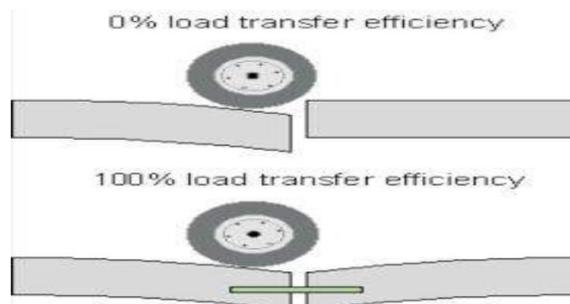
Semen yang akan digunakan untuk pekerjaan beton harus dipilih dan sesuai dengan lingkungan dimana perkerasan akan dilaksanakan.

#### H. Jenis Sambungan pada Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

*Joint* atau sambungan adalah alat yang digunakan pada perkerasan kaku untuk menghubungkan tiap segmen pada perkerasan (Ghazali, 2012).

Sambungan pada perkerasan kaku bertujuan untuk:

1. Membatasi tegangan pengendalian retak yang disebabkan oleh penyusutan, pengaruh lenting serta beban lalu lintas
2. Memudahkan pelaksanaan
3. Mengakomodasi gerakan pelat.



Gambar 2.7 Pengaruh *Joint* pada Perkerasan akibat Beban  
(Sumber: Azanurfauzi, 2010)

Ada tiga jenis sambungan (*joint*) yang digunakan pada perkerasan beton yaitu sebagai berikut:

1. Sambungan susut (*Contraction joint*)

*Contraction joint* diperlukan untuk mengendalikan retak alamiah akibat beton mengkerut, kontraksi termal dan kadar air dalam beton. *Contraction joint* umumnya melintang tegak lurus as jalan, tetapi ada juga yang

menggunakan menyudut terhadap as jalan untuk mengurangi beban dinamis melintas tidak satu garis.

2. Sambungan pelaksanaan (*Construction joint*)

*Construction joint* adalah jenis sambungan memanjang dan melintang yang dibuat untuk memisahkan bagian-bagian yang dicor/hampar pada saat perkerasan beton dilakukan dalam waktu yang berbeda ditempatkan di antara beton hasil penghamparan lama dengan beton hasil penghamparan baru.

3. Sambungan isolasi (*Isolation joint*)

*Isolation joint* memisahkan perkerasan dari objek atau struktur dan menjadikannya bergerak secara independen. Sambungan isolasi digunakan bila perkerasan berbatasan dengan *manholes*, drainase, trotoar dan bangunan *intersection* perkerasan lain atau jembatan. *Isolation joint* yang dipakai untuk jembatan harus memakai dowel sebagai *load transfer*.

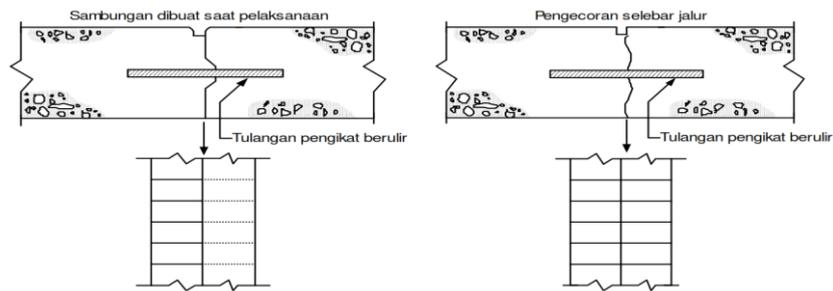
Pada perkerasan beton terdapat beberapa tipe sambungan antara lain:

1. Sambungan memanjang dengan batang pengikat (*tie bars*)

Pemasangan sambungan memanjang ditujukan untuk mengendalikan terjadinya retak memanjang, sambungan memanjang harus dilengkapi dengan batang ulir berdiameter 16 milimeter.

2. Sambungan pelaksanaan memanjang

Sambungan pelaksanaan memanjang dilakukan dengan cara penguncian bentuk dan ukuran penguncian dapat berbentuk trapesium atau setengah lingkaran.



Gambar 2.8 Tipikal sambungan memanjang (potongan melintang)  
(Sumber: Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, 2002)

### 3. Sambungan susut memanjang

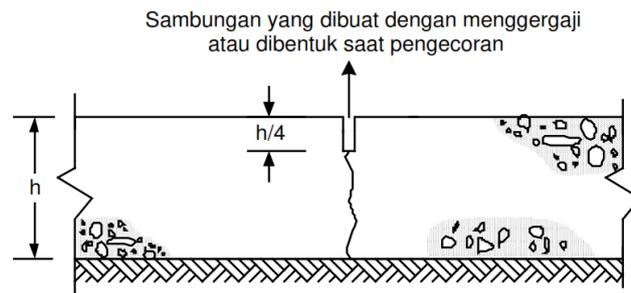
Sambungan susut memanjang dapat dilakukan dengan salah satu dari dua cara ini yaitu menggergaji atau membentuk pada saat beton masih plastis dengan kedalaman sepertiga dari tebal pelat.

### 4. Sambungan susut dan sambungan pelaksanaan melintang

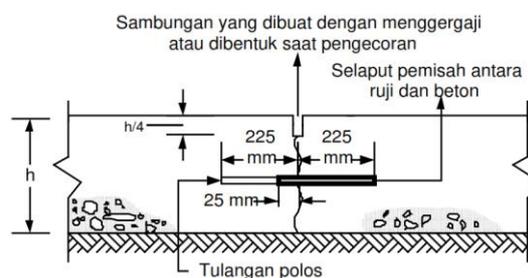
Ujung sambungan ini harus tegak lurus terhadap sumbu memanjang jalan dan tepi perkerasan.

### 5. Sambungan susut melintang

Kedalaman sambungan kurang lebih mencapai seperempat dari tebal pelat untuk perkerasan dengan lapis pondasi berbutir atau sepertiga dari pelat untuk lapis pondasi stabilisasi semen. Pondasi stabilisasi semen diartikan sebagai pencampuran tanah, semen, air, yang kemudian dipadatkan untuk kebutuhan tanah dasar pada perkerasan jalan, pondasi bangunan dan jalan, aliran sungai dan lain lain (Kezdi, 1979). Jarak sambungan susut melintang untuk perkerasan beton bersambungan tanpa tulangan sekitar 4-5 meter, sedangkan untuk perkerasan beton bersambung dengan tulangan 8-15 meter dan untuk sambungan perkerasan beton menerus dengan tulangan sesuai dengan kemampuan pelaksanaan. Sambungan ini harus dilengkapi dengan ruji polos panjang 45 cm, jarak antar ruji yaitu 30 cm, lurus dan bebas dari tonjolan tajam yang akan mempengaruhi gerakan bebas pada saat pelat beton menyusut, setengah panjang ruji polos harus dicat atau dilumuri dengan bahan anti lengket.



Gambar 2.9 Sambungan susut melintang tanpa ruji  
(Sumber: Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, 2002)



Gambar 2.10 Sambungan susut melintang dengan ruji  
(Sumber: Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, 2002)

## I. Perawatan Beton (*Curing*)

Proses perawatan beton bertujuan untuk menjaga kualitas beton sehingga sesuai dengan mutu yang direncanakan.

### a. Umum

Jumlah air dalam beton cair sebetulnya sudah lebih dari cukup (sekitar 12 liter per sak semen) untuk menyelesaikan reaksi hidrasi. Namun sebagian air hilang karena menguap sehingga hidrasi selanjutnya terganggu. Jadi perawatan perlu untuk mengisi pori-pori kapiler dengan air, karena hidrasi terjadi didalamnya (Nugraha dan Antoni, 2007).

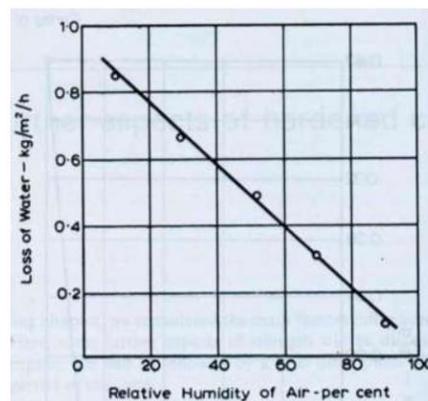
Perawatan ini dilakukan setelah beton mencapai *final setting*, artinya beton telah mengeras. Perawatan ini dilakukan, agar proses hidrasi selanjutnya

tidak mengalami gangguan. Jika hal ini terjadi, beton akan mengalami keretakan karena kehilangan air yang begitu cepat. Perawatan dilakukan minimal selama 7 (tujuh) hari dan beton berkekuatan awal tinggi minimal selama 3 (tiga) hari serta harus dipertahankan dalam kondisi lembap, kecuali dilakukan dengan perawatan yang dipercepat (Mulyono, 2003).

Menurut Neville, 2002, ada empat hal yang mempengaruhi proses penguapan yang dapat menyebabkan kehilangan air pada beton (Mayavani dan Habudin, 2006) yaitu:

1. Kelembapan relatif

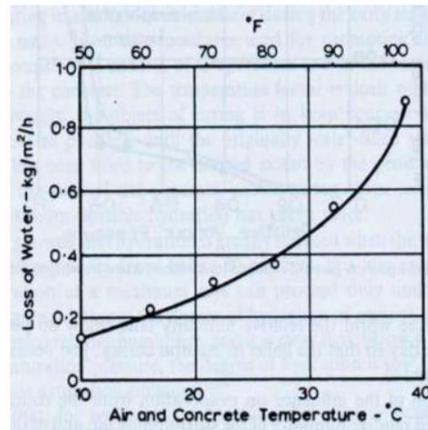
Semakin besar nilai kelembapan relatif, maka semakin sedikit kehilangan air yang terjadi.



