

**ANALISIS PENGGUNAAN TULANGAN *WIREMESH*
TERHADAP DEFORMASI PERKERASAN KAKU USIA DINI**

(Skripsi)

**Oleh
INDAH SUCI CAHYANI
2015011076**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS PENGGUNAAN TULANGAN WIREMESH TERHADAP DEFORMASI PERKERASAN KAKU USIA DINI

Oleh

INDAH SUCI CAHYANI

Perkerasan kaku adalah suatu perkerasan jalan yang menggunakan beton sebagai bahan utamanya. Namun, karena material utamanya adalah beton maka pengaruh kembang-susut menjadi salah satu faktor kinerja. Apabila beton tidak mampu menahannya, ikatan menjadi putus sehingga mengurangi kekuatan dan stabilitas jalan serta mempengaruhi kualitas kenyamanan lalu lintas. Karenanya diperlukan perlakuan yang sesuai untuk meningkatkan kemampuan beton dalam berdeformasi. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh pemasangan *wiremesh* terhadap deformasi beton pada perkerasan kaku saat usia dini. Variabel yang diteliti meliputi perkerasan kaku menggunakan *wiremesh* yang dipasang di sudut karena banyak kerusakan terjadi di bagian sudut. Uji yang dilakukan meliputi uji kuat tekan dan uji susut. Sampel uji kuat tekan berupa beton kubus dengan dimensi 15 cm × 15 cm × 15 cm sebanyak 3 buah. Diuji pada umur 24 jam kemudian dianalisis menggunakan metode *dixon*. Sampel uji susut berupa perkerasan kaku berukuran 5 m × 4,5 m × 0,3 m. Pengamatan pada uji susut dilakukan selama 24 jam dengan pembacaan setiap 15 menit. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata kuat tekan beton pada umur 1 hari sebesar 14,64 MPa atau 28,25% dari kekuatan rencana mutu beton. Pemasangan tulangan *wiremesh* pada perkerasan kaku tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan pada 5 jam pertama. Namun, sejak 6 jam mulai terlihat perbedaan deformasi antara perkerasan kaku dengan dan perkerasan kaku tanpa *wiremesh*. *Wiremesh* mampu mengurangi susut rata-rata 10,91%. Deformasi usia dini terutama disebabkan oleh reaksi kimia, dan menentukan deformasi selanjutnya.

Kata kunci: Beton, Deformasi, Usia Awal, Perkerasan Kaku, *Wiremesh*

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE USE OF WIREMESH REINFORCEMENT ON EARLY AGE RIGID PAVEMENT DEFORMATION

By

INDAH SUCI CAHYANI

Rigid pavement is a pavement that uses concrete as main material. However, since the main material is concrete, the influence of shrinkage is one of the performance factors. If the concrete is unable to withstand it, the bond is broken, which reduces the strength and stability of the road and affects the quality of traffic comfort. Therefore, appropriate treatment is needed to improve the deformability of concrete. This study aims to determine the effect of wiremesh installation on concrete deformation in early age rigid pavement. The variables studied include rigid pavement using wiremesh installed at corners because a lot of damage occurs at the corners. The tests carried out include compressive strength test and shrinkage test. The compressive strength test sample is a concrete cube with dimensions of 15 cm × 15 cm × 15 cm as many as 3 pieces. Tested at the age of 24 hours and then analyzed using the Dixon method. The shrinkage test sample was a rigid pavement measuring 5 m × 4.5 m × 0.3 m. Observations on the shrinkage test were made for 24 hours with readings every 15 minutes. The results showed that the average compressive strength of concrete at the age of 1 day was 14.64 MPa or 28.25% of the strength of the concrete quality plan. The installation of wiremesh in rigid pavement did not show a significant effect in the first 5 hours. However, since 6 hours, the difference in deformation between rigid pavement with and rigid pavement without wiremesh began to be seen. Wiremesh was able to reduce shrinkage by an average of 10.91%. Early age deformation is mainly caused by chemical reactions, and determines subsequent deformation.

Key words: Concrete, Deformation, Early Age, Rigid Pavement, Wiremesh

**ANALISIS PENGGUNAAN TULANGAN *WIREMESH*
TERHADAP DEFORMASI PERKERASAN KAKU USIA DINI**

**Oleh:
INDAH SUCI CAHYANI
2015011076**

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **ANALISIS PENGGUNAAN TULANGAN
WIREMESH TERHADAP DEFORMASI
PERKERASAN KAKU USIA DINI**

Nama Mahasiswa : **Indah Suci Cahyani**

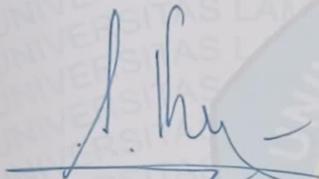
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011076

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



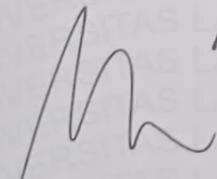
Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU, M.T.
NIP 195806131984032003



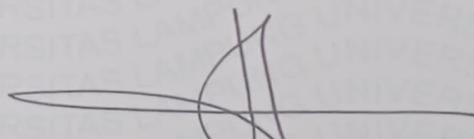
Dr. Eng. Ir. Ratna W., S.T., M.T., IPM.
NIP 197106051995122000

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil



Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 196911112000031002

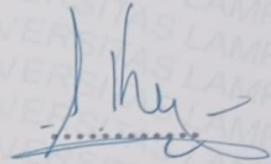


Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 197412252005011003

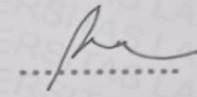
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

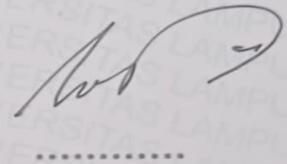
Ketua : **Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU, M.T.**



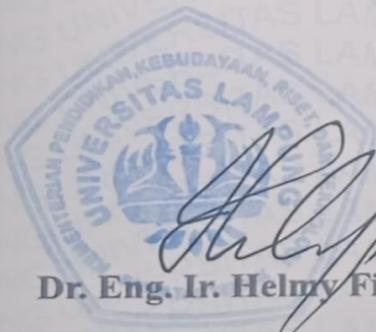
Sekretaris : **Dr. Eng. Ir. Ratna W., S.T., M.T., IPM.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Ir. Laksmi Irianti, M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **15 Juli 2024**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : **INDAH SUCI CAHYANI**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015011076**

Judul : **ANALISIS PENGGUNAAN TULANGAN
WIRESH TERHADAP DEFORMASI
PERKERASAN KAKU USIA DINI**

Jurusan : **Teknik Sipil**

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah karya penulisan ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 16 Juli 2024
Penulis,



INDAH SUCI CAHYANI
NPM. 2015011076

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Indah Suci Cahyani merupakan anak pertama dari Bapak Irwan dan Ibu Wahdiana. Penulis dilahirkan di Tangerang pada tanggal 9 Juli 2002. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN 2 Cikupa dan lulus pada tahun 2014 kemudian melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Cikupa dan lulus pada tahun 2017. Setelah itu, melanjutkan ke Sekolah Menengah Atas di SMAN 2 Kab. Tangerang dan lulus pada tahun 2020. Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di beberapa organisasi yakni: sebagai anggota bidang Kaderisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) dan anggota bidang Kaderisasi Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI-FT) pada tahun 2021 sampai 2022. Pada tahun 2023 penulis menjabat sebagai staff ahli bidang Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) Universitas Lampung dan sebagai sekretaris departemen pembinaan Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI-FT). Pada tahun 2023 penulis aktif sebagai Dewan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik (DPM-FT) dan menjabat sebagai Kepala Komisi II Bidang Advokasi dan Perundang-Undangan.

Penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada tahun 2023 di Desa Way Batang, Kecamatan Lemong, Kabupaten Pesisir Barat, Lampung dan penulis melakukan Kerja Praktik (KP) di Proyek pembangunan jembatan way sekampung (lama) yang menghubungkan kecamatan Natar dan Kecamatan Tegineneng.

PERSEMBAHAN

Puji Syukur kepada Allah SWT, karena atas limpahan berkah, rahmat, dan karunia-Nya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Ku persembahkan karya ku ini kepada:

Ayah dan Ibu tercinta atas semua pengorbanan dan tulus kasih yang selalu mendukung, membimbing, mendoakan, memberi semangat, memotivasi dan hal lainnya yang tak dapat kuungkapkan dengan kata-kata.

Nenek tersayang yang juga tak lupa mendoakan, memberikan curahan kasih dan sayang serta motivasi tiada henti yang sangat besar bagi penulis.

Adik-adikku yang banyak membantu, menemani dan memotivasi agar aku bisa mencapai semua mimpi ku selama ini.

Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat berjasa yang selalu membimbing dan mendidikku untuk segera menyelesaikan kewajibanku.

Sahabat dan teman-temanku. Terimakasih karena selalu menemani, mendukung dan memotivasiku selama ini untuk menjadi manusia terbaik dalam hidupku.

Almamaterku Universitas Lampung

KATA INSPIRASI

“Ketika kamu ikhlas menerima semua kekecewaan hidup, maka Allah akan membayar tuntas kekecewaan dengan beribu-ribu kebaikan.”

(Ali bin Abi Thalib)

“Merusak sayap orang lain tidak akan menambah ketinggian terbang kita. Mematahkan dayung orang lain juga tidak akan menambah kecepatan laju perahu kita.”

(M. Afiffudin Diyathi)

"Kapan dan di manapun kalian semai kebaikan, suatu saat pasti akan kalian tuai hasilnya. Tidak di dunia, di akhirat."

(M. Abduh Yazid)

"Jika kamu menginginkan sesuatu yang belum pernah dimiliki dalam hidupmu, kamu harus melakukan sesuatu yang belum pernah dilakukan sebelumnya."

(Unknown)

"Hidup hanya sekali. Hiduplah yang dahsyat."

(Tung Desem Waringin)

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan karunia serta anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Analisis Pengaruh Penggunaan Tulangan *Wiremesh* Terhadap Deformasi Perkerasan Kaku Usia Dini” dengan tepat waktu. Dalam menyelesaikan skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan, dukungan, bimbingan, dan pengarahan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi S-1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Chatarina Niken DWSBU, M.T., selaku dosen Pembimbing Utama yang memberikan bimbingan, pengarahan dan saran kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Ratna Widyawati, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng., selaku Pembimbing Kedua yang memberikan motivasi, saran dan membimbing penulisan skripsi.
6. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Pembahas atas kesediaannya memberikan kritik dan saran bagi perbaikan skripsi.
7. Bapak Dr. Ir. Endro Prasetyo Wahono, S.T., M.Sc., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan bimbingan dan arahan selama perkuliahan.
8. Sahabat saya (Siti Usnul Khotimah, Siti Mahardika dan Yoga Pradana) yang telah bersedia menjadi tempat berkeluh-kesah penulis serta selalu mendukung dan saling menguatkan.

9. Rekan-rekan penelitian (Faza, Hadi, Aufal, Iswadi, Dimas) yang telah berjuang dan bekerjasama dalam menyelesaikan penelitian ini.
10. Rekan-rekan PT. Maricuan Sentosa (Akbar, Meida, Rama), rekan-rekan Keluarga Cemara dan Slebew yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu, yang sudah selalu memberikan kebahagiaan dan bantuan serta saling mengajarkan selama perkuliahan.
11. Seluruh rekan mahasiswa Jurusan Teknik Sipil UNILA angkatan 2020 (BRINGAS20) yang telah membantu penulis dalam penulisan skripsi ini.
12. *Last but not least, I wanna thank me, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me for just being me at all times.*

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, 11 Juli 2024
Penulis,

Indah Suci Cahyani

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Kegiatan	3
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Beton	6
2.2 Sifat-Sifat Beton.....	9
2.3 Perkerasan Kaku.....	13
2.3.1 Kriteria perkerasan kaku jalan raya.....	14
2.3.2 Standar perkerasan jalan raya.....	14
2.4 Deformasi.....	15
2.5 <i>Embedded Vibrating Wire Strain Gauge</i>	21
2.5.1 Jenis-jenis <i>strain gauge</i>	22
2.5.2 <i>Data Strain gauge</i>	23
2.5.3 Prinsip Kerja <i>Strain Gauge</i>	23
2.6 <i>Wiremesh</i>	25
2.7 Penelitian Sebelumnya	27

III. METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1 Lokasi Penelitian.....	35
3.2 Persiapan Alat dan Bahan.....	35
3.3 Pembuatan Benda Uji.....	40
3.4 Metode Pengamatan Deformasi	42
3.5 Analisis Data Penelitian	42
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	45
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Pelaksanaan Penelitian	46
4.2 Analisis Kuat Tekan Beton.....	47
4.3 Analisis Deformasi Beton	48
4.3.1 Deformasi Beton pada Perkerasan Kaku Menggunakan <i>Wiremesh</i>	49
4.3.2 Deformasi Beton pada Perkerasan Kaku Tanpa <i>Wiremesh</i> ..	50
4.3.3 Perbandingan Deformasi Beton Pada Perkerasan Kaku Menggunakan <i>Wiremesh</i> dan Tanpa <i>Wiremesh</i>	54
V. PENUTUP	58
5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	60

