

Perbandingan Antara Regangan Susut yang Terjadi pada Jalan Beton di Iklim Tropis Lembap dan Prediksi ACI 209R-92

Joses Aristo Malau ¹⁾

Chatarina Niken ²⁾

Masdar Helmi ²⁾

Laksmi Irianti ²⁾

Abstract

This journal discusses the comparison between ACI 209R-92 shrinkage predictions and the shrinkage that occurs in rigid pavements. The study was conducted in Indonesia, which has a humid tropical climate with high temperatures and humidity throughout the year. The behavior of concrete will be different from countries that have four seasons such as the United States, where ACI is published. The specimens used in this study were 5m × 4.5m × 0.3m in size. The concrete shrinkage strains were collected from the results of four vibrating wire strain gauges (VWSG) embedded in the concrete. Observations were made until the concrete was 90 days old. The results of the concrete strains were then compared with the predictions of ACI 209R-92. The largest concrete strain results occur in the center of the slab (VWSG 1) because the center area has the largest area in direct contact with the surrounding air, so the ambient temperature and humidity can enter the concrete and accelerate the evaporation of water in the concrete. The predicted results from ACI 209R-92 are about 13.5%-26.8% less than the research results. This difference is due to the fact that the location of this study has a fairly high temperature and high humidity because it is located in a tropical climate.

Key words : ACI 20R-92, concrete, humid, shrinkage, tropic

Abstrak

Jurnal ini membahas tentang perbandingan antara prediksi susut ACI 209R-92 dengan susut yang terjadi dalam perkerasan kaku. Penelitian ini dilakukan di Indonesia, yang memiliki iklim tropis lembap dengan suhu dan kelembapan yang tinggi sepanjang tahun. Perilaku beton akan berbeda dengan negara yang memiliki empat musim seperti Amerika Serikat, tempat dimana ACI diterbitkan. Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berukuran 5m × 4,5m × 0.3m. Regangan susut beton didapatkan dari pembacaan keempat alat *vibrating wire strain gauges* (VWSG) yang ditanam dalam beton. Pengamatan dilakukan sampai beton berusia 90 hari. Hasil dari regangan beton kemudian dibandingkan dengan prediksi ACI 209R-92. Hasil regangan beton yang terbesar terjadi pada daerah tengah pelat (VWSG 1) dikarenakan daerah tengah memiliki luasan yang berkontak langsung dengan udara sekitar paling besar, jadi suhu dan kelembapan sekitar bisa masuk ke dalam beton dan mempercepat penguapan air yang ada dalam beton. Hasil prediksi dari ACI 209R-92 sekitar 15,6%-36,7% lebih kecil daripada hasil penelitian. Perbedaan ini disebabkan karena lokasi penelitian ini memiliki suhu yang cukup tinggi dan kelembapan tinggi karena berada di iklim tropis.

Kata kunci : ACI 209R-92, beton, lembap, susut, tropis

¹⁾ Mahasiswa S1 pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
Surel: joses.aristo31@gmail.com

²⁾ Dosen pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Jalan. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 . Gedong Meneng Bandar Lampung. 35145.

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan Undang-undang Nomor 2 Tahun 2022, jalan dapat didefinisikan sebagai prasarana transportasi darat yang melingkupi seluruh bagian jalan, yang digunakan untuk lalu lintas. Posisi jalan bisa berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah (*elevated*), di bawah permukaan tanah dan/atau air (*underground*), serta di atas permukaan air, kecuali jalan rel, jalan lori, dan jalan kabel. Jalan berfungsi untuk menghubungkan satu daerah dengan daerah yang lain, sehingga mobilitas masyarakat dan barang/jasa bisa lebih baik sehingga meningkatkan kegiatan perekonomian di daerah tersebut.

Perkerasan jalan adalah campuran antara agregat dan bahan pengikat yang digunakan untuk melayani beban lalu lintas (Nashruddin dan Buana, 2021). Perkerasan jalan dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan materialnya, antara lain perkerasan lentur (*flexible pavement*) yang memakai aspal sebagai material pengikat, perkerasan kaku (*rigid pavement*) yang menggunakan semen sebagai material pengikat, dan juga perkerasan komposit (*composite pavement*) yang menggunakan material beton dan juga aspal. Dalam dekade terakhir, perkerasan kaku dipilih karena kekuatan dan ketahanannya terhadap cuaca dibandingkan perkerasan lentur, (Chatarina, 2021).