Gambar 2.11 Grafik Hubungan antara Kelembapan dengan Kehilangan Air  
(Sumber: Neville, 2002)

2. Temperatur udara dan beton

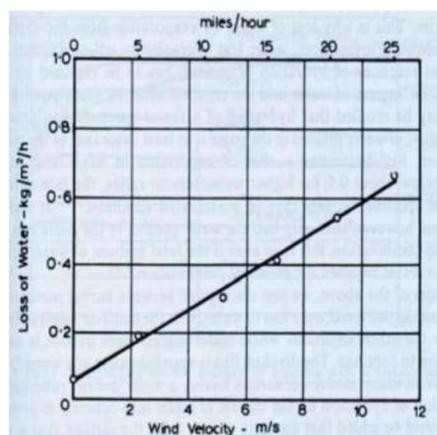
Temperatur udara dan beton sangat mempengaruhi proses penguapan yang terjadi pada beton. Semakin tinggi temperatur maka kehilangan air yang terjadi semakin banyak.



Gambar 2.12 Grafik Hubungan antara Temperatur Udara dan Beton dengan Kehilangan Air  
(Sumber: Neville, 2002)

### 3. Kecepatan udara

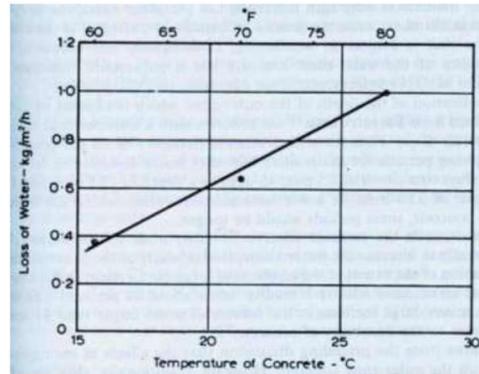
Proses penguapan juga dipengaruhi oleh adanya angin. Kecepatan angin yang besar akan mempercepat proses penguapan yang terjadi.



Gambar 2.13 Grafik Hubungan antara Kecepatan Angin dengan Kehilangan Air  
(Sumber: Neville, 2002)

### 4. Temperatur beton

Perbedaan temperatur udara dan beton juga mempengaruhi terhadap kehilangan air seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 2.14 Grafik Hubungan antara Temperatur Beton dengan Kehilangan Air  
(Sumber: Neville, 2002)

Murdock dan Brook, 1991 menjelaskan, selain dapat menyebabkan kehilangan air yang dapat mengganggu proses hidrasi, penguapan juga dapat menyebabkan penyusutan kering yang terlalu awal dan cepat, sehingga berakibat timbulnya tegangan tarik yang mungkin dapat menimbulkan retak- retak, kecuali bila beton telah mencapai kekuatan yang cukup untuk menahan tegangan ini (Mayavani dan Habudin, 2006). Bervariasinya bahan dasar pembentuk beton menyebabkan beton mempunyai beberapa sifat, di antaranya adalah sifat awet/daya tahan beton. Parameter daya tahan beton meliputi (Nursyamsi, 2005)

- a. Daya tahan terhadap beban struktur beton, dapat ditentukan dari:
  - Kuat tekan hancur beton, yaitu kekuatan beton untuk memikul beban rencana sebelum mengalami kehancuran.
  - Kuat tarik, yaitu kemampuan beton menahan tarikan. Sifat ini umumnya tidak terlalu diperhitungkan untuk memikul beban tetapi akan sangat menentukan kemampuan beton menahan retak yang terjadi akibat perubahan kadar air atau suhu.
- b. Daya tahan selama proses pengerasan beton, yaitu kemampuan beton menghindari terjadinya retak-retak plastis akibat penyusutan volume.
- c. Daya tahan terhadap penetrasi bahan-bahan yang dapat merusak beton, dapat ditentukan dari permeabilitas beton.

b. Jenis-Jenis Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton ini dapat dilakukan dengan pembasahan atau penguapan (*steam*) serta dengan menggunakan membran. Pemilihan cara mana digunakan semata-mata mempertimbangkan kemudahan pengerjaan ataupun biaya yang dikeluarkan.

1. Perawatan dengan Pembasahan

Pekerjaan perawatan dengan pembasahan ini dapat dilakukan di lab maupun lapangan dengan beberapa cara yaitu (Mulyono, 2003):

- a. Menaruh beton segar dalam ruangan yang lembap.
- b. Menaruh beton segar dalam genangan air.
- c. Menaruh beton segar dalam air.
- d. Menyelimuti permukaan beton dengan air.
- e. Menyelimuti permukaan beton dengan karung basah.
- f. Menyirami permukaan beton secara kontinyu.
- g. Melapisi permukaan beton dengan air dengan melakukan *compound*.

Cara a, b, dan c digunakan untuk contoh uji. Cara d, e, f digunakan untuk beton di lapangan yang permukaannya mendatar, sedangkan cara f dan g digunakan untuk yang permukaannya vertikal.

Dengan perawatan merendam, benda uji direndam seluruhnya dalam air yang mempunyai suhu  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  mulai pelepasan dari cetakan hingga saat pengujian dilakukan. Ruang penyimpanan harus bebas dari getaran terutama pada waktu 48 jam pertama setelah benda uji disimpan (SNI. 03-2493-1991).

2. Perawatan dengan Penguapan

Perawatan dengan uap dapat dibagi menjadi dua, yaitu perawatan dengan tekanan rendah dan perawatan dengan tekanan tinggi. Perawatan tekanan rendah berlangsung selama 10-12 jam pada suhu  $40^{\circ}\text{-}55^{\circ}\text{C}$ , sedangkan penguapan dengan suhu tinggi dilaksanakan

selama 10-16 jam pada suhu 65°-95°C, dengan suhu akhir 40°-55°C. Sebelum perawatan dengan penguapan dilakukan, beton harus dipertahankan pada suhu 10°-30°C selama beberapa jam.

Perawatan dengan penguapan berguna pada daerah yang mempunyai musim dingin. Perawatan ini harus diikuti dengan perawatan pembasahan setelah lebih dari 24 jam, minimal selama umur 7 hari, agar kekuatan tekan dapat tercapai sesuai dengan rencana pada umur 28 hari (Mulyono, 2003).

### 3. Perawatan dengan Membran

Membran yang digunakan untuk perawatan merupakan penghalang fisik untuk menghalangi penguapan air. Bahan yang digunakan harus kering dalam waktu 4 jam (sesuai *final setting time*), dan membentuk selebar film yang kontinyu, melekat dan tidak bergabung, tidak beracun, tidak selip, bebas dari lubang-lubang halus dan tidak membahayakan beton (Mulyono, 2003).

Lembaran plastik atau lembaran lain yang kedap air dapat digunakan dengan sangat efisien. Perawatan dengan menggunakan membran sangat berguna untuk perawatan pada lapisan perkerasan beton (*rigid pavement*). Cara ini harus dilaksanakan sesegera mungkin setelah waktu pengikatan beton. Perawatan dengan cara ini dapat juga dilakukan setelah atau sebelum perawatan dengan pembasahan (Mulyono, 2003).

Tipe-tipe lembaran bahan perawat beton sesuai SNI. 4817:2008, adalah sebagai berikut:

- a) Kertas biasa dan putih.
- b) Lembaran tipis *polyethylene*; bening (tembus pandang) dan putih, buram.
- c) Lembaran goni dilapisi *polyethylene* putih.

Menurut Rancangan Pedoman Teknis Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil (RPT0. ICS 93.010). Cara perawatan membran ini dapat dibagi lagi ke dalam 3 macam, yaitu:

a) Membran cair

Perawatan membran yang dilakukan dengan menyemprot perawatan cair ke permukaan beton ketika seluruh permukaan beton kering. Sebelumnya terlebih dahulu dibuka cetaknya dan *finishing* dilakukan. Jika seandainya hujan turun maka harus dibuat pelindung sebelum lapisan membran cukup kering, atau seandainya lapisan membran rusak maka harus dilakukan pelapisan ulang lagi.

b) Selimut kedap air

Metode ini dilakukan dengan menyelimuti permukaan beton dengan bahan lembaran kedap air yang bertujuan mencegah kehilangan kelembapan dari permukaan beton. Beton harus basah pada saat lembaran kedap air ini dipasang. Lembaran bahan ini aman untuk tidak terbang/pindah tertiup angin dan apabila ada kerusakan/sobek harus segera diperbaiki selama periode perawatan berlangsung.

c) *Form-In-Place*

Perawatan yang dilakukan dengan tetap mempertahankan cetakan sebagai dinding penahan pada tempatnya selama waktu yang diperlukan beton dalam masa perawatan.

4. Perawatan Lainnya

Perawatan pada beton lainnya yang dapat dilakukan adalah perawatan dengan menggunakan sinar infra merah, yaitu dengan melakukan penyinaran selama 2-4 jam pada suhu 90°C. Hal tersebut dilakukan untuk mempercepat penguapan air pada beton mutu tinggi. Selain itu

ada pula perawatan hidrotermal (dengan memanaskan cetakan untuk beton-beton pra-cetak selama 4 jam pada suhu  $65^{\circ}\text{C}$ ) dan perawatan dengan karbonisasi (Mulyono, 2003).

c. Waktu Perawatan

Waktu *curing* paling krusial adalah setelah beton mencapai *final setting* (beton telah mengeras) sampai dengan minimal 7 hari (*initial curing*). Hal ini karena selama waktu itu (*time of initial curing*) material-material pembentuk beton mengalami proses hidrasi secara aktif. Beton harus dicegah menjadi kering selama sekurang-kurangnya 5 sampai 7 hari agar diperoleh ketahanan maksimal terhadap disintegrasi/pemecahan (Murdock dan Brook, 1991). ACI 308 juga menyebutkan bahwa perawatan dilakukan paling tidak selama 7 hari (*seven days of moist curing*) (dalam Mayavani dan Habudin, 2006).

d. Pengaruh Perawatan Terhadap Kuat Tekan Beton

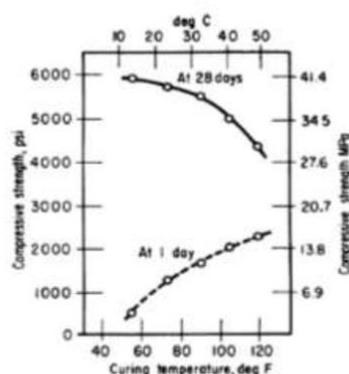


Fig. 2.1.2—Effects of curing temperature on compressive strength of concrete (Yarback and Helmuth 1963).