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Lapisan perkerasan kaku	14
2.3. Hubungan umum antara definisi penyusutan kimia dan autogenous pada beton	17
2.4. Reaksi yang menyebabkan penyusutan autogenous dan kimia.....	20
2.5. Perbandingan penyusutan autogenous dan penyusutan kimia pada usia dini ..	20
2.6. Sensor <i>strain gauge</i>	21
2.7. (a) <i>Bonded strain gauge</i> , (b) <i>Unbonded strain gauge</i>	22
2.8. <i>Embedded vibrating wire strain gauge</i>	24
3.1. Lokasi penelitian.....	35
3.2. Alat EVWSG.....	36
3.3. Alat <i>vibrating wire readout</i>	36
3.4. Alat termometer <i>hygrometer</i>	37
3.5. <i>Stopwatch</i>	38
3.6. Meteran.....	38
3.7. <i>Wiremesh</i>	39
3.8. Skema tampak atas benda uji dengan <i>wiremesh</i> dan EVWSG.....	41
3.9. Skema tampak samping benda uji dengan <i>wiremesh</i> dan EVWSG.....	40
3.10. Diagram alir penelitian.....	45
4.1. Deformasi beton pada perkerasan kaku menggunakan <i>wiremesh</i>	49
4.2. Deformasi beton pada perkerasan kaku tanpa <i>wiremesh</i>	50
4.3. Perbandingan deformasi beton pada perkerasan kaku menggunakan <i>wiremesh</i> dan tanpa <i>wiremesh</i>	54

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Detail Ukuran <i>Wiremesh</i>	27
2.2. Penelitian Terdahulu.....	27
2.3. Penelitian Terdahulu (Lanjutan).....	28
2.4. Penelitian Terdahulu (Lanjutan).....	29
2.5. Penelitian Terdahulu (Lanjutan).....	30
2.6. Penelitian Terdahulu (Lanjutan).....	31
2.7. Penelitian Terdahulu (Lanjutan).....	32
2.8. Penelitian Terdahulu (Lanjutan).....	33
3.1. Pengaturan Readout GK-404	36
3. 2. Data Hasil Uji Baja Wiremesh	39
3. 3. Kriteria Dixon	44
4.1. Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton.....	47
4.2. Perbandingan Perkerasan Kaku Menggunakan Wiremesh dan Perkerasan Kaku Tanpa Wiremesh.....	53

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur merupakan salah satu aspek penting untuk mendukung dan mempercepat proses pembangunan nasional. Infrastruktur memegang peranan penting sebagai salah satu roda penggerak pembangunan dan pertumbuhan ekonomi. Keberadaan infrastruktur yang memadai sangat diperlukan dan menjadi bagian yang sangat penting dalam sistem pelayanan masyarakat. Berbagai fasilitas fisik mendukung aneka kegiatan pemerintahan, perekonomian, industri dan kegiatan sosial di masyarakat serta pemerintahan (Bachtariza dkk., 2021)

Jalan merupakan salah satu prasarana perhubungan darat yang mempunyai peranan penting bagi pertumbuhan perekonomian, sosial budaya, pengembangan wilayah pariwisata, dan pertahanan keamanan untuk menunjang pembangunan nasional (Undang-Undang No. 38, 2004). Di Indonesia, jenis perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan alternatif perkerasan yang sekarang ini banyak digunakan karena cukup kuat dan tahan lebih lama dibandingkan dengan perkerasan lentur (Sidabutar dkk., 2021).

Perkerasan kaku adalah salah satu jenis perkerasan jalan yang menggunakan beton sebagai bahan utamanya dengan atau tanpa tulangan yang diletakkan di atas tanah dasar dan dengan atau tanpa pondasi bawah (Chasanah, 2015). Perkerasan ini umumnya digunakan pada jalan yang memiliki kondisi lalu lintas yang cukup padat dan memiliki distribusi beban yang besar, seperti jalan lintas antar provinsi, jembatan layang (*fly over*), jalan tol, dan persimpangan bersinyal.

Perkerasan kaku memang terlihat lebih baik dari sisi perilaku gaya dalamnya, tegangan yang timbul akibat beban yang sama relatif lebih kecil, sehingga tidak diperlukan lapisan bawah (*base-course*) yang tebal. Namun, karena material utamanya adalah beton, maka pengaruh susut (*shrinkage*) akibat perubahan suhu menjadi dominan dan tentunya dapat mengurangi kekuatan dan stabilitas jalan serta sangat berpengaruh terhadap kualitas kenyamanan lalu lintas, sehingga diperlukan perlakuan yang sesuai untuk memperbaikinya.

Penyusutan (*shrinkage*) adalah pengecilan volume akibat berkurangnya kadar air selama proses pengeringan (Kovler & Zhutovsky, 2006). Potensi pengecilan volume ini terjadi apabila nilai kadar air lebih kecil dari nilai batas susutnya (Chasanah, 2015). Penyusutan beton pada tahap awal pengerasan dapat menyebabkan terbentuknya retakan awal yang bervariasi dalam bentuk dan ukurannya tergantung pada konstituen beton dan kondisi sekitarnya, termasuk suhu atau keadaan kelembapan yang dapat menyebabkan deformasi volumetrik (Yousefieh dkk., 2017). Penyusutan tersebut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (suhu dan kelembapan relatif), ukuran komponen struktur (rasio luas permukaan terhadap volume), faktor material beton, volume agregat, modulus elastisitas agregat dan rasio air/semén (*w/cm*) (Mishra dkk., 2016). *Welded wiremesh* (WWM) mempunyai kinerja yang baik dalam mengendalikan retak pada beton yang disebabkan oleh penyusutan (Altoubat dkk., 2017). Penelitian yang dilakukan oleh Li dkk., 2017 menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan baja longitudinal dari 2,0 menjadi 4,52% menurunkan penyusutan umur awal UHPC secara signifikan dengan persentase sebesar 33%–60%.

Deformasi jangka panjang terbesar terjadi pada posisi sudut pada segmen perkerasan kaku (Niken dkk., 2018). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian terkait pengaruh penggunaan tulangan *wiremesh* pada posisi sudut perkerasan kaku untuk mengetahui perilaku deformasi dan penyusutan *rigid pavement* pada usia dini. Fokus pengujian pada penelitian ini adalah beton pada perkerasan kaku (*rigid pavement*), maka penulis melakukan penelitian dengan judul

“Analisis Penggunaan Tulangan *Wiremesh* terhadap Deformasi Perkerasan Kaku Usia Dini”.

1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian di atas dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku deformasi yang terjadi pada perkerasan kaku?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *wiremesh* pada posisi sudut terhadap deformasi dan penyusutan beton pada perkerasan kaku?
3. Bagaimana hubungan suhu terhadap penyusutan (*shrinkage*) beton?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis perilaku deformasi beton yang terjadi pada perkerasan kaku.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan *wiremesh* pada posisi sudut terhadap deformasi dan penyusutan beton pada perkerasan kaku (*rigid pavement*).
3. Mengetahui hubungan suhu terhadap penyusutan (*shrinkage*) beton.

1.4 Manfaat Kegiatan

Penelitian tentang perilaku deformasi pada struktur *rigid pavement* memiliki manfaat dalam bidang teknik sipil dan konstruksi. Beberapa manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan pemahaman tentang perilaku pada *rigid pavement*.
2. Menambah pengetahuan tentang hubungan suhu terhadap penyusutan (*shrinkage*) beton.
3. Menjadi bahan pertimbangan dalam merencanakan konstruksi bangunan yang lebih aman dan tahan lama.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan-batasan penelitian ini sebagai berikut:

1. Benda uji merupakan beton pada perkerasan kaku.
2. Tulangan *wiremesh* yang digunakan adalah M10.
3. Tulangan *wiremesh* diletakkan pada posisi sudut dengan kedalaman 15 cm.
4. Mutu beton yang digunakan adalah Fs 4,5 MPa.
5. Pengamatan dilakukan selama 24 jam.
6. Penelitian menggunakan satu buah *embedded vibrating wire gauge* (EVWSG) yang dipasang pada 50 cm dari tepi segmen dan 2 cm dari permukaan segmen.
7. Pengujian dilakukan di jalan tol Korpri-Purwotani STA 0+550.

1.6 Sistematika Penulisan

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

1. BAB I : PENDAHULUAN

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

2. BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

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

3. BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan gambaran umum lokasi penelitian, diagram alir, dan metodologi yang digunakan dalam penelitian untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan.

4. BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil pengumpulan, pengolahan, dan analisis data serta pembahasan hasil yang diperoleh berdasarkan teori yang ada dan fakta yang ditemukan.

5. BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

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

6. DAFTAR PUSTAKA

Berisikan referensi yang digunakan dalam penelitian ini.

7. LAMPIRAN

Berisikan data dan gambar yang mendukung penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (SNI 2847:2013, 2013). Beton merupakan material komposit yang terdiri dari media pengikat (pada umumnya campuran semen hidrolis dan air), agregat halus (pada umumnya pasir), dan agregat kasar (pada umumnya kerikil) dengan atau tanpa bahan tambahan/campuran (Bahar, 2004).

Di dunia Teknik sipil, beton merupakan salah satu komponen struktur yang banyak digunakan. Beton biasa digunakan pada struktur bangunan seperti gedung, bangunan air, jembatan, jalan, dll. Beton dipilih sebagai salah satu komponen struktur bangunan karena kekuatannya. Kuat tekan beton merupakan salah satu andalan utama bahan ini (Li dkk., 2017). Selain itu, beton memiliki kelebihan lain, yaitu tahan terhadap air, mudah dibentuk, dan mudah perawatannya. Material penyusun yang relatif mudah didapat juga merupakan salah satu kelebihan dari beton.

Menurut (Tjokrodimuljo, 2007) beton memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan antara lain sebagai berikut ini.

1. Kelebihan

- a. Termasuk bahan dengan harga yang relatif lebih murah karena menggunakan material dasar yang umumnya mudah didapat.

- b. Termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan panas, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan menjadi lebih murah.
- c. Termasuk bahan yang mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi sehingga jika dikombinasikan dengan baja tulangan yang mempunyai kuat tarik tinggi dapat menjadi satu kesatuan struktur yang tahan terhadap tarik dan tekan. Berdasarkan hal tersebut struktur beton bertulang dapat diaplikasikan atau diterapkan pada pondasi, kolom, balok, dinding, perkerasan jalan, landasan pesawat udara, penampung air, pelabuhan, bendungan, jembatan dan sebagainya.
- d. Termasuk bahan yang pengerjaannya mudah karenanya dapat dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai keinginan yang direncanakan. Cetakan beton dapat dipakai beberapa kali sehingga secara ekonomi menjadi lebih murah.

2. Kekurangan

- a. Bahan dasar penyusun beton agregat halus maupun agregat kasar bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga kekuatan dan perilakunya tidak homogen.
- b. Beton dipengaruhi oleh kondisi sekitarnya karena merupakan material berpori.
- c. Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas/rapuh dan mudah retak. Oleh karena itu, perlu diberikan cara untuk mengatasinya, misalnya dengan mengkombinasikan baja tulangan, atau serat baja agar memiliki kuat tarik yang tinggi.

Regangan beton digunakan untuk berbagai parameter dalam perencanaan bangunan. Data regangan diperlukan untuk mengetahui diagram kesetimbangan tegangan-regangan dan modulus elastisitas beton. Diagram tersebut digunakan untuk menentukan kategori beton bertulang. Apabila beton sudah mencapai atau melampaui regangan maksimal, sedangkan baja tulangan belum mencapai leleh maka, beton bertulang tersebut termasuk kategori beton

gagal tekan. Selain itu, data regangan pada beton juga digunakan untuk menentukan kebutuhan tulangan.

Saat ini terdapat beberapa jenis beton yang dapat ditemui. Jenis-jenis beton tersebut digunakan berdasarkan fungsinya. Menurut (Bahar, 2004), jenis-jenis beton dan fungsinya diuraikan sebagai berikut:

1. Beton ringan.

Beton ringan memiliki berat jenis kurang dari 1.900 kg/m^3 . Beton ringan digunakan untuk elemen non-struktural. Beton ringan dibuat dengan cara membuat gelembung udara dalam adukan semen dan menggunakan agregat yang ringan berupa tanah liat bakar/batu apung atau pembuatan beton non-pasir.

2. Beton normal.

Beton normal memiliki berat jenis $2.200 - 2.500 \text{ kg/m}^3$. Beton normal umumnya digunakan hampir pada setiap elemen struktur pada bangunan.

3. Beton berat.

Beton berat memiliki berat jenis lebih dari 2.500 kg/m^3 . Beton berat digunakan untuk struktur tertentu, seperti struktur yang harus tahan terhadap radiasi atom.

4. Beton jenis lain.

Beton jenis lain merupakan beton yang digunakan untuk struktur dengan persyaratan khusus, seperti: beton massa, ferosemen, beton serat, beton siklop, beton hampa, beton ekspos, dll.

Selain itu, jenis-jenis beton berdasarkan kuat tekan dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Beton mutu rendah.

Beton mutu rendah yaitu beton yang memiliki nilai kuat tekan di bawah 20 MPa. Beton mutu rendah biasa digunakan untuk struktur yang tidak memerlukan kekuatan terlalu tinggi, seperti struktur rumah tinggal.

2. Beton mutu sedang.

Beton mutu sedang yaitu beton yang memiliki nilai kuat tekan 21 MPa hingga 40 MPa. Beton mutu sedang biasanya digunakan untuk struktur bangunan bertingkat.

3. Beton mutu tinggi.

Beton mutu tinggi yaitu beton yang memiliki nilai kuat tekan di atas 41 MPa. Beton mutu tinggi biasa digunakan pada bangunan pencakar langit atau *high rise building*.

Kekuatan yang dihasilkan pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya proporsi campuran, kondisi temperatur, *curing*, dan kelembapan di sekitar beton (Mishra dkk., 2016). Proporsi campuran untuk adukan beton harus diperhitungkan dengan baik sesuai dengan metode yang digunakan. Pengujian bahan untuk campuran adukan beton juga harus disesuaikan dengan metode yang akan digunakan. Kondisi temperatur udara dan kelembapan tempat beton akan mengeras harus dikendalikan agar selama proses hidrasi beton tidak mengalami retak akibat panas hidrasi yang terlalu tinggi. Panas hidrasi adalah efek samping dari proses hidrasi yaitu berupa pelepasan panas/kalor dari reaksi hidrasi (Bahar, 2004).