Perkerasan kaku adalah struktur yang terdiri atas pelat beton semen yang bersambung (tidak menerus) tanpa atau dengan tulangan, atau menerus dengan tulangan, terletak di atas lapis pondasi bawah atau tanah dasar, tanpa atau dengan lapis permukaan beraspal (Pd T-14-2003). Perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah struktur pelat yang secara terus-menerus terpapar ke lingkungan luar untuk waktu yang lama.

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi beton, diantaranya suhu sekitar (*surrounding temperature*) dan kelembapan relatif (*relative humidity*). Suhu sekitar dan kelembapan relatif dapat mempengaruhi beton dikarenakan suhu dan kelembapan bisa masuk ke dalam beton dan mempengaruhi karakteristik beton tersebut dan bisa menyebabkan susut. Menurut Chatarina (2021) cuaca akan mempengaruhi proses hidrasi dan setiap proses kimiawi selalu berkorelasi dengan perubahan panas.

Pengaruh lingkungan terhadap beton berbeda-beda tiap iklim. Indonesia merupakan negara dengan iklim tropis basah, dimana suhu dan kelembapannya tinggi sepanjang tahun. Hal ini berbeda dengan Amerika Serikat yang mempunyai suhu rata-rata tahunan yang cukup rendah dan kelembapan relatif yang tidak terlalu tinggi. Oleh karena perbedaan iklim tersebut, penelitian susut ini dilakukan dengan membandingkan susut beton menurut American Concrete Institute yang berlokasi di Amerika Serikat membuat dan mengeluarkan ACI 209R-92 dan di Indonesia. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi tentang reliabilitas ACI 209R-92 dalam memprediksi susut yang terjadi pada beton.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Jalan

Jalan merupakan salah satu jenis prasarana transportasi darat yang memegang peranan penting bagi pengembangan suatu daerah (Yudaningrum dan Ikhwanudin, 2017). Kondisi jalan yang baik akan memudahkan mobilitas penduduk dalam mengadakan hubungan perekonomian dan kegiatan sosial lainnya (Priana, 2018). Tanpa perkerasan jalan yang baik, sistem transportasi tidak dapat beroperasi dengan baik, perjalanan memakan biaya yang lebih besar, waktu tempuh yang lebih lama, dan kegiatan ekonomi akan terganggu (Barde *et al.*, 2023). Terdapat beberapa tipe perkerasan jalan yang ada di Indonesia berdasarkan material pengikatnya, yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), perkerasan komposit (*composite pavement*)

2.2 Perkerasan Kaku

Rigid pavement adalah perkerasan jalan raya dengan menggunakan material beton yang terdiri dari pasir, batu, dan semen dengan atau tanpa tulangan. Beton telah banyak digunakan dalam rekayasa jalan dikarenakan karakteristiknya yang unggul, seperti kekuatan yang tinggi, teknologi produksi yang mudah, konsumsi energi yang rendah, dan kinerja yang baik dengan tulangan (Zhang *et al.*, 2021; Fattouh *et al.*, 2023). Perkerasan kaku dapat menjadi pilihan yang lebih murah untuk jalan perkotaan dengan akses terbatas bagi kendaraan yang sangat berat (Bina Marga, 2017). Berdasarkan Pedoman Teknis Bidang Jalan Kementerian PUPR Pd T-14-2003 tentang perencanaan perkerasan jalan beton, perkerasan kaku dapat diklasifikasikan menjadi 4 jenis, yaitu perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan (*jointed plain concrete pavement*), perkerasan kaku bersambung dengan tulangan (*jointed reinforced concrete pavement*), perkerasan kaku menerus dengan tulangan (*continuously reinforced concrete pavement*), dan perkerasan kaku prategang (*prestress concrete pavement*).

2.3 Regangan Susut Beton

Susut (*shrinkage*) dapat didefinisikan sebagai perubahan volume beton akibat reaksi hidrasi atau oleh berkurangnya kandungan air pada beton. Sifat susut beton tidak dipengaruhi oleh beban (Fadhilah *et al.*, 2017). Susut merupakan proses yang *irreversible* yang artinya jika beton sudah benar-benar susut, tidak akan kembali lagi ke volume awal meskipun dijenuhkan dengan air.