Gambar 2.15 Grafik Suhu *Curing* terhadap Kuat Tekan Beton (Sumber: Hemuth 1965)

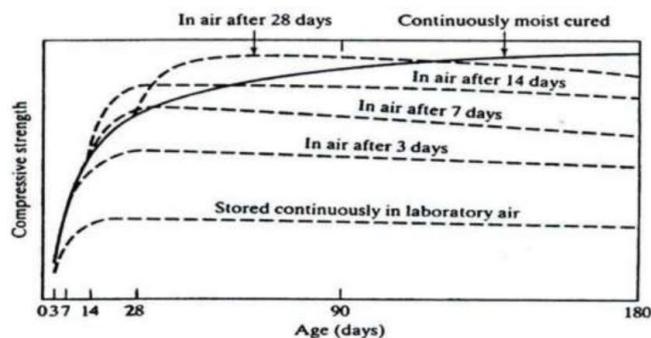
Berdasarkan ACI 305R-4 dapat diketahui bahwa kondisi suhu *curing* rendah mempengaruhi hasil uji kuat tekan beton seperti yang dapat dilihat di atas.

Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa perawatan sangat mempengaruhi kekuatan beton. Berkurangnya kekuatan beton yang tidak

mendapatkan perawatan secara baik disebabkan karena adanya retak susut, daya lekatan agregat yang lemah dan pori-pori yang berlebih sehingga beton menjadi tidak masif (Mayavani dan Habudin, 2006).

Neville, 2002 menjelaskan bahwa perkembangan yang baik dari kekuatan beton tidak hanya dipengaruhi keseluruhan semen terhidrasi, dan ini terbukti dalam praktik di lapangan. Kualitas beton juga tergantung kepada *gel/space ratio* dari pasta semen. Jika sekiranya ruang yang terisi air dalam beton segar lebih besar dari volume yang dapat diisi oleh produksi dari hidrasi, hidrasi yang lebih banyak akan menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dan permeabilitas yang lebih rendah (Mayavani dan Habudin, 2006). Kehilangan air dari beton harus diproteksi, dan selanjutnya kehilangan air secara internal oleh pengeringan sendiri harus digantikan oleh air dari luar. Pemasukan air ke dalam beton harus difasilitasi sebaik mungkin, maupun dengan mencegah penguapan seperti penggunaan membran, sehingga proses hidrasi yang terjadi pada pengikatan dan pengerasan beton sangat terbantu pengadaan airnya. Meskipun pada keadaan normal, air tersedia dalam jumlah yang memadai untuk hidrasi penuh selama pencampuran, perlu adanya jaminan bahwa masih ada air yang tertahan atau jenuh untuk memungkinkan kelanjutan proses hidrasi itu sendiri.

Penguapan dapat menyebabkan suatu kehilangan air yang cukup berarti sehingga mengakibatkan terhentinya proses hidrasi, dengan konsekuensi berkurangnya peningkatan kekuatan. Penguapan juga dapat menyebabkan penyusutan kering yang terlalu awal dan cepat, sehingga berakibat timbulnya tegangan tarik yang mungkin menyebabkan retak, kecuali bila beton telah mencapai kekuatan yang cukup untuk menahan tegangan ini. Oleh karena itu direncanakan suatu cara perawatan untuk mempertahankan beton supaya terus-menerus berada dalam keadaan basah selama periode beberapa hari atau bahkan beberapa minggu. Hal ini termasuk pencegahan penguapan dengan pengadaan beberapa selimut pelindung yang sesuai maupun dengan membasahi permukaannya secara berulang-ulang.



Gambar 2.16 Grafik Kuat Tekan Beton dalam Berbagai Perlakuan (Sumber: Neville, 2002)

Gambar 2.16 di atas menjelaskan mengenai kuat tekan beton dalam berbagai perlakuan perawatan. Terlihat jelas dari grafik bahwa beton yang tidak mendapatkan perawatan memiliki kuat tekan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan beton yang mendapatkan perawatan. Beton yang mendapatkan perawatan secara berkelanjutan akan menunjukkan grafik peningkatan kuat tekan secara terus-menerus.

## J. Susut Beton

Susut pada beton merupakan sesuatu yang tak dapat dihindari. Bagaimanapun mutunya, yang bisa dilakukan hanya mengurangi susut tersebut.

### 1. Definisi Susut pada Beton

Susut beton merupakan sifat beton yang sangat penting untuk dievaluasi. Susut merupakan sifat utama dari pasta semen beton, yaitu terjadi akibat proses hidrasi yang terjadi pada saat air bercampur dengan semen. Proses penguapan air yang bebas dari pasta semen ini terjadi saat beton mengalami proses pengeringan yang sejalan dengan proses pengerasan.

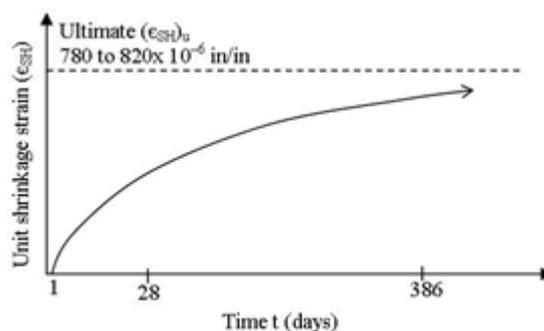
Susut yang berlebihan memiliki keterkaitan dengan retak beton, bahkan kegagalan. Pada beton usia awal, karena memiliki kuat tekan yang masih rendah maka tegangan akibat *drying shrinkage* dapat menyebabkan retak beton. Retak akibat susut ini dapat menjadi permulaan kegagalan beton

sebelum waktunya, seperti dapat menyebabkan korosi pada besi tulangan. Tidak hanya itu, pada beton pra tekan, susut beton juga menjadi salah satu faktor utama yang berkontribusi menghilangkan tekanan awal.

Pada umumnya, beton yang semakin tahan terhadap susut akan mempunyai kecenderungan rangkai yang rendah, sebab kedua fenomena ini berhubungan dengan proses hidrasi pada semen.

## 2. Mekanisme Susut

Berdasarkan mekanismenya, terdapat 4 (empat) jenis utama dari susut beton; *plastic*, *autogeneous*, *carbonation*, and *drying shrinkage*. Susut plastis (*plastic shrinkage*) terjadi karena kehilangan kelembapan dari beton sebelum beton set. Susut autogeneous terkait dengan kehilangan air dari pori-pori kapiler karena hidrasi semen (Holt, 1998). Jenis susut ini cenderung meningkat pada suhu tinggi dan jumlah semen yang besar. Namun secara umum relatif kecil dan tidak berbeda dari susut akibat pengeringan beton. Susut karbonasi (*carbonation shrinkage*) disebabkan oleh reaksi kimia dari berbagai produk hidrasi semen dengan karbondioksida bebas diudara. Susut jenis ini biasanya terjadi pada permukaan beton (Dilger, 1997). Susut pengeringan (*drying shrinkage*) didefinisikan sebagai perubahan volumerik karena beton mengering.



Gambar 2.17. Grafik regangan susut beton terhadap waktu (Sumber: Nawy, 1997)

Gambar 2.17 merupakan grafik yang terbentuk dari penambahan regangan susut beton terhadap waktu  $t$ . Gambar 2.17 juga menunjukkan pengurangan laju susut karena semakin tua umur beton maka akan semakin tahan terhadap tegangan dan semakin sedikit mengalami susut.

a. Susut plastis

Susut plastis ini terjadi beberapa jam setelah beton segar dihamparkan. Hal ini terlihat ketika terjadinya penurunan agregat dan naiknya air semen pada saat pencetakan dan umumnya tidak terjadi keretakan.

Ketika pasta semen dalam keadaan plastis, terjadi penyusutan volume air. Susut plastis disebabkan oleh hilangnya air akibat evaporasi dari permukaan beton atau akibat penyerapan beton kering di bagian sisi atau bawah permukaan beton.

Permukaan pelat lantai akan lebih mudah dipengaruhi oleh udara kering karena adanya bidang kontak yang luas. Dalam hal demikian, terjadi penguapan yang lebih cepat melalui permukaan beton. Oleh sebab itu pencegahan evaporasi setelah pencetakan beton harus dilakukan untuk mengurangi terjadinya susut.

b. Susut pengeringan

Susut pengeringan terjadi setelah beton sudah terbentuk (*setting*) dan proses hidrasi pasta semen telah selesai. Susut pengeringan akan mengurangi volume elemen beton saat terjadi kehilangan uap air karena penguapan.

Susut adalah proses yang tidak reversibel. Jika beton yang sudah mengalami susut kemudian dijenuhkan dengan air, maka tidak akan tercapai volume asalnya.

Air bebas saat pertama pencampuran, menyebabkan sedikit banyak terjadinya susut beton. Pada saat pengeringan berlangsung, penguapan terus berjalan dan perubahan volume pasta semen tidak ditahan. Pada saat itulah terjadi kehilangan air sekitar 1%, maka perubahan ukuran (dimensi) pasta semen dalam waktu pengerasan mencapai minimal 4 x 10 mm.