2.2 Sifat-Sifat Beton

Beton merupakan salah satu komponen struktur yang memiliki berbagai sifat. Sifat beton sangat rentan untuk berubah, terutama sifat pada beton segar yang bersifat plastis dan mudah dibentuk. Beberapa sifat yang mempengaruhi beton dan harus diberikan perhatian adalah *workability* atau kelecakan dan nilai slump. Kedua sifat tersebut dapat mempengaruhi sifat beton segar yang lainnya, seperti segregasi dan *bleeding*. Syarat membuat beton berkekuatan tertentu dan bermutu baik, yaitu harus dapat dikerjakan dengan baik dan dipadatkan dengan sempurna sehingga kekuatan dan mutu beton yang dikehendaki dapat dicapai.

Sifat-sifat yang berpengaruh pada beton segar yaitu:

1. Nilai slump
2. Keleccakan (*workability*)
3. Segregasi
4. *Bleeding*
5. Perawatan (*curing*)

Sifat-sifat tersebut nantinya akan mempengaruhi sifat-sifat yang ada pada beton keras. Penjelasan dari sifat-sifat yang berpengaruh pada beton segar di atas yaitu:

1. Slump beton

Slump beton adalah penurunan ketinggian pada pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan uji slump diangkat (SNI 1972:2008, 2008). Nilai slump pada umumnya akan meningkat sebanding dengan peningkatan kadar air yang ada dalam campuran beton segar dan berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan beton. Nilai slump beton menjadi acuan untuk tingkat kemudahan dalam pekerjaan beton. Beton dengan nilai slump < 15 mm mungkin tidak cukup plastis dan beton dengan nilai slump > 230 mm mungkin tidak cukup kohesif (SNI 1972:2008, 2008).

2. Keleccakan (*Workability*)

Keleccakan berkaitan dengan tingkat kemudahan campuran beton untuk diaduk, diangkat, dituang dan dipadatkan. Sifat kemudahan dikerjakan pada campuran beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jumlah air, faktor air-semen yang digunakan, jumlah agregat dalam campuran beton, dan ukuran butiran agregat serta gradasinya (Astanto & Saelan, 2018). Tingkat keleccakan beton dapat diketahui dengan cara melakukan uji slump. Uji slump merupakan suatu teknik untuk memantau homogenitas dan *workability* adukan beton segar dengan suatu kekentalan tertentu yang dinyatakan dengan satu nilai slump (SNI 1972:2008, 2008). Menurut (Bahar, 2004), faktor lain yang mempengaruhi keleccakan pada beton segar adalah sebagai berikut:

- a. Jumlah air yang dipakai. Semakin banyak air, maka beton semakin mudah dikerjakan.
- b. Jumlah semen. Jika semen bertambah, maka air juga akan ditambah agar FAS tetap, sehingga beton semakin mudah dikerjakan.
- c. Gradasi campuran pasir dan kerikil.
- d. Jenis, ukuran, dan bentuk agregat kasar.

3. Segregasi

Menurut (Bahar, 2004), segregasi merupakan kecenderungan agregat kasar untuk memisahkan diri dari campuran adukan beton. Peluang terjadinya segregasi diperbesar dengan:

- a. Kekurangan semen.
- b. Kelebihan air.
- c. Kelebihan ukuran kerikil.
- d. Kekurangan agregat halus.
- e. Kelebihan tinggi jatuh pengecoran.

Pada dasarnya, segregasi adalah proses terjadinya penurunan agregat kasar ke bagian bawah beton segar atau terpisahnya agregat kasar dari campuran karena cara penuangan yang salah dan pemadatan yang tidak merata (Saputra dkk., 2022).

4. *Bleeding*

Menurut (Bahar, 2004), *bleeding* merupakan kecenderungan air untuk naik (memisahkan diri) pada beton segar yang baru saja dipindahkan. *Bleeding* dapat dikurangi dengan beberapa cara, yaitu:

- a. Memberi lebih banyak semen dalam campuran.
- b. Menggunakan air sedikit mungkin.
- c. Menggunakan lebih banyak pasir.
- d. Menyesuaikan intensitas dan durasi penggetaran pemadatan sesuai dengan nilai slump campuran.

5. Perawatan (*Curing*)

Menurut (SNI 2493:2011, 2011), benda uji harus dirawat basah dari waktu pencetakan sampai saat pengujian. Perawatan dilakukan dengan cara meletakkan kain goni basah di atas permukaan benda uji atau merendam benda uji paling sedikit selama 24 jam setelah benda uji dicetak. Selain itu, pada masa *setting time*, benda uji beton harus diletakkan di tempat yang aman, datar, bebas dari getaran, dan terhindar dari hal-hal yang berpotensi merusak benda uji beton.

Sama seperti beton segar, beton keras juga memiliki beberapa sifat. Sifat-sifat pada beton keras terjadi saat beton segar berubah menjadi keras. Menurut (Bahar, 2004), sifat-sifat beton keras dibagi menjadi dua yaitu:

1. Sifat jangka pendek (sampai umur 28 hari).

Sifat beton keras jangka pendek meliputi susut, kuat tekan, kuat tarik, dan kuat geser. Susut terjadi selama beberapa jam pertama sesudah pengecoran beton segar di cetakan. Nilai kuat tekan dipengaruhi oleh perbandingan air dan semen, tingkat pemadatan, jenis dan kualitas semen, jenis dan kekasaran permukaan agregat, umur, suhu, dan perawatan. Kuat tarik berperan penting dalam menahan retak yang mungkin terjadi akibat perubahan kadar air dan suhu. Kuat tarik beton berkisar $1/18$ kuat tekan beton saat umurnya masih muda dan menjadi $1/20$ sesudahnya. Sedangkan kuat geser, dalam praktiknya, mengikuti kuat tekan dan tarik.

2. Sifat jangka panjang.

Sifat jangka panjang pada beton keras adalah rangkak dan susut. Rangkak adalah peningkatan deformasi (regangan) secara bertahap terhadap waktu akibat beban yang bekerja secara konstan. Susut adalah berkurangnya volume beton karena reaksi hidrasi yang menyebabkan terjadinya kehilangan kandungan air akibat penguapan. Struktur beton akan terus-menerus mengalami susut kering dalam jangka panjang bahkan hingga bertahun-tahun sampai air yang terkandung di dalam beton benar-benar habis menguap. Beton keras selain memiliki dua sifat di atas, juga memiliki

sifat lainnya yaitu kuat tekan, kuat lentur dan permeabilitas. Volume semen dan air didapat dari nilai faktor air dan semen (FAS) yang telah ditentukan dalam *mix design* dan akan mempengaruhi nilai kuat tekan beton. Nilai kuat tekan beton akan meningkat seiring berjalannya waktu. Sejak umur 28 hari, laju pertumbuhan produk hidrasi akan menurun. Oleh sebab itu, kuat tekan beton didasarkan pada umur 28 hari.

2.3 Perkerasan Kaku

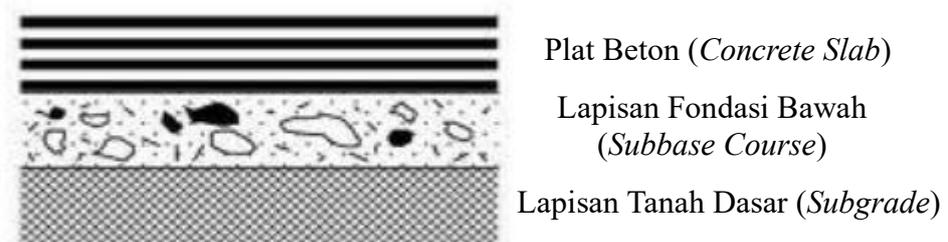
Perkerasan kaku adalah jenis perkerasan jalan yang menggunakan beton sebagai bahan utamanya. Perkerasan kaku merupakan salah satu jenis perkerasan jalan yang sering digunakan selain dari perkerasan lentur. Perkerasan ini umumnya digunakan pada jalan yang memiliki kondisi lalu lintas yang cukup padat dan memiliki distribusi beban yang besar, seperti pada jalan lintas antar provinsi, jembatan layang, jalan tol, maupun pada persimpangan bersinyal. Jalan – jalan tersebut pada umumnya menggunakan beton sebagai bahan perkerasannya (Rahmat dkk., 2017).

Keunggulan dari perkerasan kaku dibandingkan dengan perkerasan lentur adalah pada penyaluran distribusi beban ke *subgrade*. Kekakuan dan *stiffnes* yang dimiliki perkerasan kaku akan mendistribusikan beban pada daerah yang relatif luas pada *subgrade*. Bagian utama yang menanggung beban struktural pada perkerasan kaku adalah beton itu sendiri, sedangkan pada perkerasan lentur karena terbuat dari material yang fleksibel, maka distribusi beban yang disalurkan tidak sebaik pada beton, sehingga memerlukan ketebalan yang lebih besar. Adapun jenis - jenis perkerasan kaku antara lain (Tenriajeng, 1999):

1. Perkerasan beton semen, yaitu perkerasan kaku dengan semen sebagai lapis aus. Terdapat empat jenis perkerasan beton semen, yaitu sebagai berikut:
 - a. Perkerasan beton semen bersambung tanpa tulang
 - b. Perkerasan beton semen bersambung dengan tulang
 - c. Perkerasan beton semen bersambung menerus dengan tulang
 - d. Perkerasan beton semen pra tekan

2. Perkerasan komposit, yaitu perkerasan kaku dengan pelat beton semen sebagai lapis pondasi dan aspal beton sebagai lapis permukaan. Perkerasan kaku ini sering digunakan sebagai *runway* lapangan terbang.

- 2.3.1 Kriteria perkerasan kaku jalan raya (Tenriajeng, 1999) antara lain:
- Bersifat kaku karena yang digunakan sebagai perkerasan terbuat dari beton
 - Beban muatan tinggi
 - Kekuatan beton sebagai dasar perhitungan tebal perkerasan
 - Usia rencana bisa lebih dari 20 tahun



Gambar 2.1. Lapisan perkerasan kaku.

2.3.2 Standar perkerasan jalan raya

Menurut (Simanullang & Pasaribu, 2021), perkerasan jalan adalah campuran antara agregat dan bahan ikat yang digunakan untuk melayani beban lalu lintas. Agregat yang digunakan antara lain adalah batu pecah, batu belah, batu kali, dan hasil samping peleburan baja. Sedangkan bahan ikat yang digunakan antara lain adalah aspal, semen, dan tanah liat.

- Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan perkerasan yang menggunakan semen (*portland cement*) sebagai bahan pengikatnya. Pelat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan di atas tanah dasar dengan atau tanpa lapis pondasi bawah. Beban lalu lintas yang melintas di atasnya, sebagian besar dipikul oleh pelat beton.

- b. Keuntungan dan kerugian perkerasan kaku (Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/Bm/2017, 2017) bila dibandingkan dengan perkerasan lentur adalah sebagai berikut:

Keuntungan perkerasan kaku antara lain:

1. Perkerasan kaku memiliki struktur yang lebih tipis, kecuali untuk area tanah lunak.
2. Pelaksanaan konstruksi dan pengendalian mutu lebih mudah.
3. Pemeliharaan memerlukan biaya yang lebih rendah jika mutu pelaksanaan baik.
4. Pembuatan campuran lebih mudah.

Sedangkan kerugiannya antara lain sebagai berikut:

1. Biaya konstruksi lebih mahal untuk jalan dengan lalu lintas rendah.
2. Rentan terhadap retak jika dilaksanakan di atas tanah lunak, atau daya dukung tanah buruk, atau tidak dilaksanakan dengan baik (mutu pelaksanaan rendah).
3. Umumnya kurang nyaman untuk berkendara.

2.4 Deformasi

Deformasi permanen merupakan jenis kerusakan pada konstruksi jalan raya yang terjadi akibat dari beban kendaraan secara berulang (Dong dkk., 2007). Deformasi permanen adalah salah satu jenis kerusakan utama yang terjadi pada campuran beraspal akibat beban kendaraan berulang yang mempengaruhi kinerja perkerasan jalan. Menurut (Brahmantyo, 2003), deformasi adalah salah satu kontrol kestabilan suatu elemen terhadap kekuatannya. Biasanya deformasi dinyatakan sebagai perubahan bentuk elemen struktur dalam bentuk lengkungan (q) dan perpindahan posisi dari titik di bentang balok ke titik lain. Deformasi pada beton terjadi dalam bentuk penyusutan dan pengembangan yang dapat dipengaruhi oleh temperatur dan *relative humidity* (RH) di sekeliling beton tersebut (Niken dkk., 2023). Reaksi kimia yang terjadi pada beton akan menimbulkan panas dan deformasi. Panas dan deformasi yang terjadi dapat

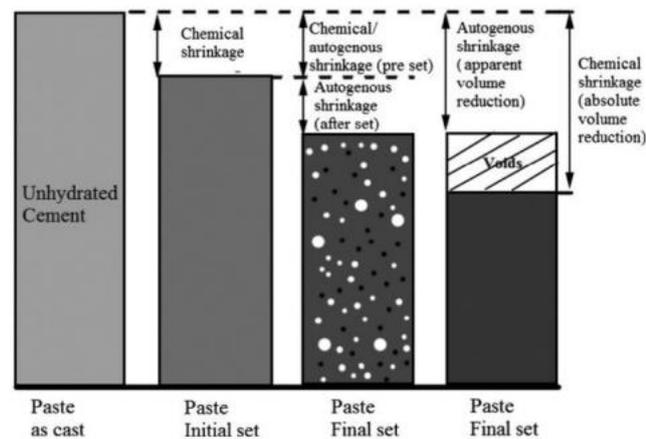
memicu terjadinya retak rambut yang dapat berkembang menjadi masalah struktural yang serius.