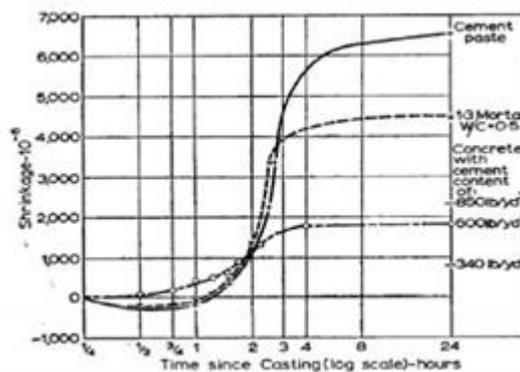
### 3. Faktor yang Mempengaruhi Susut

Komposisi beton pada dasarnya dapat didefinisikan dengan faktor air semen (FAS), jenis semen, jenis agregat serta kandungan semen dan agregat. Susut akan semakin besar dengan meningkatnya FAS dan kandungan semen. Demikian pula, semakin banyak agregat yang digunakan semakin sedikit susut yang terjadi. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya susut dapat dijabarkan sebagai berikut:

#### 1) Agregat

Agregat berperan sebagai penahan susut pasta semen. Sehingga beton dengan kadar agregat yang semakin tinggi akan mengurangi perubahan volume beton akibat susut.

Kontribusi dari agregat kasar adalah menurunkan susut beton yang mengacu kepada penurunan volume dari pasta semen pada campuran beton. Gambar 2.18. menunjukkan pengaruh dari jumlah agregat kasar terhadap susut beton pada suhu, kelembapan relatif, dan kecepatan angin yang sama dari *curing* beton.

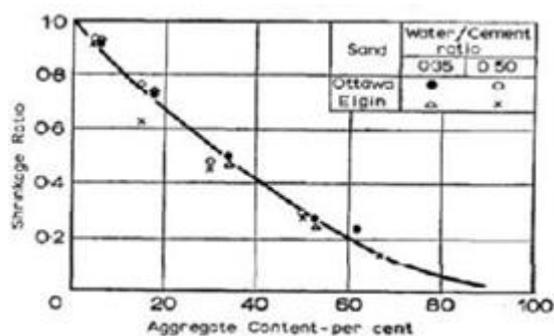


Gambar 2.18. Susut beton dengan perbedaan jumlah semen (pada suhu 20°C, kelembapan relatif 50%, dan kecepatan angin 2.25 mph)

(Sumber: Neville, 1998)

Berdasarkan Gambar 2.18. di atas, dapat dilihat pada beton usia awal, regangan beton dengan jumlah semen 850 lb/yd<sup>3</sup> atau sekitar 504 kg/m<sup>3</sup> (konten semen yang biasa) adalah hampir tiga kali lebih tinggi dari konten semen 340 lb/yd<sup>3</sup> atau sekitar 202 kg/m<sup>3</sup>.

Pengaruh kadar agregat terhadap perbandingan susut beton terhadap susut pada pasta dapat dilihat pada Gambar 2.19. Perbandingan susut meningkat secara signifikan terhadap penurunan kadar agregat.



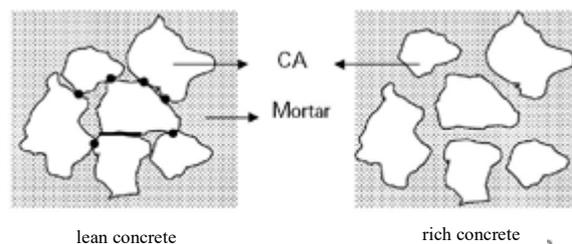
Gambar 2.19. Pengaruh kadar agregat terhadap perbandingan susut beton terhadap susut pada pasta

(Sumber: Pickett, 1956)

Alasan ini bisa dijelaskan dengan pengaruh kadar agregat terhadap regangan susut beton (Gambar 2.20). Untuk campuran *lean concrete* dengan jumlah agregat kasar yang tinggi, agregat kasar akan memiliki

kontak berupa titik-titik atau sisi-sisi antar agregat. Jadi, suatu beton dengan suatu struktur agregat akan sangat efektif menahan tegangan yang disebabkan oleh penyusutan pasta semen. Partikel agregat kasar tidak dapat didesak lebih dekat oleh tegangan interior akibat susut.

Bagaimanapun, untuk campuran beton yang “*rich*” (beton dengan jumlah semen yang banyak (sampai 15%) (Nugraha dan Antoni, 2007), terdapat jarak yang lebih besar antar partikel agregat kasar. Kondisi ini memberi beton lebih sedikit perlawanan untuk bergerak akibat susut (Gambar 2.20).



Gambar 2.20. Pengaruh kadar agregat kasar terhadap susut beton

Derajat ketahanan beton ditentukan oleh sifat dan jenis agregatnya, yaitu dengan modulus elastisitas yang tinggi atau dengan permukaan yang kasar akan lebih tahan terhadap proses susut.

Ukuran dan bentuk agregat juga berpengaruh terhadap susut pada beton keras. Indikasi dari total panjang dan kedalaman dari retak mikro disebabkan oleh susut beton yang akan meningkat seiring dengan besarnya ukuran agregat.

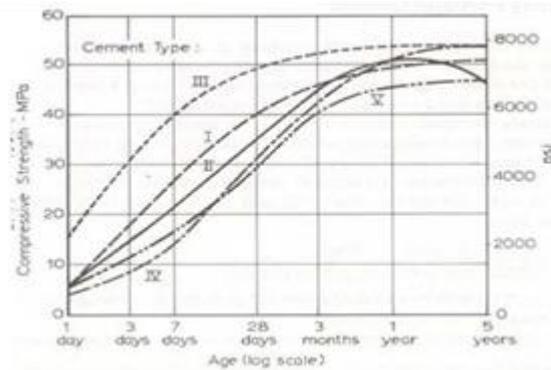
## 2) Rasio air terhadap semen

Jumlah air berpengaruh besar terhadap susut pengeringan pada pasta semen dan beton. Beton yang memiliki proporsi semen dan agregat tertentu, kelembapan konstan dengan faktor air semen yang tinggi

akan memperbesar susut. Sebaliknya, semakin kecil faktor air-semen, maka akan memperkecil susut yang terjadi (Nawy, 1997).

### 3) Jenis semen yang digunakan

Jenis semen yang digunakan ini memengaruhi panas hidrasi yang ditimbulkan (Gambar 2.21).



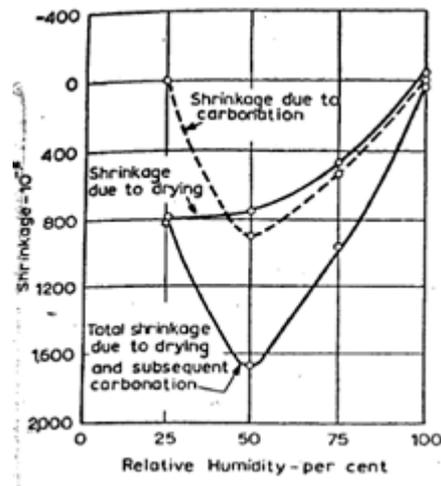
Gambar 2.21. Panas hidrasi yang ditimbulkan dari semen yang berbeda  
(Sumber: Neville, 1998)

### 4) Carbonation

Susut karbonasi disebabkan oleh adanya reaksi antara karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang ada di udara dan unsur-unsur yang ada dalam pasta semen. Besarnya karbonasi tergantung pada kadar air dari beton, kelembapan relatif dan ukuran dari agregat. Karbonasi mulai terjadi di permukaan kemudian masuk ke dalam beton tetapi sangat lambat. Besarnya karbonasi akan bertambah bersamaan dengan tingginya rasio air semen. Karbonasi dapat menyebabkan terjadinya korosi pada tulangan beton bila karbonasi mencapai permukaan tulangan beton.

Besarnya susut karbonasi bervariasi, bergantung pada urutan kejadian antara proses susut karbonasi dan susut pengeringan. Jika kedua fenomena ini terjadi bersamaan, maka susut yang terjadi lebih kecil. Berbeda dengan pada proses susut pengeringan, proses

karbonasi sangat berkurang pada kelembapan relatif di bawah 50%. (Gambar 2.22).



Gambar 2.22. Susut pengeringan dan pengarbonasian pada kelembapan berbeda (Sumber: Neville, 2005)

- 5) Ukuran elemen beton  
Kelajuan susut akan melambat dan berkurang apabila volume betonnya besar karena dibutuhkan waktu yang lebih banyak untuk mengeringkan beton.
- 6) *Chemical admixture*  
Pengaruh yang ditimbulkan sangat bervariasi, bergantung pada bahan tambahan yang digunakan. Akselerator seperti kalsium klorida digunakan untuk mempercepat proses pengerasan beton dan memperbesar susut. Sedangkan bahan air *entraining* hanya mempunyai sedikit pengaruh terhadap susut.
- 7) Penggunaan abu terbang (*fly ash*)  
Penggunaan *fly ash* saat ini menjadi sangat populer dalam dunia konstruksi. Secara umum, bahan ini dapat meningkatkan kebutuhan air dalam campuran beton

Ukuran partikel berdiameter kurang dari 1 mikron sampai 100 mikron, dengan lebih dari 20% dibawah 20 mikron. Kelas C yang *high calcium fly ash* secara kimia lebih aktif daripada Kelas F yang *low calcium fly ash*.

*Fly ash* jenis C memiliki kemampuan menurunkan susut pengeringan. Pada aplikasinya, *fly ash* dapat mereduksi kebutuhan air sehingga menurunkan susut beton.

Penggunaan *fly ash* yang tidak tepat akan dapat memicu terjadinya masalah pada struktur beton yang dihasilkan, seperti meningkatkan *drying shrinkage* (susut kering) yang mengakibatkan penurunan *durability* dan kekuatan awal yang rendah.

#### 8) Kondisi lingkungan

Faktor luar yang juga sangat mempengaruhi susut adalah temperatur udara dan kelembapan. Kelembapan relatif di sekeliling beton sangat mempengaruhi besarnya susut, laju perubahan susut semakin kecil pada lingkungan dengan kelembapan relatif tinggi. Temperatur di sekeliling juga merupakan faktor yang menentukan, yaitu susut akan tertahan pada temperatur rendah.

#### K. *Strain Gauge*

*Strain gauge* adalah salah satu sensor yang dapat membaca suatu besaran fisis seperti tekanan dan gaya. *Strain gauge* berasal dari dua kata yaitu *strain* yang artinya regangan dan *gauge* yang berarti pengukur. Jadi *strain gauge* dapat diartikan sebagai alat pengukur regangan suatu benda. Sensor *strain gauge* ini memanfaatkan perubahan resistansi sehingga dapat digunakan untuk mengukur perubahan yang sangat kecil akibat tegangan (*tensile stress*) atau peregangan (*tensile strain*). Sensor *strain gauge* berbentuk foil logam atau kawat logam yang bersifat penghantar arus listrik yang ditempel pada benda

yang akan diukur regangannya dimana besar regangan berasal dari pembebanan (Fraden, 2003). Hambatan pada *strain gauge* bervariasi mulai dari 120, 350, dan 1000  $\Omega$ .

Jenis *strain gauge* yang sering digunakan dalam dunia penelitian ialah *Vibrating Wire Embedded Strain Gauge*. VWESG digunakan sebagai pengukur perubahan regangan terhadap waktu yang dipasang pada setiap spesimen. VWESG 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%. VWESG yang digunakan adalah tipe Geokon 4200.



Gambar 2.23 Sensor *Strain Gauge*  
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

#### L. Penelitian Terdahulu

##### 1. Penelitian tentang deformasi susut pengeringan dan risiko retak pada beton perkerasan jalan yang diawetkan secara internal dengan SAP

Jingyu Yang, Yinchuan Guo, Aiqin Shen, Zhihui Chen, Xiao Qin, Ming Zhao (2019)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *curing* internal dengan SAP dapat mengurangi regangan susut pada bagian tengah dan sudut pelat perkerasan

dan disertai dengan penurunan perbedaan kelembapan antara lapisan atas, tengah, dan bawah pelat, yang sangat bermanfaat untuk menekan tegangan lengkung kelembapan pada pelat perkerasan. Pengawetan internal dengan SAP adalah yang paling efektif untuk penyusutan pelat perkerasan dalam waktu 7 hari, dan kemudian, efek anti penyusutan mulai berkurang. Setelah perawatan internal dengan SAP, risiko retak pada beton berkurang, dan keretakan dapat dihindari.

## **2. Studi eksperimental tentang hubungan antara penyusutan dan kelembapan interior beton pada usia dini**

J. Zhang, H. Dongwei dan S. Wei (2010)

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa perkembangan RH internal beton pertama-tama mengikuti tahap jenuh uap ( $RH = 100\%$ , tahap I), diikuti dengan tahap penurunan secara bertahap ( $RH < 100\%$ , tahap II). Sementara itu, deformasi global berperilaku pertama kali sebagai pembengkakan plastis selama beberapa jam pertama setelah pengecoran dan kemudian penyusutan terjadi dengan laju yang berkurang secara bertahap. Akhir dari pembengkakan biasanya sesuai dengan titik pengaturan beton, di mana pada titik tersebut transformasi beton segar dari kondisi plastis seperti cairan ke kondisi padat telah selesai. Penyusutan telah diukur bahkan pada tahap jenuh uap dengan  $RH = 100\%$ . Pada tahap pengurangan kelembapan, terdapat hubungan linier antara regangan susut bebas dan pengurangan kelembapan. Dalam prakteknya, hubungan regangan susut bebas dan RH lokal dapat digunakan untuk menghitung bidang regangan susut bebas dan selanjutnya untuk menghitung tegangan yang diakibatkan oleh penyusutan pada struktur.

### **3. Pengaruh Pengeringan Internal oleh Polimer Penyerap Super pada Penyusutan Autogenous Mortar Terak yang Diaktifkan dengan Alkali**

Pengju Wang, Wenfeng Shen, Haiming Chen, Peiyuan Chen, Jin Pan, Yangchen Xu, Hao Wang, dan Ke Cao (2020)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu setting meningkat dengan peningkatan dosis SAP karena adanya aktivator tambahan yang dilepaskan oleh SAP. Penyusutan *autogenous* menurun dengan peningkatan dosis SAP, dan dimitigasi sepenuhnya ketika dosis SAP  $\geq 0,2\%$  berat terak. Meskipun IC dengan menggunakan SAP mengurangi kuat tekan, pengurangan ini (23% pada 56 hari untuk 0,2% SAP) dapat diterima mengingat peran penting yang dimainkannya dalam mengurangi penyusutan *autogenous*. Dalam penelitian ini, dosis SAP 0,2% merupakan kandungan yang optimal. Hasil penelitian ini dapat memberikan data dan dasar untuk aplikasi praktis mortar AAS.

### **4. Regangan susut dan rangkai beton yang terpapar pada kelembapan relatif rendah dan lingkungan bersuhu tinggi**

Maya Nastic, Evan C. Bentz, Oh-Sung Kwon, Vassilis Papanikolaou, Julia Tcherer (2019)

Rangkai dan susut beton dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk kelembapan relatif dan suhu. Efek gabungan dari kelembapan relatif rendah (<20%) dan suhu tinggi (38°C) terhadap rangkai dan susut beton masih belum diketahui secara pasti karena pengujian terbatas telah dilakukan pada domain ini. Yang juga belum diketahui adalah kemampuan kode model fib MC2010 dalam memprediksi rangkai dan mulur pada lingkungan. Makalah ini menyajikan hasil eksperimen yang dilakukan di mana beton dicor dan diekspos pada kondisi lingkungan yang disebutkan

di atas. Perilaku rangkai dan susut beton diamati selama 110 hari, dan hasil eksperimen dibandingkan dengan nilai prediksi menggunakan kode model fib MC2010.

#### **5. Pengeringan susut beton usia dini untuk lintasan pelat blok kembar**

Xiao Li, Juanjuan Ren, Ji Wang, Rongshan Yang, Luhui Shi, Xueyi Liu (2020)

Hasil numerik menunjukkan bahwa: (1) Kondisi pengeringan sekitar akan menyebabkan gradien kelembapan relatif yang terlalu rendah pada permukaan lintasan, dan gradien kelembapan relatif maksimum dapat mencapai sekitar 400%/m. (2) Bantalan blok kembar yang tertanam mengurangi kontinuitas longitudinal pelat lintasan di sekitar bantalan blok kembar. Hal ini menghasilkan perpindahan yang lebih besar namun tegangan yang lebih kecil daripada daerah lain. (3) Retak yang melebar dapat dengan mudah meluas dari celah antara bantalan blok kembar dan *track slab* dalam waktu 2-3 hari setelah pengaturan awal *track slab* untuk penyusutan kimiawi. (4) 14 hari setelah penuangan *track slab*, tegangan di dalam *track slab* akan meningkat hingga 8 MPa, dan penyusutan pengeringan yang tidak seragam pada permukaan *track slab* dapat menjadi penyebab utama retakan tidak beraturan.

#### **6. Pengaruh pengawetan internal dengan polimer penyerap super terhadap kelembapan relatif beton usia dini**

Dejian Shen, Tao Wang, Ying Chen, Mingliang Wang, Guoqing Jiang (2015)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa: (1) IRH beton yang diawetkan secara internal dengan SAPs meningkat seiring dengan peningkatan kandungan air pengawetan internal 28 hari setelah pengecoran dalam

kondisi tertutup dan tidak tertutup. (2) Tingkat penurunan IRH beton yang diawetkan secara internal lebih rendah pada kondisi tertutup dibandingkan dengan kondisi tidak tertutup pada umur 28 hari setelah pengecoran. (3) Waktu kritis IRH beton yang diawetkan secara internal meningkat seiring dengan peningkatan kandungan air pengawetan internal baik pada kondisi tertutup maupun tidak tertutup. (4) Laju penurunan IRH pada beton umur muda yang diawetkan secara internal dengan SAP menurun dengan meningkatnya kandungan air pengawetan internal pada kondisi tertutup dan tidak tertutup. (5) Sebuah formula diusulkan untuk menghitung IRH beton usia dini yang diawetkan secara internal dengan SAP dengan mempertimbangkan kandungan air pengawetan internal dalam kondisi tidak disegel. Formula ini menunjukkan akurasi yang baik dari hasil eksperimen.

#### **7. Polimer penyerap super sebagai bahan pengawet internal untuk mitigasi keretakan usia dini pada dek jembatan beton berkinerja tinggi**

Bart Craeye, Matthew Geirnaert, Geert De Schutter (2011)

Untuk mencari optimalisasi proses pengawetan internal, program eksperimental ekstensif dilakukan pada HPC, dengan menggunakan tingkat pengawetan internal yang berbeda, untuk menilai sifat mekanik dan termal HPC, dan untuk mengevaluasi efektivitas pengawetan yang dilakukan. Tujuannya adalah untuk mendapatkan pengurangan penyusutan *autogenous* yang maksimal dan pengurangan kekuatan yang minimal. Efek yang dihasilkan pada risiko retak usia dini disimulasikan dengan menggunakan perhitungan elemen hingga. Simulasi juga mencakup pengembangan tegangan termal akibat panas hidrasi. Jika 70 kg/m<sup>3</sup> air *curing* internal disediakan melalui SAP, pengurangan risiko retak yang optimal terlihat, terutama disebabkan oleh pengurangan penyusutan

*autogenous* dan puncak deformasi ekspansif yang muncul secara langsung setelah setting berlangsung.

## **8. Pengaruh pengawetan internal terhadap kelembapan relatif internal dan penyusutan pelat beton mutu tinggi**

Yudong Han, Jun Zhang, Yiming Luosun, Tingyu Hao (2014)

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kelembapan relatif internal beton mutu tinggi menurun seiring dengan bertambahnya umur beton sejak pengecoran. Kecenderungan perkembangan kelembapan relatif di dalam beton seiring bertambahnya usia mengikuti tahap jenuh uap dengan kelembapan relatif 100% (tahap I) dan tahap dimana kelembapan relatif secara bertahap menurun (tahap II). Gradien kelembapan di sepanjang ketebalan pelat terdapat pada beton mutu tinggi umur awal. Ketika PSLWA ditambahkan, tingkat pengurangan kelembapan interior pada tahap II jelas berkurang dan tren pengurangan dengan usia berubah dari pola non-linear menjadi pola yang hampir linear. Durasi dari tahap I yang jenuh kelembapan internal secara nyata diperpanjang dengan penambahan PSLWA. Gradien kelembapan bersama dengan gradien penyusutan yang sesuai di sepanjang ketebalan pelat juga berkurang. Pengurangan kelembapan internal tertinggi pada 28 hari sejak pengecoran pada pelat beton mutu tinggi berubah dari 46,5% menjadi 26,2% dengan rasio penambahan PSLWA sedang, dan akhirnya menjadi 7,9% dengan tingkat penambahan PSLWA yang tinggi. Dalam rentang penambahan saat ini, semakin banyak PSLWA yang ditambahkan, semakin kuat efek *curing* internal positif di atas.