Ketahanan struktur dipengaruhi oleh penyusutan beton. Penyusutan terjadi dalam dua fase yang berbeda yaitu usia dini dan usia akhir. Dalam konteks ini, usia dini diartikan sebagai hari pertama saat dimana beton mulai mengeras. Penyusutan pada usia dini menjadi perhatian karena ikatan beton masih sangat lemah. Usia dini dimulai segera setelah pengecoran beton ke dalam bekisting. Beton mempunyai kapasitas regangan terendah dan paling sensitif terhadap tekanan internal. Penyusutan pada usia dini dapat mengakibatkan terbentuknya retakan secara mikroskopis, hal ini dapat membuka celah timbulnya masalah serius pada penyusutan lebih lanjut (Mishra dkk., 2016). Salah satu penyebab penyusutan pada beton adalah hilangnya kadar air pada pasta. Hal ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain:

1. Kondisi lingkungan (suhu dan kelembapan relatif)
2. Ukuran komponen struktur (rasio luas permukaan terhadap volume)
3. Faktor material beton
4. Volume agregat
5. Modulus elastisitas agregat
6. Rasio air/semen (w/cm)

Secara umum penyusutan dapat diukur berdasarkan perubahan volume dan panjang. Terlepas dari metode pengujiannya, umur penyusutan yang diukur adalah kombinasi dari penyusutan autogenous, penyusutan kering, dan penyusutan kimia (Wu dkk., 2017). Penyusutan autogenous adalah penyusutan yang tidak mencakup perubahan volume akibat hilangnya atau masuknya zat, variasi suhu, penerapan gaya, dan pengekangan eksternal (Wu dkk., 2017). Komite teknis penyusutan autogenous di *Japan Concrete Institute* (JCI) mendefinisikan penyusutan autogenous sebagai pengurangan volume makroskopis dari bahan semen ketika semen terhidrasi setelah pengerasan awal. Penyusutan kimia mengacu pada perubahan volume selama hidrasi awal yang diakibatkan oleh terbentuknya produk hidrasi dengan volume yang lebih rendah

dibandingkan dengan volume reaktan awal (air dan semen) selama proses pengerasan (Bullard dkk., 2011). Penyusutan kimia sebagai ukuran yang mutlak pengurangan volume internal, dianggap sebagai kekuatan pendorong terjadinya penyusutan autogenous yang mewakili perubahan volume beton eksternal (Mounanga dkk., 2004). Gambar 2.2. menggambarkan hubungan umum antara definisi penyusutan kimia dan autogenous pada beton.



Gambar 2.2. Hubungan umum antara definisi penyusutan kimia dan autogenous pada beton.

(Sumber: (Wu dkk., 2017))

Setelah pembentukan struktur awal (umumnya disebut sebagai koagulasi awal), hidrasi lebih lanjut akan menyebabkan rongga di dalam matriks. Pada tahap ini, nilai penyusutan autogenous lebih kecil dibandingkan penyusutan kimiawi karena nilai penyusutan autogenous mengukur volume reduksi yang nyata sedangkan pengukuran penyusutan kimia menghitung akumulasi volume rongga (Wu dkk., 2017).

Beberapa peneliti telah memverifikasi penyusutan autogenous dan kimia dan menemukan bahwa penyusutan tersebut sebanding dengan laju peningkatan kekuatan beton melalui hidrasi. Hal ini menggunakan konsep bahwa laju hidrasi sangat dipengaruhi oleh suhu. Penyusutan autogenous pasta semen merupakan akibat dari suhu (Mounanga dkk., 2004).

Masalah yang mendasar dari penyusutan adalah timbulnya tegangan dalam beton yang dapat menyebabkan keretakan. Retak yang terjadi akan menyebabkan berkurangnya kekuatan dan daya tahan pada beton. Penyusutan dapat terjadi dalam berbagai ukuran, seperti mikro hingga makro dan dapat menyebabkan kerentanan pada struktur. Penurunan pH air pencampur pada usia dini meningkatkan penyusutan autogenous karena sifat kimia semen dan reaksi kimia antara semen dan air dalam proses hidrasi. Proses penyusutan ini juga meningkat seiring dengan kenaikan suhu (Hasan dkk., 2014).

Berdasarkan (Niken dkk., 2023), Terdapat beberapa periode dalam proses hidrasi dengan OPC, yaitu sebagai berikut:

1. Periode 1 dan 2: Perluasan volume

Pada fase ini terjadi peralihan dari material mentah menjadi beton segar. Pada fase ini terjadi pemuaian volume yang dipicu oleh gaya tolak-menolak atau gaya dispersi pada permukaan lapisan.

2. Periode 3: Penyusutan

Lapisan gel semakin menebal, dan butiran ettringite meningkat dengan cepat. Hal tersebut menyebabkan terjadinya penyusutan. Adanya Ca^{2+} menyebabkan volume mengembang dan tumbuhnya produk hidrasi yang menyebabkan volume mengecil. Pengertian ini terlihat sebagai fluktuasi pembengkakan dan penyusutan.

3. Periode 4a: *Silica fume* berbentuk *hexagonal* dari $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan ettringite

Pada periode ini terjadi penyerapan Ca^{2+} pada larutan pori semen yang menyebabkan permukaan *silica fume* menjadi positif dan menyebabkan volume beton mengecil. Kristal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ berbentuk heksagonal 100nm terbentuk pada permukaan $\text{C}_{3\text{S}}$. Kristal ini lebih stabil dibandingkan larutan atau bentuk amorf dan menyebabkan penyusutan.

4. Periode 4b: Akselerasi penyusutan dan panas tertinggi (5,5-6 jam)

Setelah proses pelarutan, sebelum memasuki umur 6 jam, 3 produk hidrasi yaitu CH, dan CSH tumbuh dengan kecepatan tinggi dan laju pertumbuhan ettringite berubah dari konstan menjadi cepat. Pada umur 6 jam, penurunan jumlah dan ukuran pori pada beton terjadi dengan kecepatan tinggi. Hal ini

menyebabkan suhu pada periode ini meningkat. Perkembangan suhu menunjukkan adanya peningkatan proses hidrasi.

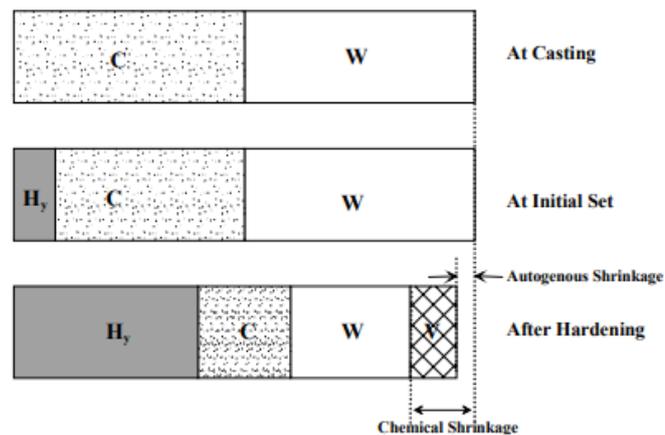
5. Periode 5: Ekspansi lambat

Pada tahap ini, partikel semen ditutupi dengan C-S-H dan ettringite. Beton normal dan HPC mengembang dengan lambat. Tingkat hidrasi tercepat adalah C_3A . Reaksi C_3A murni dengan air sangat cepat dan menghasilkan *flash-set* yang dapat dicegah dengan menambahkan gipsum ke dalam klinker semen. Gipsum akan menyebabkan volume mengembang. Masa pembengkakan ini terjadi pada umur 8 sampai 18 jam baik pada beton normal maupun HPC. Kemudian C-S-H bagian luar dan bagian dalam akan terbentuk, proses ini disebut kristalisasi yang disertai penyusutan.

6. Periode 6: Penyusutan dan butir Hadley

Pada periode 18-24 jam terjadi penyusutan. Setelah 18 jam, pasta akan memperoleh ikatannya. Batang AFt mengkristal lebih baik, dan butiran Hadley. Butir Hadley terbentuk karena adanya proses hidrasi pada bagian luar butir semen yang mengakibatkan terbentuknya membran keras dan menyisakan sel-sel berongga yang terisi semen yang tidak bereaksi.

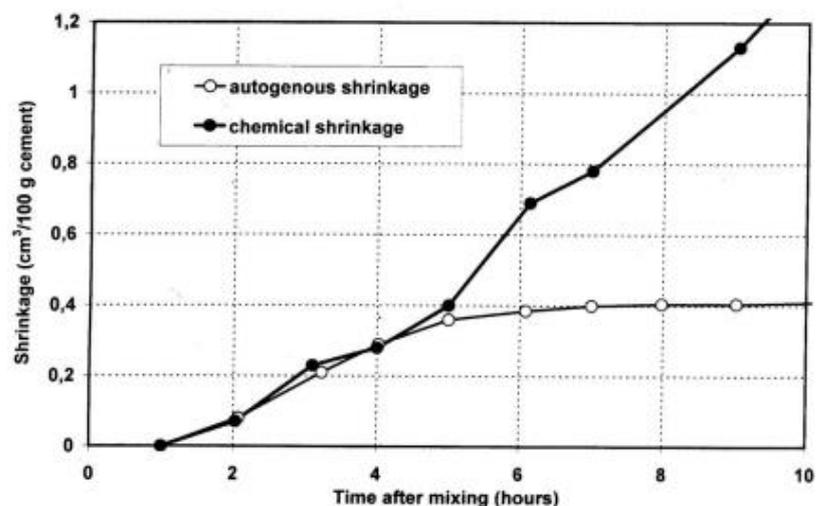
Solusi paling umum untuk mengurangi perubahan volume pada usia dini adalah dengan melakukan penutupan segera setelah beton dicor dan melakukan perawatan kelembapan pada beton beberapa jam pertama setelah penempatan. Perawatan beton harus segera dimulai dan mengikuti metode yang sesuai dengan bahan curing serta kondisi lapangan. Segera setelah pencampuran air dan semen, akan terjadi perubahan penyusutan kimia akibat berkurangnya volume produk reaksi. Seiring dengan penyusutan kimia, penyusutan autogenus juga terjadi. Gambaran perubahan komposisi beton akibat reaksi hidrasi semen dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Reaksi yang menyebabkan penyusutan autogenous dan kimia.

(Sumber: (Holt, 2001))

Para peneliti telah melaporkan bahwa penyusutan autogenous dalam fase awal sangat kecil atau dapat diabaikan dan meningkat perlahan seiring berjalannya waktu dalam fase pengerasan, dibandingkan dengan penyusutan kimia yang meningkat sangat cepat pada fase awal dalam durasi yang sangat singkat dan berlanjut dengan kecepatan yang lebih cepat bahkan dalam fase pengerasan. Grafik perbandingan penyusutan autogenous dan penyusutan kimia dapat dilihat pada Gambar 2.4. Disarankan bahwa jika besaran penyusutan pada usia dini melebihi 1 mm/m maka terdapat resiko tinggi terjadinya retak (Holt, 2001).

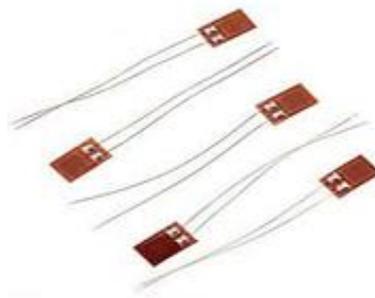


Gambar 2.4. Perbandingan penyusutan autogenous dan penyusutan kimia pada usia dini.

(Sumber: (Holt, 2001))

2.5 Embedded Vibrating Wire Strain Gauge

Strain gauge adalah salah satu sensor yang bisa membaca suatu pergerakan partikel. *Strain gauge* berasal dari dua kata yaitu *strain* yang berarti regangan dan *gauge* yang berarti pengukur. *Strain gauge* dapat diartikan sebagai alat pengukur regangan pada suatu benda. Dengan memanfaatkan perubahan resistansi sensor, *strain gauge* dapat digunakan untuk mengukur perubahan yang sangat kecil akibat tegangan (*tensile stress*) atau regangan (*tensile strain*). Sensor *strain gauge* berbentuk *foil* logam atau kawat logam yang bersifat menghantarkan arus listrik, yang diteruskan dengan menempelkan pada benda yang akan diukur regangannya dimana besar regangan berasal dari pembebanan (Fraden, 2016). Berikut contoh *strain gauge* dapat kita lihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Sensor *strain gauge*.

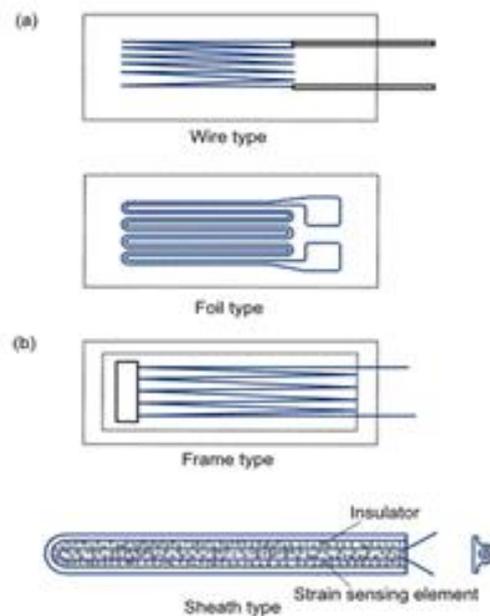
(Sumber : www.amaxon.com)

Sensor *strain gauge* memiliki ukuran yang kecil dengan panjang pada umumnya berkisar antara 5-8 mm. Pengukur ini dilekatkan dengan baik pada permukaan benda yang diukur, sehingga perubahan panjangnya sebanding dengan regangan pada benda itu sendiri. Setiap pengukur terdiri atas suatu *grid* metal halus yang akan memanjang atau memendek apabila benda tersebut diregangkan di titik dimana pengukur tersebut dipasang. *Grid*nya ekuivalen dengan kawat kontinyu yang bergerak bolak-balik dari satu ujung *grid* ke ujung *grid* lainnya, sehingga secara efektif menambah panjangnya. Tahanan listrik kawat itu berubah apabila ia memanjang atau memendek, lalu perubahan

tahanan ini dikonversikan menjadi pengukuran regangan. Pengukur ini sensitif dan dapat mengukur regangan hingga 1×10^{-6} .

2.5.1 Jenis-jenis *strain gauge*

1. *Bonded strain gauge* adalah susunan kawat tahanan di dalamnya berbentuk garis liku-liku sehingga memudahkan deteksi terhadap gaya tekanan yang tegak lurus dengan arah panjang lipatan kawat, karena tekanan akan menarik grid sehingga meregang. Dengan meregangnya *strain gauge*, maka terjadi perubahan resistansi kawat.
2. *Unbonded strain gauge* adalah jenis *strain gauge* yang dibentuk dengan kawat tahanan yang terpasang lurus dan simetris. Jika papan atau rangka mendapat tekanan dari luar, maka resistansinya akan bertambah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.6. di bawah ini.



Gambar 2.6. (a) *Bonded strain gauge*, (b) *Unbonded strain gauge*.

2.5.2 Data *Strain gauge*

Perubahan yang diperoleh dari *strain gauge* hanya dalam bentuk hambatan (Ohm) yang dilambangkan dengan ΔR . Sedangkan hambatan *strain gauge* yang tidak berubah dilambangkan dengan R . Saat angka dari $\Delta R/R$ diperoleh maka perbandingan dari R dapat dihitung. Perhitungan juga dipengaruhi oleh *Gage Factor* (GF). *Gage Factor* merupakan perbandingan persen perubahan hambatan pada *gage* dan persen perubahan panjangnya. Jika perbandingan $\Delta R/R$ dibagi dengan *gage factor* maka hasilnya adalah perbandingan dari perubahan panjang ΔL dengan panjang sesungguhnya yaitu L .

2.5.3 Prinsip Kerja *Strain Gauge*

Sensor *strain gauge* adalah *grid metal-foil* yang tipis yang dilekatkan pada permukaan dari objek benda yang diukur. Apabila objek benda dibebani, maka akan terjadi regangan/*strain* dan ditransmisikan ke *foil grid*. Tahanan *foil grid* berubah sebanding dengan *strain* induksi beban. Sensor *strain gauge* kebanyakan merupakan jenis *metal-foil*, dimana konfigurasi *grid* dibentuk oleh proses *photoetching*. Karena proses pembuatannya yang mudah, maka sensor *strain gauge* dibuat dengan berbagai ukuran *gage* dan bentuk *grid*. *Gauge* terpendek adalah 0,20 mm, dan yang terpanjang adalah 102 mm. Tahanan *gage standard* adalah 120 mm dan 350 ohm. Gaya yang diberikan pada suatu benda logam (material ferrit/konduktif), selain menimbulkan deformasi bentuk fisik juga menimbulkan perubahan sifat resistansi elektrik benda tersebut (Koswara & Arif, 2022).

Dengan melekatkan sensor *strain gauge* tersebut pada suatu benda uji (spesimen) menggunakan suatu perekat yang isolatif terhadap arus listrik, maka sensor tadi akan menghasilkan perubahan resistansi yang nilainya sebanding terhadap deformasi bentuknya. Gaya akan mengubah nilai resistansinya, perubahan resistansi tersebut sesuai dengan gaya yang diberikan. Prinsip dasar dari penggunaan hambatan

listrik *strain gauge* merupakan fakta bahwa hambatan dari perubahan kawat sebagai fungsi tegangan, meningkat dengan tekanan dan menurun dengan adanya pemampatan. Perubahan dalam hambatannya diukur dengan menggunakan rangkaian jembatan *Wheatstone*. *Strain gauge* yang melekat pada spesimen dan kemudian diberikan tekanan dengan dilakukannya pembebanan akan menghasilkan perubahan resistansi yang ada pada rangkaian jembatan *Wheatstone*.

Embedded vibrating wire strain gauge dirancang untuk pengukuran regangan jangka panjang di dalam beton massal, dalam struktur seperti pondasi, tiang pancang, jembatan, bendungan, bejana penahan, pelapis terowongan, dll. Pengukuran digunakan untuk menghitung beban atau tegangan struktural. *Embedded vibrating wire strain gauge* terdiri dari tabung baja berdinding tipis dengan dua kepala yang disolder pada bagian ujungnya. Pada bagian tengah pengukur berbentuk tabung kecil membungkus kumparan eksitasi dan *pick up* elektromagnetik. Hambatan listrik dari salah satu kumparan elektromagnetik menyediakan data suhu, dalam hal ini pengukuran dikirim dengan 5 kabel konduktor. Empat (4) kabel konduktor digunakan ketika pengukuran suhu tidak diperlukan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.7. di bawah ini.



Gambar 2.7. *Embedded vibrating wire strain gauge*.

(Sumber: geokon.com)

Pada *embedded vibrating wire strain gauge* regangan diukur dengan prinsip *vibrating wire*, yaitu seutas kawat baja dikencangkan di antara dua ujung balok yang tertanam langsung pada beton. Deformasi (perubahan regangan) yang terjadi pada massa beton akan menyebabkan kedua balok ujung bergerak relatif satu sama lain, sehingga mengubah tegangan kawat baja. Tegangan diukur

dengan kawat yang mengukur frekuensi resonansi getarannya menggunakan kumparan elektromagnetik.

Pemasangan *embedded vibrating wire strain gauge* ke dalam struktur beton dapat dilakukan dengan meletakkan langsung *embedded vibrating wire strain gauge* ke dalam beton atau dengan membuat pracetak unit menjadi briket yang kemudian dimasukkan ke dalam struktur beton. Sebagai alternatif lain, *embedded vibrating wire strain gauge* dapat dipasang atau diikat pada tulangan sebelum beton dituang.

Fitur yang dimiliki *embedded vibrating wire strain gauge* antara lain:

1. Stabilitas jangka panjang
2. Ketahanan terhadap pengaruh air
3. Tahan korosi
4. Berisi termistor
5. Pembacaan akurat

2.6 Wiremesh

Wiremesh adalah besi fabrikasi yang terdiri dari dua lapis tulangan baja dengan posisi saling bersilangan tegak lurus. Setiap titik persilangan dilas sehingga menjadi satu kesatuan dan menghasilkan penampang yang homogen. Jarak antar tulangan yang sama, seragam, dan konsisten membuat semua susunan selalu berada di posisinya masing-masing (Aldo Azzana Zuhuri & Raimon Kopa, 2021).

Wiremesh sering digunakan dalam konstruksi beton dengan cara dipasang atau digelar kemudian adukan beton dituang di atas *wiremesh* lalu diratakan. Dak beton yang menggunakan *wiremesh* cenderung lebih kuat karena memiliki daya tahan terhadap tarik yang lebih tinggi dan juga dapat membantu menstabilkan beton agar tidak mudah rapuh. *Wiremesh* yang digunakan pada konstruksi beton merupakan rangkaian dari batang-batang baja yang saling kait-mengkait satu

sama lain. *Wiremesh* lebih dikenal dengan nama kawat atau besi anyam, ini dikarenakan bentuknya yang kotak-kotak seperti kawat atau besi anyam.

Wiremesh memiliki fungsi seperti di bawah ini:

1. Sebagai penguat tulangan beton pada konstruksi jembatan, jalan tol, lantai dan bangunan lainnya.
2. Sebagai tulangan beton pada dak cor lantai bangunan rumah bertingkat, pagar beton, turap.

Selain fungsi di atas, *wiremesh* juga memiliki kelebihan di antaranya sebagai berikut:

1. Merupakan material sederhana dan mudah dalam pemasangannya, sehingga dapat menghemat waktu pelaksanaan.
2. Merupakan material dengan harga lebih terjangkau dibandingkan dengan besi konvensional sehingga lebih ekonomis.
3. Merupakan bahan konstruksi modern yang banyak dipakai saat ini.
4. Merupakan material yang mudah diperoleh di toko material.
5. Merupakan material yang kuat, kokoh, dan tahan lama.
6. Merupakan material dengan jumlah kawat pengait sedikit.

Terdapat dua jenis *wiremesh* yang umum digunakan, yaitu:

1. *Wiremesh* Lembaran, material anyaman besi jenis lembaran memiliki bentuk layaknya lembaran kertas. Dimensi panjang dan lebarnya secara berturut-turut yaitu 5,4 meter dan 2,1 meter. Jika dihitung jumlahnya, terdapat 15 buah besi yang memanjang dan 36 buah besi yang dipasang melintang atau melebar. Besi memanjang dan melintang tersebut saling berpotongan dan membentuk pola persegi berukuran $15 \times 15 \text{ cm}^2$.
2. *Wiremesh Roll*, anyaman besi *roll* atau gulungan pada dasarnya berasal dari anyaman besi lembaran yang dibuat dalam bentuk gulungan. Ukuran *wiremesh roll* memiliki lebar 2,1 m serta panjang 5,4 m.

Selain jenisnya, *wiremesh* juga memiliki ukuran yang beragam yaitu mulai dari M4 - M12. Berikut penjelasan detail mengenai ragam ukuran *wiremesh*:

Tabel 2.1. Detail Ukuran *Wiremesh*

<i>Wiremesh</i>	Diameter (mm)	<i>Actual Weight</i> (gr/mm)	Kekuatan Tarik (N/mm ²)	Batas Ulur (N/mm ²)	<i>Elongation</i> (%)
M5	4,5	19,55	Min 490	Min 400	Min 8%
M5	4,7	21,33	Min 490	Min 400	Min 8%
M6	5,7	31,37	Min 490	Min 400	Min 8%
M7	6,7	43,34	Min 490	Min 400	Min 8%
M8	7,5	54,31	Min 490	Min 400	Min 8%
M8	7,7	57,24	Min 490	Min 400	Min 8%
M9	8,5	69,75	Min 490	Min 400	Min 8%
M9	8,7	73,07	Min 490	Min 400	Min 8%
M10	9,5	87,13	Min 490	Min 400	Min 8%
M10	9,7	90,84	Min 490	Min 400	Min 8%
M11	10,5	106,44	Min 490	Min 400	Min 8%
M11	10,7	110,53	Min 490	Min 400	Min 8%
M12	11,5	127,68	Min 490	Min 400	Min 8%
M12	11,7	132,16	Min 490	Min 400	Min 8%

(Sumber: Jayasteel)

Dalam industri konstruksi, *wiremesh* M10 merupakan ukuran yang ideal dan sering digunakan dalam pembangunan struktur beton serta mudah ditemukan dan banyak tersedia di pasaran. *Wiremesh* M10 dapat digunakan dalam berbagai jenis proyek konstruksi, mulai dari jalan tol, gedung tinggi, hingga infrastruktur.

2.7 Penelitian Sebelumnya

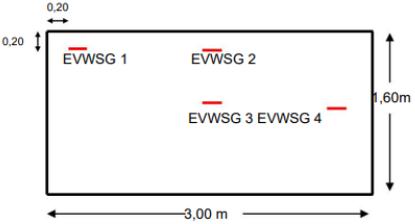
Tabel 2.2. Penelitian Terdahulu

No	Penulis (tahun)	Intisari
1.	Chatarina Niken, Anggita Yuliana Lestari,	Benda uji berupa 3 sampel balok menggunakan PCC berukuran 15 x 15 x 60 cm f_c' 20.75 MPa dan 3 sampel balok HPC f_c' 60 MPa. Setiap balok diletakkan pada 2 tumpuan, dipasang alat pengukur regangan yang dipasang kawat getar pada jarak

Tabel 2.3. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

Masdar Helmi, Hasti Riakara Husni (2023)	5 cm dari tepi masing-masing balok, alat pengukur regangan ini mampu mendeteksi regangan dan suhu dalam beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyusutan pada PCC mempunyai bentuk yang mirip dengan temperatur pada beton, sedangkan penyusutan pada HPC sama dengan temperatur pada beton sampai umur 8 jam, penyusutan tidak mengalami perubahan sampai 24 jam. Penyusutan autogenous tertinggi pada HPC ditunjukkan pada $e (\pm 9.0 E-05)$ or ± 225 kali lebih besar dibandingkan pada PCC. Fenomena ini terjadi pada jam ke-20. Sedangkan penyusutan autogenous tertinggi pada PCC terjadi pada jam ke-8 ($\pm 4.0E-07$).
2. Guilin Zhang, Pang Chen, Xiaoyu Si, Jingde Wang, and Yang Han (2022)	Benda uji beton bertulang sebanyak 36 buah dengan ukuran 150 mm × 150 mm × 450 mm. Uji susut dilakukan untuk menguji nilai kekuatan beton dan rasio tulangan longitudinal terhadap susut pada benda uji beton bertulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan beton meningkat dari 35MPa menjadi 58,2MPa, dan tingkat susut beton menurun sekitar 30% dengan rasio tulangan 1,40%. Penyusutan beton menurun sekitar 40% dengan peningkatan rasio tulangan dari 0% menjadi 2,01%.
3. Lepeng Huang, Jianmin Hua, Ming Kang, Feng Bin Zhou, Qiming Luo (2019)	Spesimen yang digunakan untuk uji struktur pori terbuat dari plexiglas dengan dimensi bagian dalam 200 mm - 200 mm - 1000 mm. Delapan jenis benda uji dengan dua nilai kekuatan beton yang berbeda (C_{30} dan C_{60}) dicor dan empat rasio tulangan yang berbeda ($q = 0\%$, 1,14%, 3,24%, dan 6,56%). Penyusutan spesimen diukur menggunakan linear variable differential transducers (LVDTs) dengan rentang pengukuran dan ketelitian 2 mm dan 1 μ m, masing-masing. LVDT ditempatkan di dua ujung spesimen, dan titik pengukuran berada di tengah penampang specimen. Hasil percobaan menunjukkan bahwa tulangan mengubah struktur pori beton. Ukuran pori struktur beton meningkat secara linier dengan peningkatan rasio tulangan. Susut beton yang ditahan tulangan mengalami penurunan dengan bertambahnya rasio