## 9. Pengaruh *curing* internal terhadap sifat umur awal beton di bawah lingkungan alami simulatif di daerah kering

Jinjun Guo, Kun Wang, Peng Zhang, Hongyin Xu (2023)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya *curing* internal melalui SAP yang dapat meningkatkan kuat tekan 28 hari karena pori-pori besar pada beton diubah menjadi pori-pori kecil dengan meningkatkan hidrasi semen. Lebih lanjut, *curing* internal dapat mengurangi sensitivitas suhu dan penyusutan *autogenous* pada beton serta meningkatkan ketahanan terhadap retak. Analisis menunjukkan bahwa kuat tekan dan penyusutan autogenik pada umur awal beton yang diawetkan secara internal sangat dipengaruhi oleh rasio air dan semen tambahan  $((w/c)_{IC})$ , keduanya menurun seiring dengan peningkatan  $(w/c)_{IC}$ . Selain itu, laju pelepasan air dari bahan pengawet internal juga mempengaruhi penyusutan *autogenous* beton dan LWA memiliki laju pelepasan air pada umur awal yang lebih tinggi daripada PC. Setelah dibandingkan, SAP lebih cocok untuk daerah kering dengan variasi temperatur yang besar dan kandungan terbaiknya adalah 0,2-0,3% dari bahan semen.

### **III METODOLOGI PENELITIAN**

#### **A. Identifikasi Masalah**

Dalam konstruksi perkerasan kaku, banyak hal yang dapat memengaruhi timbulnya kerusakan pada perkerasan kaku sehingga masa layan jalan yang direncanakan tidak tercapai. Salah satu penyebab kerusakan pada jalan beton ialah retak yang disebabkan oleh susut yang berlebihan. Dalam upaya untuk mengontrol atau menghindari terjadinya kerusakan perkerasan kaku akibat hal tersebut, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai besarnya pengaruh suhu serta kelembapan yang terjadi di lingkungan sekitar terhadap beton itu sendiri. Peningkatan pemahaman akan perilaku tersebut dapat meminimalisir terjadinya deformasi pada perkerasan kaku apabila ditangani dengan tepat.

#### **B. Lokasi dan Waktu Penelitian**

Pelaksanaan penelitian dilakukan pada Proyek Peningkatan Jalan Ruas SP. Korpri - Purwotani. Pengamatan dilakukan selama 14 hari berturut-turut yang dimulai sejak pukul 22.00 WIB.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian  
(Sumber: *google earth*)

### C. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah observasi dan wawancara. Observasi atau pengamatan langsung di lapangan dilakukan untuk mendapatkan data regangan dan suhu di dalam perkerasan kaku serta kelembapan relatif dan suhu sekitar. Wawancara yang dilakukan adalah wawancara yang tidak berstruktur, yaitu wawancara yang dilakukan tanpa ada batasan waktu dan daftar urutan pertanyaan, tetapi berpegang pada pokok penting permasalahan.

### D. Metode Pengumpulan Data dan Sumber Data

Metode penelitian yang digunakan untuk mengumpulkan data adalah penelitian dokumen yaitu dengan teknik pengambilan data di lapangan berupa pengamatan langsung untuk diolah kembali yaitu:

#### a. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh di lapangan, berupa data beton dan lingkungan. Yaitu regangan, suhu, dan kuat tekan pada beton serta suhu

dan kelembapan relatif pada lingkungan. Pencatatan akan dilakukan oleh peneliti.

b. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari pihak pelaksana pekerjaan konstruksi serta *batching plant*. Data-data sekunder itu berupa *job mix formula*, *shop drawing* dan hasil uji sampel.

E. Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif. Metode penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menekankan pada aspek pengukuran secara objektif pada penjelasan deskriptif terhadap permasalahan yang sedang diteliti. Tujuan dari penelitian kuantitatif adalah untuk mencari hubungan antar variabel seperti pada penelitian survei ataupun kelompok-kelompok tertentu yang berkaitan dengan hasil penelitian, untuk memperoleh wawasan terhadap suatu topik atau permasalahan tertentu yang dieksplorasi untuk mengetahui alasan yang mendasari permasalahan tersebut.

F. Prosedur Penelitian

Tahap dan prosedur penelitian dilakukan secara sistematis. Adapun tahap dan prosedur penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Tahap Persiapan.

Langkah yang dilakukan dalam tahap ini yaitu merumuskan masalah penelitian, tujuan penelitian, dan menggali kepustakaan serta pembuatan daftar pertanyaan yang akan ditanyakan dalam penelitian agar dapat berjalan lancar.

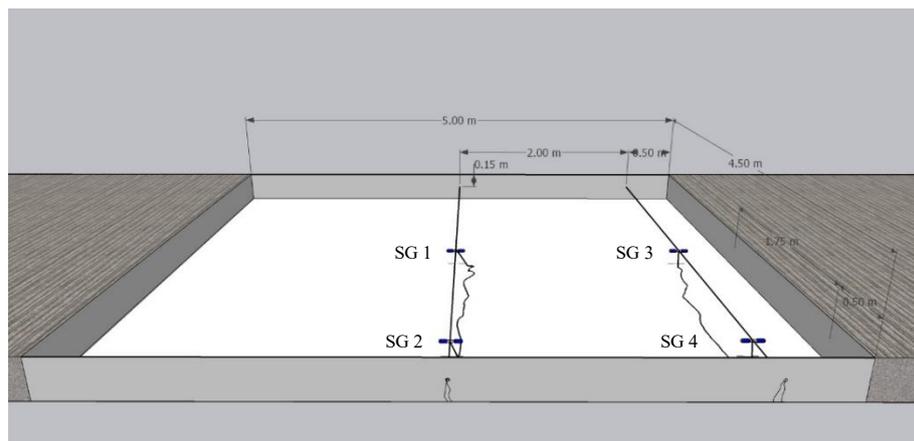
b. Tahap Pengumpulan Data

Tahap survei lapangan dan pengumpulan data. Langkah yang dilakukan dalam tahap ini adalah:

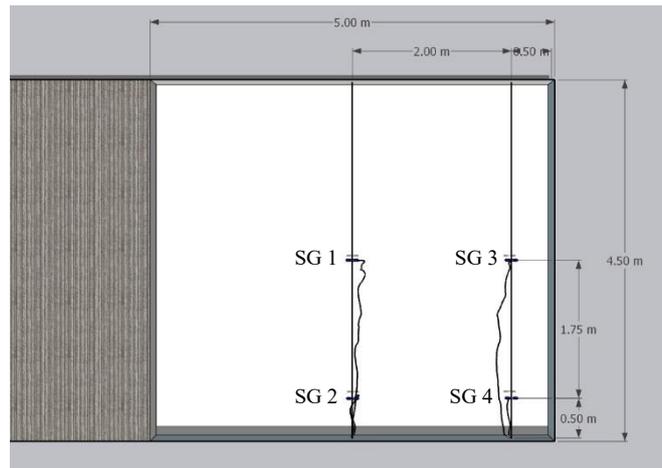
1. Survei lapangan untuk melihat apakah proyek yang ada memenuhi syarat untuk dijadikan lokasi penelitian serta melakukan proses perizinan kepada pelaksana atau pemilik proyek.
2. Tipe wawancara yang dilakukan adalah wawancara tidak berstruktur yaitu wawancara yang dilakukan tanpa ada batasan waktu dan daftar urutan pertanyaan, tapi berpegang pada pokok penting permasalahan yang sesuai dengan tujuan wawancara.
3. Menentukan zona yang akan diamati, pengumpulan data yang diperlukan untuk mendukung penelitian dengan wawancara langsung di lapangan.

c. Tahap Penelitian

Penelitian dilakukan ditengah-tengah pelaksanaan pengecoran perkerasan kaku berlangsung. Alat dipasang ketika bekisting, plastik, profil kayu siku dan dowel sudah ter-*install*. Penempatan posisi *strain gauge* pada segmen yang hendak diteliti dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Posisi penempatan *strain gauge*



Gambar 3.3 Tampak atas segmen penelitian

Keterangan =

SG 1 = Bagian Tengah Segmen      SG 3 = Sisi Pendek Segmen  
 SG 2 = Sisi Panjang Segmen      SG 4 = Bagian Sudut Segmen

*Strain gauge* diposisikan di setengah tebal jalan beton yaitu 15 cm dari permukaan *lean concrete*. Agar posisi *strain gauge* tepat di tengah tebal perkerasan, *strain gauge* digantung menggunakan benang nilon yang terikat di bagian bekisting dan *tiebar*. Sebelum melakukan pengecoran, peneliti melakukan *briefing* kepada pekerja mengenai teknis pemasangan alat. Pengecoran dilakukan secara perlahan, sampai beton sudah setinggi setengah tebal perkerasan. Ketika beton sudah menyentuh *strain gauge*, benang digunting tepat pada alat. Sehingga *strain gauge* benar-benar mendeteksi regangan maupun suhu beton saja.

Pengamatan susut beton dapat dilihat pada alat *readout* yang tersambung dengan VWESG yang tertanam pada beton. Sedangkan untuk pembacaan temperatur dan RH di sekeliling beton menggunakan alat termometer digital dan *hygrometer*.