Tabel 2.4. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

		tulangan. pengaruh tulangan pada struktur pori beton memberikan kontribusi terhadap penurunan regangan susut beton, itu karena <i>co-deformation</i> (kerjasama secara terkoordinasi untuk menahan beban) antara beton dan tulangan dan kekuatan tegangan kapiler.
4.	C Niken , T Elly, FX Supartono, I Laksmi (2018)	<p>Sampel pelat beton dengan kuat tekan 60 MPa. Spesimen yang digunakan berukuran 3000 mm × 1600 mm × 150 mm.</p> <p>Perilaku tersebut diperoleh dengan menggunakan empat alat pengukur regangan kawat getar tertanam pada specimen (VWESG).</p>  <p>Hasilnya terdapat hubungan yang sangat kuat antara kelembapan dan deformasi pada rentang umur 7 sampai 21 hari. Deformasi terbesar terjadi pada bagian sudut dan fluktuasi deformasi pada posisi samping lebih besar dibandingkan pada bagian sudut dan tengah. Puncak kelembapan relatif sekitar diikuti sepenuhnya oleh lembah deformasi terdalam pada waktu di sudut, sedangkan pada posisi lain rentang waktu tunda adalah 8 - 11 jam. Terdapat hubungan yang kuat antara suhu lingkungan dengan deformasi pada rentang umur 7 sampai 14 hari.</p>
5.	Salah Altoubat, Klaus-Alexander Rieder, M. Talha Junaid (2017)	<p>Benda uji mempunyai penampang lebar 200 mm dan kedalaman 150 mm di bagian tengah dengan lebar berangsur-angsur bertambah hingga 300 mm ke arah ujung.</p> <p>Dilakukan uji susut terkendali dan pelat kontinyu komposit berbeban skala besar. Kinerja jangka pendek dan jangka panjang diselidiki. Lebar retak akibat penyusutan dan beban, serta defleksi tengah bentang diukur. Tingkat dosis yang berbeda dari serat makro sintesis digunakan dan dibandingkan dengan <i>welded wire mesh</i> (WWM) konvensional. Dosis minimum serat dan WWM konvensional yang ditentukan oleh ANSI-SDIC2011 untuk mengendalikan retak pada pelat komposit diperiksa secara khusus. Uji susut terkendali menyediakan data lebar retak yang disebabkan oleh</p>

Tabel 2.5. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

		<p>penyusutan, sedangkan pelat kontinu skala besar dimaksudkan untuk memantau defleksi bentang tengah dan lebar retak pada tumpuan tengah yang disebabkan oleh beban, susut, dan rangkai.</p> <p>Hasilnya menunjukkan bahwa WWM minimum dan dosis serat mempunyai kinerja yang sebanding dalam mengendalikan lebar retak.</p>
6.	<p>Negin Yousefieh, Alireza Joshaghani, Erfan Hajibandeh, Mohammad Shekarch (2017)</p>	<p>Menyelidiki efektivitas penggunaan serat polimer dan logam dalam beton, tiga jenis serat berbeda, termasuk serat polipropilen, serat poliolefin, dan serat baja digunakan dalam penelitian ini. Kekuatan susut pengeringan maksimum sangat bergantung pada modul elastisitas serat.</p> <p>Kekuatan penyusutan pengeringan sangat bergantung pada modul elastisitas serat. Serat baja menunjukkan kinerja terbaik karena ekornya yang berbentuk kait. Serat tidak mempunyai pengaruh yang besar terhadap kuat tekan beton. Sifat fisik serat mempunyai pengaruh langsung terhadap pengurangan lebar retak. Serat polipropilen juga menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam mencegah berkembangnya retakan.</p> <p>Perbandingan kinerja serat menunjukkan kontribusi serat baja tertinggi dalam menurunkan regangan susut sebesar 29% pada umur 28 hari. Mengikuti tren dampak yang lebih rendah, serat poli-olefin dan polipropilen menurunkan regangan penyusutan akhir pengeringan masing-masing sebesar 13 dan 12 persentase.</p>
7.	<p>Abbas S.A. Al-Hedad, Ebony Bambridge, Muhammad N.S. Hadi (2017)</p>	<p>Benda uji kategori pertama meliputi pengecoran dan pengujian sembilan benda uji prisma beton berdimensi 75 x 75 x 280 mm. Spesimen ini dibagi menjadi tiga kelompok. Kelompok pertama meliputi tiga buah benda uji prisma beton tanpa tulangan dan diambil sebagai acuan. Kelompok kedua terdiri dari tiga benda uji prisma beton yang diperkuat dengan lapisan geogrid biaksial tunggal yang terletak 20 mm dari bagian atas benda uji. Tiga benda uji terakhir (kelompok ketiga) diperkuat dengan lapisan geogrid biaksial yang ditempatkan 37,5 mm dari bagian atas benda uji. Kategori benda uji kedua, yang disarankan dalam penelitian ini untuk mensimulasikan perilaku perkerasan beton, terdiri dari</p>

Tabel 2.6. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

		penyiapan dan pengujian enam benda uji pelat beton dengan dimensi 30 x 280 x 280 mm. Spesimen kategori ini dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama mencakup tiga benda uji pelat beton tanpa tulangan (Referensi). Kelompok kedua mencakup tiga benda uji pelat beton yang diperkuat dengan lapisan geogrid biaksial tunggal yang ditempatkan 15 mm dari bagian atas benda uji.																				
8.	Wengui Li, Zhengyu Huang b, Gongqiu Hu, Wen Hui Duan, Surendra P. Shah (2016)	<p>Geogrid biaksial yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari bahan komposit polipropilena.</p> <p>Uji eksperimen dilakukan pada beton spesimen diperoleh dengan mengawetkan dan mengeringkan spesimen tersebut dalam kondisi lingkungan yang terkendali.</p> <p>Hasil pengujian yang diperoleh menggambarkan bahwa, pada kondisi pengeringan yang terkendali, geo-grid dapat sedikit mengurangi regangan susut pengeringan pada perkerasan beton. Interval pengeringan pertama, 7–14 hari, perkuatan geogrid dapat mengurangi regangan susut pengeringan benda uji prisma beton antara 0,7% dan 15% lebih besar dari referensi. (2) Perkuatan geogrid dapat menurunkan regangan penyusutan pengeringan pada umur awal benda uji Kelompok G20. Sedangkan setelah 21 hari pengecoran, lapisan geogrid di Grup GP20 dan GP37.5 menunjukkan efek yang hampir sama. (3) Laju penyusutan pengeringan Kelompok GP20 dan GP37.5 menurun sekitar 2% lebih besar dibandingkan spesimen tanpa perkuatan selama durasi pengeringan. (4) Untuk benda uji pelat beton, perkuatan geogrid dapat mengurangi regangan susut sekitar 7–28% dibandingkan dengan benda uji kontrol.</p>																				
8.	Wengui Li, Zhengyu Huang b, Gongqiu Hu, Wen Hui Duan, Surendra P. Shah (2016)	<p>12 benda uji UHPC ukuran 100 mm 100 mm 515 mm untuk 4 kelompok dengan perbandingan tulangan memanjang yang berbeda mulai dari 0 (B0), 2,00 (B1) hingga 3,14 (B2) dan hingga 4,52% (B3) [22], sebagai ditunjukkan pada Tabel. Diameter batang baja memanjang adalah 8, 10 dan 12 mm dan tebal penutup beton adalah 20 mm.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Specimen</th> <th>Cross section (b × h)</th> <th>Reinforcing bar (Q235) [16]</th> <th>Reinforcement ratio (ρ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B₀</td> <td>100 mm × 100 mm</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>B₁</td> <td>100 mm × 100 mm</td> <td>4 φ8 mm</td> <td>2.00%</td> </tr> <tr> <td>B₂</td> <td>100 mm × 100 mm</td> <td>4 φ10 mm</td> <td>3.14%</td> </tr> <tr> <td>B₃</td> <td>100 mm × 100 mm</td> <td>4 φ12 mm</td> <td>4.52%</td> </tr> </tbody> </table>	Specimen	Cross section (b × h)	Reinforcing bar (Q235) [16]	Reinforcement ratio (ρ)	B ₀	100 mm × 100 mm	—	—	B ₁	100 mm × 100 mm	4 φ8 mm	2.00%	B ₂	100 mm × 100 mm	4 φ10 mm	3.14%	B ₃	100 mm × 100 mm	4 φ12 mm	4.52%
Specimen	Cross section (b × h)	Reinforcing bar (Q235) [16]	Reinforcement ratio (ρ)																			
B ₀	100 mm × 100 mm	—	—																			
B ₁	100 mm × 100 mm	4 φ8 mm	2.00%																			
B ₂	100 mm × 100 mm	4 φ10 mm	3.14%																			
B ₃	100 mm × 100 mm	4 φ12 mm	4.52%																			

Tabel 2.7. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

		<p>Dilakukan <i>heat curing treatment</i>, curing temperature in range of 20–90°C.</p> <p>Hasilnya menunjukkan bahwa sedikit penyusutan diamati ketika durasi pengeringan panas kurang dari 60 menit dan suhu pengeringan mencapai 48°C.</p> <p>Namun, ketika durasi pengeringan panas mendekati 70 menit dan suhu pengeringan sekitar 55°C, penyusutan usia awal meningkat secara drastis. Ditemukan bahwa penyusutan usia awal adalah sekitar 450 μm setelah 48 jam pengawetan panas. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penyusutan umur awal UHPC menurun secara signifikan dengan persentase sebesar 33–60% dengan peningkatan rasio tulangan baja longitudinal dari 2,0 menjadi 4,52%. Sementara itu, setelah 10 jam proses <i>heat curing</i>, hidrasi semen dan hidrasi sekunder pada UHPC cenderung selesai, sehingga menghasilkan struktur mikro yang padat dan kandungan CH yang rendah pada UHPC.</p>
9.	Naeimeh Jafarifar, Kypros Pilakoutas, Terry Bennett (2015)	<p>Uji penyusutan bebas dilakukan pada benda uji prismatic 150 x 150 x 550 mm.</p> <p>Penggunaan serat baja pada perkerasan beton bermanfaat dalam mengurangi dampak buruk penyusutan dengan mengendalikan distribusi regangan susut dan pertumbuhan retak.</p> <p>Hasilnya penyusutan pada awalnya menyebabkan retakan mikro yang pendek dan kecil dengan kedalaman yang dangkal dan jarak yang berdekatan. (1) retakan permukaan transversal terbentuk di seluruh pelat (dengan kepadatan lebih rendah di dekat tepi transversal); (2) retakan permukaan diagonal di dekat sudut; dan (3) retakan permukaan memanjang di dekat bagian tengah tepi transversal.</p>
10.	Masoud Soltani, Xuehui An, Koichi Maekawa (2003)	<p>Analisis elemen membran RC yang diperkuat dengan <i>wiremesh</i> yang dilas berdasarkan mekanisme mikro transfer tegangan pada domain RC yang retak.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Respon struktural dan perilaku rata-rata tulangan dan beton pada elemen RC yang diperkuat dengan <i>wiremesh</i> yang dilas sangat bergantung pada jarak kawat dan jenis tulangan. Untuk <i>wiremesh</i> yang dilas dengan jarak kawat

Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

<p>kurang dari 20 kali diameter kawat, jarak retak tidak tergantung pada jenis tulangan dan kinerja ikatan, dan untuk jarak kawat yang lebih besar, tegangan ikatan mengontrol perilaku retak elemen.</p> <ul style="list-style-type: none">• Secara umum, kemampuan material untuk menahan deformasi pada <i>wiremesh</i> yang dilas dengan jarak kawat yang kecil lebih tinggi dibandingkan dengan elemen RC yang diperkuat dengan batangan yang dideformasi, namun nilainya bergantung pada kemiringan retak.• <i>Wiremesh</i> yang dilas, menunjukkan jarak retak dan lebar retak yang lebih kecil dibandingkan dengan tulangan konvensional, namun memiliki daktilitas struktur yang lebih kecil
--

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian merupakan gambaran jalannya pelaksanaan penelitian secara terstruktur mulai dari studi literatur sampai mendapatkan hasil penelitian, serta penjelasan mengenai jalannya penelitian dan jadwal kegiatan yang akan dilakukan. Pelaksanaan penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu, studi literatur, persiapan pelaksanaan serta pelaksanaan di lapangan, pengambilan data dan analisis data. Secara umum proses pelaksanaan kegiatan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meletakkan *strain gauge* dan *wiremesh* pada benda uji berupa perkerasan kaku dengan ukuran $5\text{ m} \times 4,5\text{ m}$.
2. Membuat sampel uji kuat tekan.
3. Melakukan pengamatan deformasi beton selama 24 jam dan melakukan uji kuat tekan beton pada 24 jam setelah pembuatan sampel.
4. Mengolah dan menganalisis data hasil penelitian.
5. Mengambil kesimpulan dari hasil penelitian.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Jalan Tol Korpri-Purwotani STA 0+550 dengan menggunakan 2 segmen perkerasan kaku berukuran $5\text{ m} \times 4,5\text{ m}$ sebagai benda uji. Penelitian ini menggunakan tulangan *wiremesh* berukuran $1,67\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ ($1/3$ dari sisi panjang segmen $\times 1/3$ sisi pendek segmen) yang dipasang pada sudut segmen dengan kedalaman 15 cm dari permukaan perkerasan kaku. Penelitian ini juga menggunakan 1 buah pengukur regangan tertanam kawat getar yang disebut EVWSG (*Embedded Vibrating Wire Strain Gauge*) dengan panjang 153 mm pada setiap benda uji.

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dengan judul “Analisis Penggunaan *Wiremesh* terhadap Deformasi pada Perkerasan Kaku Usia Dini” dilakukan di Jalan Tol Korpri-Purwotani STA 0+550.



Gambar 3.1. Lokasi penelitian.

3.2 Persiapan Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini, dilakukan persiapan terlebih dahulu untuk seluruh peralatan dan bahan yang akan digunakan. Alat dan bahan yang dibutuhkan antara lain:

1. Alat

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

EVWSG digunakan sebagai pengukur perubahan regangan terhadap waktu yang dipasang pada benda uji. EVWSG dapat mendeteksi regangan hingga $3000 \mu\epsilon$ dengan akurasi sekitar 0,025% dan suhu beton antara -80°C dan 60°C dengan akurasi sekitar 0,5%. Pada penelitian ini EVWSG yang digunakan adalah tipe Geokon 4200.



Gambar 3.2. Alat EVWSG.

b. *Vibrating Wire Readout*

Vibrating wire readout adalah alat yang digunakan untuk melakukan pembacaan pada kawat getar yang tertanam di dalam beton. *Readout* yang digunakan pada penelitian ini yaitu model GK-404.

Gambar 3.3. Alat *vibrating wire readout*.

Tabel 3.1. Pengaturan Readout GK-404

Posisi	A	B	C	D	E	F
Digunakan dalam Geokon Tipe:	Semua	4300×4400 4500 4600 4700 4800 4900	4000	4200	4100	4300EX
Mode 1: Satuan, Perhitungan	Dg Digit $F^2 \times 10^{-3}$		$F^2 \times 10^{-3} \times 4,062$	$\mu\epsilon$ $\mu\text{Strain } (\epsilon)$ $F^2 \times 10^{-3} \times 3,304$	$F^2 \times 10^{-3} \times 0,39102$	Dg Digit $F^2 \times 10^{-3}$
Mode 2: Satuan, Perhitungan			Hz Hertz F=Frekuensi dalam Hertz			
Mode 3: Satuan, Perhitungan			μS μSec T=Periode (1/F) dalam μSec			
Frekuensi (Hz)	450-6000	1500-3500	450-1200	1500-3500	2500-6000	

Pengaturan untuk Geokon GK-404 *Vibrating Wire Readout* pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. *Readout* diatur pada posisi D, karena *strain gauge* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan model Geokon 4200 Series *Concrete Strain Gauge*.
- b. Mode yang digunakan adalah mode 1, dikarenakan *output* data yang diinginkan dalam bentuk *microstrain* dengan satuan $\mu\epsilon$.
- c. Termometer *hygrometer*
Termometer ini digunakan untuk mengukur temperatur dan kelembapan relatif atau *relatif humidity* (RH) di sekitar beton.



Gambar 3.4. Alat termometer *hygrometer*.

- d. *Stopwatch*
Stopwatch digunakan sebagai pengingat waktu untuk melakukan pembacaan data setiap 15 menit sekali.



Gambar 3.5. *Stopwatch*.

e. Meteran/penggaris

Meteran/penggaris digunakan untuk mengukur jarak saat penempatan *wiremesh* dan peletakkan alat EVWSG agar berada pada posisi yang telah direncanakan.



Gambar 3.6. Meteran.

f. *Compression testing machine* (CTM)

Compression testing machine (CTM) adalah alat yang digunakan untuk menguji kuat tekan beton. Alat *Compression testing machine* (CTM) yang digunakan memiliki kapasitas beban maksimal 3000 kN dengan merek CONTROLS.

g. Cetakan benda uji (*Mold*)

Cetakan benda uji (*mold*) digunakan untuk mencetak benda uji dengan bentuk yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Pada penelitian ini

menggunakan cetakan benda uji berbentuk kubus dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm.

2. Bahan

a. Beton *ready mix*

Beton yang digunakan adalah beton normal dengan mutu f_s 4,5 MPa.

b. *Wiremesh*

Wiremesh yang digunakan pada penelitian ini adalah *wiremesh* M10 dengan ukuran 1,67 m \times 1,5 m (panjang 1/3 sisi panjang segmen dan lebar 1/3 dari sisi pendek segmen). Baja *wiremesh* diuji kekuatannya terlebih dahulu sebelum digunakan. Hasil pengujian *wiremesh* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2. Data Hasil Uji Baja *Wiremesh*

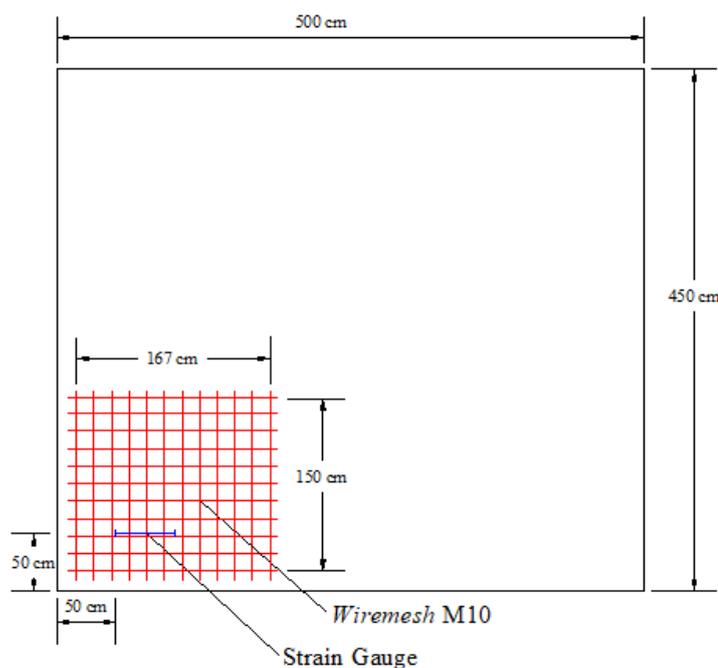
Sampel	Fy (MPa)
1	604,77
2	613,74



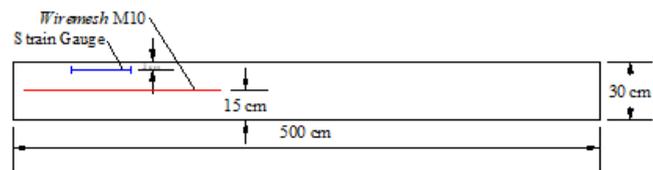
Gambar 3.7. *Wiremesh*.

3.3 Pembuatan Benda Uji

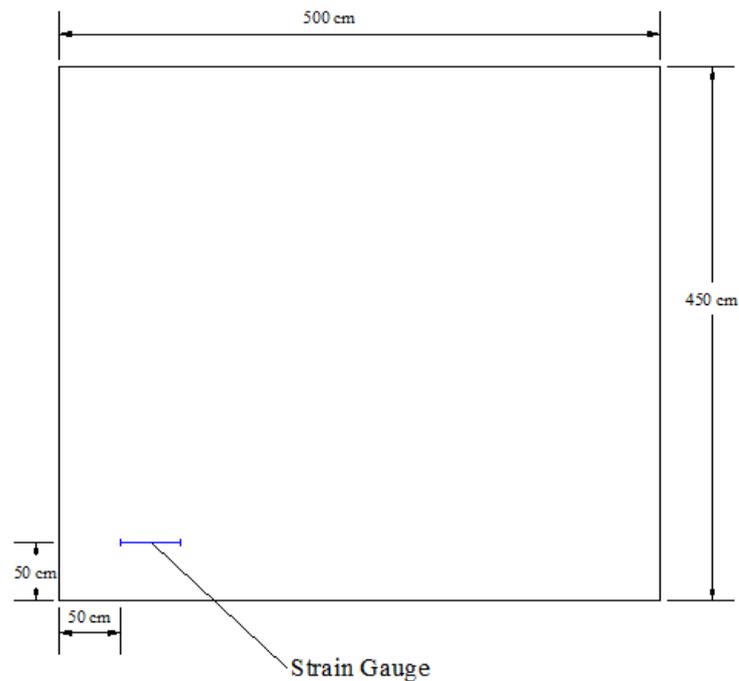
Setelah mempersiapkan alat dan bahan, selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji. Pada penelitian ini, pengujian yang dilakukan yaitu uji deformasi dan uji kuat tekan. Benda uji deformasi yang akan dibuat berupa segmen perkerasan kaku pada jalan tol sesungguhnya dengan ukuran $5\text{ m} \times 4,5\text{ m}$ sebanyak 2 segmen. Satu (1) segmen akan ditanam tulangan *wiremesh* dan dipasang alat EVWSG, tulangan *wiremesh* diletakkan di bagian sudut perkerasan kaku dengan pada kedalaman 15 cm dari permukaan segmen dan alat EVWSG dipasang pada jarak 50 cm dari tepi segmen dan dengan kedalaman 2 cm dari permukaan segmen (Gambar 3.8 dan Gambar 3.9). Sedangkan 1 segmen lainnya hanya dipasang alat EVWSG pada kedalaman 15 cm dari permukaan segmen (Gambar 3.10 dan Gambar 3.11). Alat EVWSG dipasang pada kedalaman 2 cm dari permukaan perkerasan kaku karena di dekat permukaan atas benda uji mengalami penurunan kelembapan yang cukup besar dan mengakibatkan tingginya tingkat penguapan yang tertarik. Keadaan ini menimbulkan tegangan tarik yang tinggi sehingga dapat memicu delaminasi (Niken dkk., 2018).



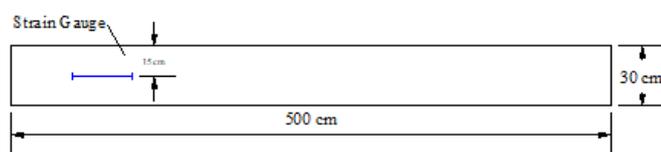
Gambar 3.8. Skema tampak atas benda uji dengan *wiremesh* dan EVWSG.



Gambar 3.9. Skema tampak samping benda uji dengan *wiremesh* dan EVWSG.



Gambar 3.10. Skema tampak atas benda uji tanpa *wiremesh*.



Gambar 3.11. Skema tampak samping benda uji tanpa *wiremesh*.

Setelah segmen beton dicor, dilanjutkan dengan perawatan beton (*curing*). Proses ini dilakukan untuk menjamin proses hidrasi dapat terlaksana dengan baik sehingga proses pengerasan dapat terjadi dengan sempurna dan tidak terjadi keretakan saat beton sudah mengering. Setelah dilakukan pengecoran, benda uji disemprot menggunakan *curing compound* agar tidak kehilangan air (Xue dkk., 2015). *Curing compound* diberikan sebanyak 2 kali pada permukaan

beton. *Curing compound* pertama diberikan 45 menit setelah pengecoran dan *curing compound* kedua diberikan 15 menit setelah *curing compound* pertama. *Curing compound* dikenakan pada benda uji tekan dan deformasi. Benda uji akan dipotong (*cutting*) menggunakan *concrete cutter* setelah beton berumur 8 jam pada setiap bentang segmen 5 m dengan kedalaman 7,5 cm ($\frac{1}{4}$ dari tebal perkerasan kaku).

Selanjutnya benda uji kuat tekan yang akan dibuat berupa beton kubus dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Benda uji dilapisi dengan *curing compound* sebanyak dua kali dengan cara yang sama seperti di lapangan. Sampel ditutup menggunakan plastik untuk menjaga kelembapan. Pengujian kuat tekan ini dilakukan setelah 24 jam menggunakan *compression testing machine* (CTM).

3.4 Metode Pengamatan Deformasi

Pada penelitian ini pengamatan dilakukan tepat setelah penuangan beton. Pembacaan dilakukan selama 24 jam dengan rentang waktu antar pembacaan 15 menit. Pengamatan deformasi beton dapat dilihat dengan menggunakan alat *readout* yang tersambung dengan kawat getar tertanam pada beton. Alat *readout* akan menampilkan angka deformasi dan suhu beton. Sedangkan untuk pembacaan temperatur dan RH di sekeliling beton menggunakan alat termometer digital atau disebut *hygrometer*.

3.5 Analisis Data Penelitian

Pada penelitian ini penulis melakukan analisis nilai regangan yang terjadi pada benda uji berdasarkan hasil pengujian dengan *vibrating embedded strain gauge* untuk mengetahui pengaruh suhu sekitar dan kelembapan relatif terhadap regangan yang terjadi pada perkerasan kaku.

Data yang didapatkan dari pembacaan EVWSG *Readout* kemudian diolah untuk mendapatkan nilai regangan yang sebenarnya. Pengolahan data dilakukan dengan Persamaan 1 sebagai berikut (Geokon, 2023):

$$\mu\varepsilon = (R_i - R_{i-1}) B + (T_i - T_{i-1}) (C_1 - C_2) \dots\dots\dots 1$$

Dimana:

- $\mu\varepsilon_{\text{true}}$: Regangan yang terjadi sebenarnya
- R_i : Regangan pada data ke-i
- R_{i-1} : Regangan pada data ke-i-1
- B : Koefisien kalibrasi VWESG = 0,99
- T_i : Suhu pada data ke-i
- T_{i-1} : Suhu pada data ke-i-1
- C_1 : Koefisien ekspansi EVWSG = 12,2
- C_2 : Koefisien ekspansi beton = 10,4

Pengolahan data tersebut dilakukan menggunakan program excel, yang kemudian akan menghasilkan grafik hubungan antara *strain*, suhu beton, kelembapan relatif dan suhu udara terhadap umur beton (waktu). Hasil grafik yang terbentuk akan dibandingkan antara perkerasan kaku dengan *wiremesh* dan tanpa *wiremesh*.

Untuk data hasil uji kuat tekan beton dianalisis menggunakan kriteria *dixon* terlebih dahulu. Analisis kriteria *dixon* mencakup pengamatan data terpencil (*outlier*) pada sampel dan cara menguji signifikansi statistiknya (ASTM E 178-21). Tahap pertama dalam analisis kriteria *dixon* adalah mengurutkan data terlebih dahulu dari yang terkecil (X_1) hingga terbesar (X_n). Kemudian, perhitungan dilakukan sesuai dengan jumlah data yang diperoleh berdasarkan Tabel 3.2. Jika hasil $D_{\text{hitung}} > D_{\text{tabel}}$, maka data tersebut merupakan data terpencil (*outlier*) dan dapat dibuang. Perhitungan akan terus dilakukan sampai $D_{\text{hitung}} < D_{\text{tabel}}$, atau dengan kata lain, sampai tidak ada data yang terpencil.