Tabel 3.1 Rentang Waktu Pengamatan Segmen Penelitian

Hari ke-	Pembacaan setiap
1	15 menit
2	1 jam
3-7	2 jam
8-14	12 jam

Penyemprotan *curing compound* dilakukan setelah permukaan beton sudah cukup keras dan tekstur sudah dibentuk. Pekerjaan ini dilakukan untuk melindungi beton dari retak-retak rambut akibat terlalu cepatnya susut beton.

Pengecoran selesai dilakukan pukul 22.00. Setelah itu dilakukan penyemprotan *curing compound* pada pukul 23.00. Bekisting dibongkar pada keesokan harinya pukul 09.20. *Cutting* beton dilakukan pada pukul 09.35. *Geotextille* dipasang pukul 11.30. Empat hari berikutnya, tepatnya pukul 08.00 pagi *joint sealent* diberikan pada perkerasan kaku.

Perawatan beton dilakukan pada umur 1 s/d 14 hari, dengan menutup permukaan beton memakai *geotextile non-woven* yang dibasahi secara periodik yakni dilakukan setiap 30 menit sampai 2 jam tergantung cuaca di lokasi penelitian. Hal ini juga untuk mencegah retak rambut beton akibat susut yang terlalu cepat.

d. Tahap analisis data.

Adapun langkah yang dilakukan dalam tahap ini yaitu menganalisis data penelitian dengan menggunakan analisis deskripsi hasil pengamatan. Data dari tiga sampel benda uji 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 pada kasus dimana ingin menghindari perhitungan deviasi standar atau dimana penilaian cepat diperlukan (Niken dkk., 2017).

Tahap awal dilakukan dengan menyusun data dari urutan terendah ( $X_1$ ) hingga tertinggi ( $X_n$ ). Berdasarkan jumlah data, 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. Data masing-masing kelompok diolah untuk mendeteksi penerimaan data terendah dan data tertingginya. Persamaan kriteria *dixon* untuk 3-7 sampel dengan  $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$  adalah sebagai berikut:

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

Jika  $D_{hitung} > D_{tabel}$ , maka data tersebut merupakan data terpencil dan dapat dibuang. Hal tersebut dilakukan terhadap data selanjutnya hingga tidak ada lagi data pencilan. Data regangan atau data suhu dalam beton adalah nilai rata-rata data yang diterima.

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

- Perhitungan kuat tekan beton menggunakan uji *hammer* dilakukan saat umur beton 14, 28, 56, dan 90 hari menggunakan kriteria *dixon*.
- Berdasarkan pengamatan susut yang telah dilakukan disajikan dalam bentuk grafik sampai dengan umur beton 14 hari.
- Analisis data hasil pembacaan temperatur dan RH pada sekeliling beton.
- Analisis data pengamatan benda uji dan dibandingkan dengan data temperatur dan RH sekeliling beton.
- Membandingkan dengan penelitian sebelumnya.

- e. Tahap pembahasan hasil analisis data.

Langkah yang dilakukan adalah melakukan pembahasan dari hasil penelitian terhadap penyusutan yang terjadi pada perkerasan kaku usia dini untuk mendapatkan kesimpulan.

#### G. Alat Bantu Pendukung Pengumpulan Data

Alat bantu yang mendukung dalam pengumpulan data yang digunakan oleh peneliti yaitu:

- a. *Vibrating Wire Readout* Geokon-404 untuk membaca hasil regangan dan suhu pada kawat getar yang tertanam dalam beton.



Gambar 3.4 *Vibrating Wire Readout*

- b. *Vibrating Wire Embedded Strain Gauge* (VWESG) digunakan sebagai pengukur regangan dan suhu terhadap waktu pada tiap titik uji sampel.



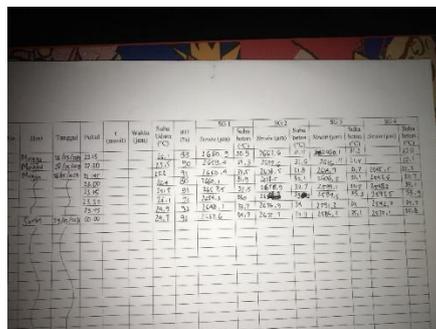
Gambar 3.5 *Vibrating Wire Embedded Strain Gauge*

- c. *Thermometer hygrometer* untuk mengukur temperatur dan kelembapan relatif lingkungan sekitar.



Gambar 3.6 *Thermometer hygrometer*

- d. Lembar pemantauan untuk mencatat hasil penelitian.



Gambar 3.7 Lembar pemantauan

- e. Meteran untuk mengukur jarak atau panjang.



Gambar 3.8 Meteran

- f. *Smartphone* untuk penyetelan *alarm* dan dokumentasi



Gambar 3.9 *Smartphone*

- g. Plastik sebagai pembungkus bagian ujung kabel saat hujan turun.



Gambar 3.10 Plastik

- h. Benang nilon sebagai tempat menggantung *strain gauge* saat dipasang dalam sampel.



Gambar 3.11 Benang nilon

- i. Laptop sebagai alat proses pengolahan data.



Gambar 3.12 Laptop

- j. *Hammer test* merupakan metode pengujian kuat tekan beton yang bertujuan untuk memperkirakan nilai kuat tekan beton terpasang didasarkan pada kekerasan permukaan beton.



Gambar 3.13 *Hammer test*

- k. *Frame uji hammer* digunakan sebagai alat bantu untuk menentukan daerah yang dipilih sebagai titik pengujian.

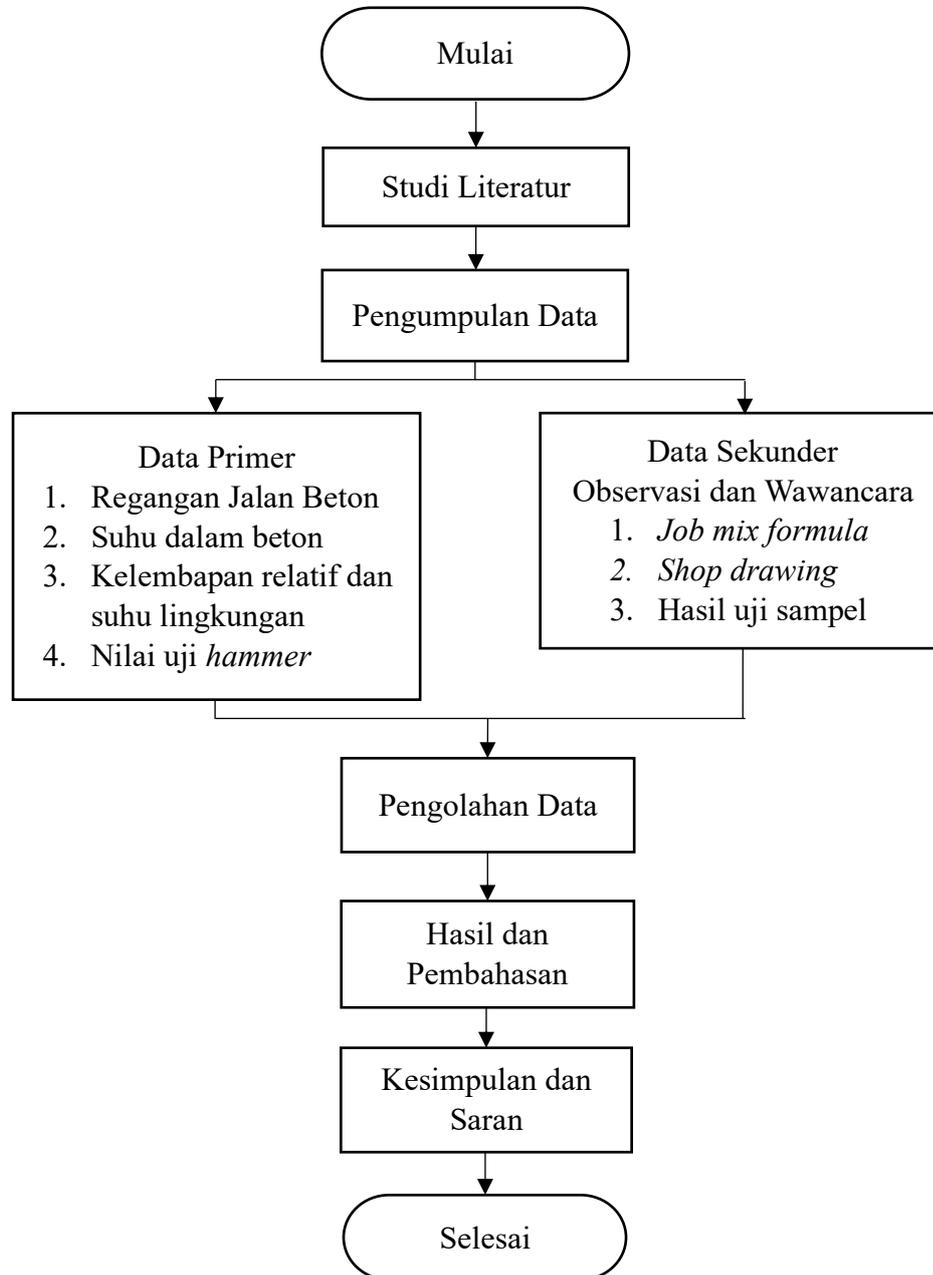


Gambar 3.14 *Frame uji hammer*

- l. Obeng digunakan untuk mengencangkan dan mengendurkan baut.
- m. Gunting digunakan untuk memotong benang nilon saat pemasangan alat dalam sampel uji.
- n. Payung sebagai pelindung dari cuaca yang berubah-ubah.
- o. Alat tulis dan alat bantu lain.