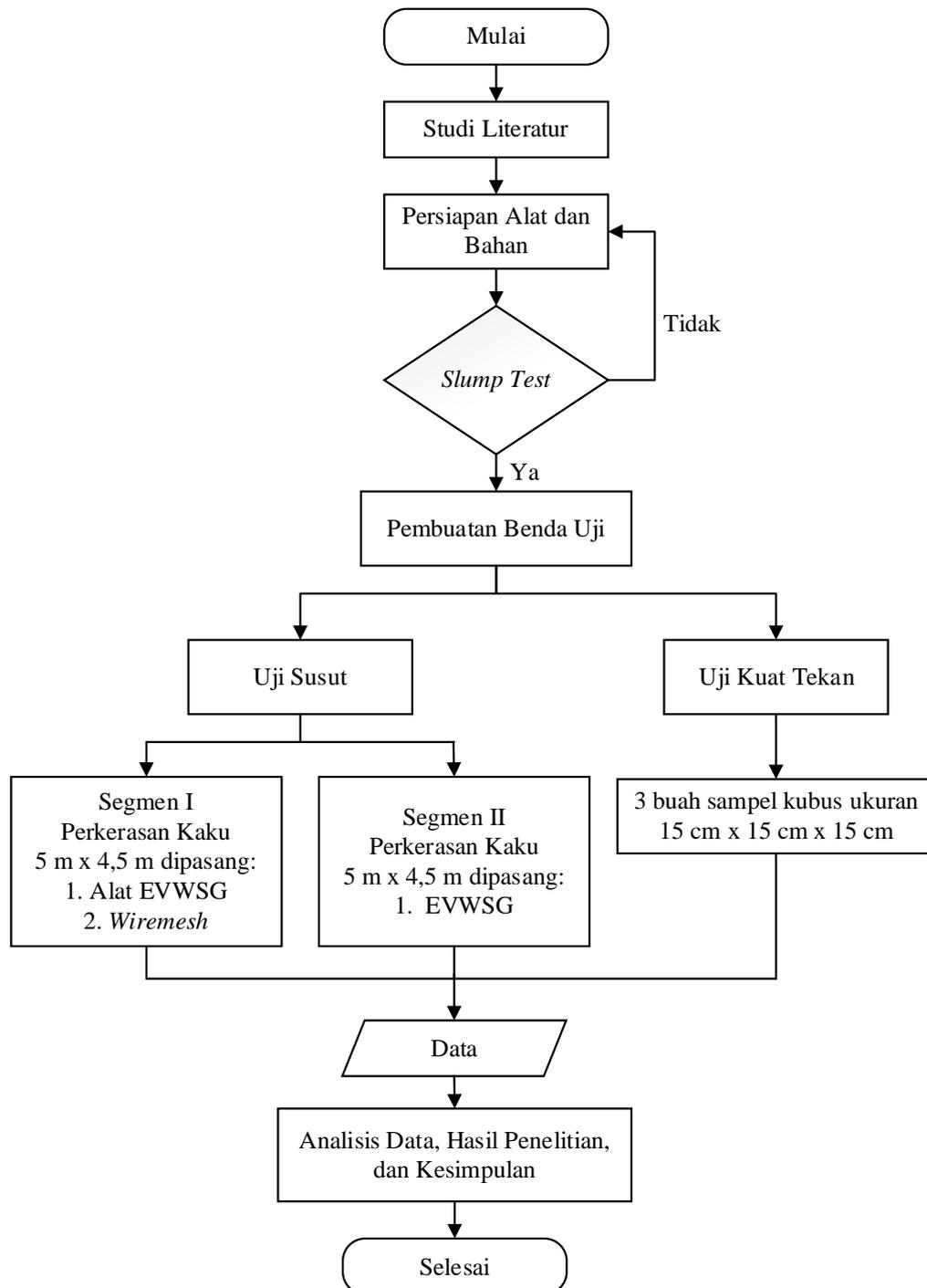
Tabel 3. 3. Kriteria Dixon

N	Kriteria	Significance Level (One-Sided Test)		
		10%	5%	1%
3	$D = (X_2 - X_1)/(X_n - X_1)$ jika	0,886	0,941	0,988
4	data terkecil yang dicurigai	0,679	0,765	0,889
5	$(X_n - X_{n-1})/(X_n - X_1)$	0,557	0,642	0,780
6	jika data terbesar yang	0,482	0,560	0,698
7	dicurigai	0,434	0,507	0,637
8	$D = (X_2 - X_1)/(X_{n-1} - X_1)$ jika	0,479	0,554	0,683
9	data terkecil yang dicurigai	0,441	0,512	0,635
10	$(X_n - X_{n-1})/(X_n - X_2)$	0,409	0,477	0,597
	jika data terbesar yang			
	dicurigai			
11	$D = (X_3 - X_1)/(X_{n-1} - X_1)$ jika	0,517	0,576	0,679
12	data terkecil yang dicurigai	0,490	0,546	0,642
13	$(X_n - X_{n-2})/(X_n - X_2)$ jika	0,467	0,521	0,615
	data terbesar yang dicurigai			
14		0,492	0,546	0,641
15		0,472	0,525	0,616
16		0,454	0,507	0,595
17		0,438	0,490	0,577
18		0,424	0,475	0,561
19		0,412	0,462	0,547
20		0,401	0,450	0,535
21	$D = (X_3 - X_1)/(X_{n-2} - X_1)$ jika	0,391	0,440	0,524
22	data terkecil yang dicurigai	0,382	0,430	0,514
23	$(X_n - X_{n-2})/(X_n - X_3)$ jika	0,374	0,421	0,505
24	data terbesar yang dicurigai	0,367	0,413	0,497
25		0,360	0,406	0,489
26		0,354	0,399	0,486
27		0,348	0,393	0,475
28		0,342	0,387	0,469
29		0,337	0,381	0,463
30		0,332	0,376	0,457

Sumber: (ASTM E 178-21)

3.6 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini yang digambarkan dalam diagram alir berikut:



Gambar 3.12. Diagram alir penelitian.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian mengenai pengaruh penggunaan tulangan *wiremesh* terhadap deformasi beton pada usia dini, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Deformasi pada beton dipengaruhi oleh suhu beton, kelembapan relatif, dan suhu lingkungan. Semakin tinggi suhu beton, maka semakin besar susut yang terjadi pada beton. Sama halnya dengan suhu beton, semakin tinggi suhu udara di sekitar beton, maka semakin besar penyusutan yang terjadi pada beton. Sebaliknya, apabila kelembapan relatif di sekitar beton tinggi, maka susut yang terjadi pada beton cenderung lebih kecil.
2. Penggunaan tulangan *wiremesh* pada posisi sudut perkerasan kaku mengurangi penyusutan beton pada usia 6-24 jam pertama dengan penurunan rata-rata sebesar 10,91%.
3. Pada penelitian ini, suhu sangat berpengaruh terhadap deformasi yang terjadi pada beton. Suhu udara dapat masuk ke dalam beton melalui pori pada permukaan beton. Jika suhu udara yang masuk kedalam beton tinggi, suhu beton juga akan meningkat. Peningkatan suhu ini mempercepat reaksi hidrasi semen, yang menyebabkan penguapan air. Penguapan air yang cepat pada suhu tinggi dapat menyebabkan penyusutan yang signifikan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, Adapun saran yang dapat disampaikan untuk penyempurnaan dan/atau kelanjutan penelitian dapat dirangkum dalam poin-poin berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih mendalam mengenai pengaruh penggunaan *curing compound* terhadap susut beton pada perkerasan kaku dalam jangka waktu yang lebih lama.
2. Pastikan alat yang digunakan dalam kondisi baik, sehingga kemungkinan terjadinya error pada data lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldo Azzana Zuhuri, & Raimon Kopa. (2021). Analisis Pengaruh Perkuatan Wire Mesh Terhadap Kekuatan Pilar Di Tambang Bawah Tanah Dengan Pengujian Skala Laboratorium. *Jurnal Bina Tambang*.
- Altoubat, S., Rieder, K.-A., & Junaid, M. T. (2017). Short- and long-term restrained shrinkage cracking of fiber reinforced concrete composite metal decks: an experimental study. *Materials and Structures*, 50(2), 140. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1011-0>
- Astanto, D. D., & Saelan, P. (2018). Studi Mengenai Hubungan antara Keleccakan dengan Faktor Air-Semen dan Kadar Air dalam Campuran Beton Cara SNI pada Kondisi Agregat Kering Udara (Hal. 43-53). *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 4(4), 43. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v4i4.43>
- ASTM E 178-21. (2021). *Standard Practice for Dealing With Outlying Observations*.
- Bachtariza, Nainggolan, P., Purba, E., & Marbun, J. A. (2021). Pengaruh Peningkatan Infrastruktur Jalan Terhadap Pendapatan Regional Di Kabupaten Batu Bara. *Jurnal Regional Planning*, 3(2). <https://doi.org/10.36985/jrp.v3i2.626>
- Bahar. (2004). *Pedoman Pekerjaan Beton*. Jakarta: Biro Engineering PT. Wijaya Karya.
- Bina Marga. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/Bm/2017. Jakarta. Kementerian Pekerjaan Umum.
- Brahmantyo, D. (2003). *Mekanika Rekayasa III*. Surabaya: Unnar.
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>

- Chasanah, F. (2015). Analisis Peningkatan Jalan Akibat Kerusakan Struktur Perkerasan Di Atas Tanah Ekspansif. *Jurnal Teknisia*, XX.
- Chatarina Niken, Anggita Yuliana Lestari, Masdar Helmi, & Hasti Riakara Husni. (2023). *Autogenous Shrinkage of Normal Concrete Beam with PCC and High-performance Concrete Beam with OPC*.
- Dong, M., Ge, F., Zhang, S., & Hong, Y. (2007). Dynamic equations for curved submerged floating tunnel. *Applied Mathematics and Mechanics*, 28(10), 1299–1308. <https://doi.org/10.1007/s10483-007-1003-z>
- Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>
- Geokon. (2023). *Model 4200 Series Vibrating Wire Strain Gauges Instruction Manual*.
- Hasan, Muhammad Harunur Rashid, Ebna Forhad Mondol, & S M Arifur Rahman and Tasnia Hoque. (2014). Variation of Early Age Autogenous Shrinkage with Ph of Water at Elevated Temperature. *Journal of Scientific Research*.
- Holt, E. E. (2001). *Early age autogenous shrinkage of concrete*. UTT Publication, Technical Research. Centre of Finland.
- Jayasteel. (2021). Spesifikasi Bahan Wiremesh. Surabaya: www.jayasteel.com.
- Koswara, & Arif, S. (2022). Uji Kelurusan Mesin Resonance 63 Kn Dengan Coupon Test Pesawat N219 Menggunakan Strain Gauge. *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi*, 32(1), 72–78. <https://doi.org/10.37277/stch.v32i1.1256>
- Kovler, K., & Zhutovsky, S. (2006). Overview and Future Trends of Shrinkage Research. *Materials and Structures*, 39(9), 827–847. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9114-z>
- Li, W., Huang, Z., Hu, G., Hui Duan, W., & Shah, S. P. (2017). Early-age shrinkage development of ultra-high-performance concrete under heat curing treatment. *Construction and Building Materials*, 131, 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.024>
- Mishra, R. K., Tripathi, R. K., & Dubey, V. (2016). Early age shrinkage pattern of concrete on replacement of fine aggregate with industrial by-product. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(4), 386–391. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2016.05.003>

- Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A., & Baroghel-Bouny, V. (2004). Predicting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.006>
- Niken, C. (2020). The Mechanism of Misalignment of Saw Cutting Crack of Concrete Pavement. In *Fracture Mechanics Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91149>
- Niken, C., Elly, T., Supartono, F., & Laksmi, I. (2018). Deformation of high performance concrete plate under humid tropical weather. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 316, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/316/1/012036>
- Pemerintah Indonesia. (2004). Undang-Undang N0. 38 Tahun 2004 tentang Jalan. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Rahmat, R., Hendriyani, I., & Pratama, R. D. (2017). Kajian Kuat Lentur Beton pada Perkerasan Kaku Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 6(1), 50–60. <https://doi.org/10.33084/mits.v6i1.257>
- Saputra, A., Yusup, M. I., & Abadi, M. K. (2022). Analisis Pengendalian Mutu Beton Spun Pile Diameter 300 Mm Produksi Pt. Waskita Beton Precast - Plant Bojonegara. *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, 4(01). <https://doi.org/10.47080/josce.v4i01.1683>
- Sidabutar, R. A., Saragi, Y. R., Pasaribu, H., Pardede, M., & Hutabarat, T. (2021). Evaluasi Perkerasan Jalan Kaku (Rigid Pavement) Pada Jalan Sm Raja Medan Dengan Metode Bina Marga. *Jurnal Visi Eksakta*, 2(2), 215–224. <https://doi.org/10.51622/eksakta.v2i2.395>
- Simanullang, & Pasaribu, H. (2021). Hubungan Kekuatan Tanah Dasar Dengan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). *Jurnal Teknik Sipil*.
- SNI 1972:2008. (2008). Metode Pengujian Slump Beton. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 2493:2011. (2011). Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 2847:2019. (2019). Persyaratan Beton Srtuktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Tenriajeng, A. T. (1999). *Rekayasa Jalan Raya-2*. Jakarta: Universitas Gunadharma.

- Tjokrodimuljo. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit.
- Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., & Wang, H. (2017). Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *149*, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064>
- Xue, B., Pei, J., Sheng, Y., & Li, R. (2015). Effect of curing compounds on the properties and microstructure of cement concretes. *Construction and Building Materials*, *101*, 410–416. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.124>
- Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E., & Shekarchi, M. (2017). Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete. *Construction and Building Materials*, *148*, 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.093>