#### H. *Flow Chart* Penelitian

Secara garis besar metode penelitian dapat digambarkan dalam bentuk *flow chart* atau bagan alir penelitian seperti berikut:



Gambar 3.15 *Flow chart* penelitian

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian Penyusutan Perkerasan Kaku pada Usia Dini dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Deformasi beton yang terjadi pada perkerasan kaku di Indonesia dari yang terbesar hingga yang terkecil secara berurutan dimulai dari bagian tengah, bagian sisi panjang, bagian sisi pendek, lalu bagian sudut segmen.
2. Proses awal pembentukan beton atau pengerasan beton sangat mempengaruhi laju perubahan susut yang terjadi pada seluruh bagian segmen yang diteliti.
3. Suhu dan kelembapan relatif lingkungan memiliki pengaruh terhadap deformasi, saat suhu tinggi maka kelembapan relatif rendah sehingga beton mengalami susut. Begitupula sebaliknya, saat suhu rendah maka kelembapan relatif tinggi sehingga beton mengalami kembang.
4. Deformasi yang terjadi pada bagian tengah dan sisi pendek segmen lebih kecil dibandingkan dengan deformasi pada sisi panjang dan bagian sudut segmen. Hal tersebut terjadi karena bidang yang bersinggungan langsung terhadap lingkungan sekitar, pada bagian tengah dan sisi pendek segmen lebih sedikit dibandingkan sisi panjang dan bagian sudut.
5. Susut yang terjadi pada seluruh bagian segmen perkerasan lebih kecil dibandingkan susut menurut ACI 209R-92, hal ini disebabkan oleh material penyusun beton yang berbeda dan perbedaan iklim.

## B. Saran

Berdasarkan penelitian Penyusutan Perkerasan Kaku pada Usia Dini diperoleh saran sebagai berikut.

1. Survei sehari sebelum dilakukan penanaman alat perlu dilakukan, agar peneliti dapat menentukan metode yang sesuai dengan keinginan serta tidak menghalangi pelaksanaan pekerjaan.
2. Akses untuk melihat secara langsung proses pengujian sampel perlu diperoleh.
3. *Thermometer hygrometer* diletakkan pada tempat yang bersinggungan langsung dengan udara sekitar namun tetap terlindungi dari paparan sinar matahari secara langsung.
4. Proses pengamatan dan pengukuran dapat dengan mudah bila dilakukan sekurang-kurangnya oleh dua orang.
5. Kendaraan yang melaju kencang saat berada di lokasi perlu diwaspadai saat pengambilan data.

## DAFTAR PUSTAKA

- 305R-10, A. (2010). *Guide to Hot-Weather Concreting*. American Concrete Institute: Farmington Hills.
- 308R-16, A. C. (2016). *Guide to External Curing of Concrete*. Michigan: American Concrete Institute.
- AASHTO, 1993, *Guide for Design of Pavement Structure*, Washington D.C, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACPA. (American Concrete Pavement Association). 2016. "Concrete Pavement Basics"
- ASTM C 78-02. 2002. *Standard Test Method For Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Third -Point Loading)*. ASTM International, Philadelphia 19428-2959 United States.
- A.S. Al-Gahtani, Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes, *Constr. Build. Mater.* 24 (3) (2010) 308–314, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.036>.
- Azanurfauzi. (2010, Juni 13). *Dunia Teknik Sipil*. Retrieved from Blogspot.com: <http://azanurfauzi.blogspot.com/2010/06/rigid-pavement.html>. Diakses pada tanggal 10 Juli 2023.
- BSN. 2000. SNI 03-6388-2000 Spesifikasi Agregat Lapis Pondasi Bawah. Jakarta: BSN
- Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)*. (2016, Oktober 4). Retrieved from [wikipave.org](https://wikipave.org): <https://wikipave.org>
- Craeye, B., Geirnaert, M., & De Schutter, G. (2011). Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. *Construction and building materials*, 25(1), 1-13.

- Dilger, W.H. and Wang, C., Shrinkage and Creep of High-Performance Concrete (HPC) – A critical Review
- Direktorat Jendral Bina Marga, Petunjuk Teknis Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil, Pedoman Pemanfaatan Asbuton, No.001/BM/2006.
- E. Holt, M. Leivo, Cracking risks associated with early age shrinkage Cement and concrete composites Volume 26, Issue 5, July 2004, Pages 521-530
- G. Pickett, ACI Journ., Proc. 52, 581 (1956).
- Ghazali, S. (2017, Maret 24). *Pd t 14-2003 - Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*. Retrieved from Slide Share: <https://www.slideshare.net/AndaliSaja/pd-t-142003-perencanaan-perkerasan-jalan-beton-semen-73581543>. Diakses pada tanggal 10 Juli 2023.
- Guo, J., Wang, K., Zhang, P., & Xu, H. (2023). Effect of internal curing on early-age properties of concrete under simulative natural environment in arid regions. *Construction and Building Materials*, 362, 129697.
- H, M. H. (2019). *Download Kumpulan SNI Teknik Sipil Lengkap dan Terbaru*. Retrieved from Ilmu Beton: <https://www.ilmubeton.com>. Diakses pada tanggal 10 Juli 2023.
- Han, Y., Zhang, J., Luosun, Y., & Hao, T. (2014). Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 61, 41-49.
- Holt, E. a. (1998). *Influence of Early Age Volume Changes on Long-Term Concrete Shrinkage*. Washington, D.C: Transportation Research Board.
- Ii, B. A. B. (2008). (Sumber: [lensateknik.blogspot.com](http://lensateknik.blogspot.com)) 4. 4-22.
- J. Shi, B. Liu, F. Zhou, S. Shen, J. Dai, R. Ji, J. Tan, Heat damage of concrete surfaces under steam curing and improvement measures, *Constr. Build. Mater.* 252 (2020) 119104, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119104>.
- Jacob, F. (2003). *Handbook of Modern Sensors, Physics, Design and Applications (Third Edition)*. San Diego: AIP Press.

- Li, X., Ren, J., Wang, J., Yang, R., Shi, L., & Liu, X. (2020). Drying shrinkage of early-age concrete for twin-block slab track. *Construction and Building Materials*, 243, 118237.
- M. Deghfel, A. Meddah, M. Beddar, M.A. Chikouche, Experimental study on the effect of hot climate on the performance of roller-compacted concrete pavement, *Innov. Infrastruct. Solut.* 4 (2019) 1–12, <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0246-8>.
- Mayavani, C. d. (2006). Pengaruh Perawatan Beton Terhadap Kuat Tekan Dan Absorpsi Beton K-300. *Skripsi Program Studi Teknik Sipil Universitas Diponegoro*.
- Mulyono, T. (2003). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: CV Andi Offset.
- Murdock, L. d. (1991). *Bahan dan Praktek Beton, Edisi Keempat, Terjemahan oleh Stephanus Hindarko*. Jakarta: Erlangga.
- N.P. Tran et al., A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials *J Build Eng* Volume 38, June 2021, 102210
- Nasional, B. S. (1990). *SNI-03-1974-1990, Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Jakarta: BSN.
- Nasional, B. S. (2002). *SNI 03-2491-2002: Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton*. Bandung: BSN.
- Nastic, M., Bentz, E. C., Kwon, O. S., Papanikolaou, V., & Tchner, J. (2019). Shrinkage and creep strains of concrete exposed to low relative humidity and high temperature environments. *Nuclear Engineering and Design*, 352, 110154.
- Nawy, Edward G., *Beton Bertulang (Suatu Pendekatan Dasar)* (Bambang Suryatmono, Penerjemah). (n.d)
- Nawy, E. (1997). *Concrete Construction Engineering*. New York: CRC Press.
- Neville, A. (2002). *Properties of Concrete, Fourth Edition*. England: Pearson Education, Harlow.
- Neville, A. M. (2005). *Properties of Concrete 4th Edition*. London: Prentice Hall.
- Neville, A.M., *Properties of Concrete. Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.

- Niken, C., Elly Tjahjono, E., & FX Supartono, S. (2017). Long-term deformation of beam and column of high-performance concrete. *International Journal of Technology*, 8(5), 811-819.
- Nugraha, A. d. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: C.V Andi Offset.
- Nursyamsi. (2005). Pengaruh Perawatan Terhadap Daya Tahan Beton. *Jurnal Teknik Sipil. Vol. 4 No. 2*, 317-322.
- Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*. (2003). Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah.
- R. Wasserman, A. Bentur, Efficiency of curing technologies: Strength and durability, *Mater. Struct. Constr.* 46 (11) (2013) 1833–1842, <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0021-9>.
- Shen, D., Wang, T., Chen, Y., Wang, M., & Jiang, G. (2015). Effect of internal curing with super absorbent polymers on the relative humidity of early-age concrete. *Construction and Building Materials*, 99, 246-253.
- SNI 03-2491-2002 Metode Pengujian Kuat Tarik/Belah Beton, Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03-1743-1989, Cara Uji Kepadatan Berat Untuk Tanah.
- SNI 03-1737 (1989). Tata Cara Pelaksanaan Lapis Tipis Beton Aspal Untuk Jalan Raya: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03-1744-1989, 1989, Metode Pengujian CBR Laboratorium
- SNI.S-03-2493-1991. Metode Pembuatan dan Perawatan Contoh Benda Uji Beton di Laboratorium
- UM JY (2000). Methodology for Constraining Asphalt Concrete Overlay Against Reflection Cracking, Research Paper, Korea Expressway Corporation.
- Umum, D. P. (2011). *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan SNI 03-4431-2011*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Wang, P., Chen, H., Chen, P., Pan, J., Xu, Y., Wang, H., ... & Cao, K. (2020). Effect of internal curing by super absorbent polymer on the autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars. *Materials*, 13(19), 4318.
- Yang, J., Guo, Y., Shen, A., Chen, Z., Qin, X., & Zhao, M. (2019). Research on drying shrinkage deformation and cracking risk of pavement concrete

internally cured by SAPs. *Construction and Building Materials*, 227, 116705.

Yang SC, Park GH, Kwon SM (2000). Construction Trends of Korea Concrete Pavement. Korean Society of Road Engineers, Vol. 2, No. 3, pp.11-23.

Zanius. (2012, Maret 8). *Teknik Sipil*. Retrieved from Blogspot.com: <http://zanius.blogspot.com/2012/03/perkerasan-jalan.html>. Diakses pada tanggal 10 Juli 2023.

Zhang, J., Dongwei, H., & Wei, S. (2010). Experimental study on the relationship between shrinkage and interior humidity of concrete at early age. *Magazine of Concrete Research*, 62(3), 191-199.