Menurut Fadhilah *et al.* (2017), terdapat dua jenis susut beton, diantaranya:

- Susut Plastis (*Plastic Shrinkage*)
Susut plastis adalah pengurangan volume beton dalam keadaan plastis setelah pengecoran beton. Pengurangan volume ini menyebabkan retakan pada beton, yang disebut sebagai retak susut plastis. Beton yang memiliki permukaan yang luas seperti pelat akan lebih beresiko susut plastis karena penguapan terjadi lebih cepat melalui permukaan beton dan juga mudah dipengaruhi oleh udara di sekitar beton.
- Susut Pengeringan (*Drying Shrinkage*)
Susut pengeringan adalah berkurangnya volume elemen beton karena terjadi kehilangan air oleh penguapan. Susut pengeringan terjadi setelah beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi semen telah selesai. Hilangnya air bebas yang terkandung dalam beton yang mengeras, tidak menghasilkan perubahan dimensi yang berarti tetapi hilangnya air yang tertahan dalam pori-pori lah yang menyebabkan perubahan volume beton.

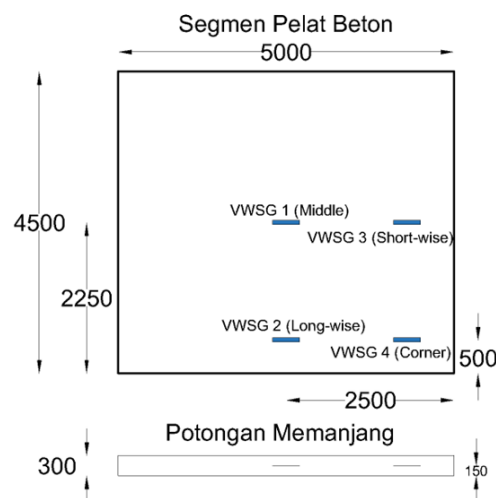
Pengaruh susut pada beton bisa terjadi karena material pembuatnya maupun faktor dari luar. Faktor-faktor luar yang mempengaruhi *shrinkage* diantaranya adalah:

- Suhu sekitar
Suhu sekitar beton memiliki pengaruh terhadap susut, karena suhu dapat masuk ke dalam beton dan dapat mempengaruhi beton. Temperatur yang tinggi dapat mengubah sifat fisis dan mekanis pada beton. Cuaca akan mempengaruhi proses hidrasi beton dan setiap proses kimia selalu berhubungan dengan perubahan suhu. Panas dapat menyebabkan partikel bergerak dan terjadi perubahan volume. Suhu sekeliling berpengaruh langsung ke susut beton sampai umur 14 hari (Chatarina, 2021). Temperatur dapat mempercepat proses penguapan air. Laju penguapan yang cepat pada beton usia muda bisa menyebabkan retak susut plastis, karena pada beton usia muda, ada banyak pori dan temperatur sekitar mudah untuk masuk ke dalam beton. Pengaruh suhu sekitar dominan pada elemen struktur yang memiliki permukaan yang luas yang dapat berkontak langsung dengan udara sekitar seperti jalan, jembatan, dsb.
- Kelembapan relatif
Kelembapan relatif tidak pernah konstan sepanjang waktu. Sama seperti suhu, kelembapan sekitar juga bisa masuk ke dalam beton dan mempengaruhi beton. Laju penguapan juga ditentukan oleh tingkat kelembapan. Laju penguapan cepat biasanya terjadi pada cuaca yang panas dan memiliki kelembapan yang rendah. Penelitian Al-Shathr *et al.* (2018) membandingkan *drying shrinkage* yang terjadi pada beton yang terpapar udara luar di Iraq yang panas dan memiliki kelembapan relatif yang rendah dengan beton terlindung. Hasilnya adalah beton yang terpapar udara dengan kelembapan relatif yang kecil menghasilkan *drying shrinkage* yang lebih besar.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Jalan Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Lokasi penelitian berdekatan dengan *Exit Toll* Kotabaru. Penelitian ini menggunakan pelat yang berukuran $5\text{m} \times 4,5\text{m} \times 0,3\text{m}$ dengan empat *vibrating wire strain gauge* (VWSG) yang tertanam didalam pelat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema penempatan VWSG pada segmen pelat beton.

Beton yang digunakan memiliki mutu f_s' 4,5 MPa. Setiap 1m^3 campuran beton mengandung material sebagai berikut:

- Semen OPC Baturaja Tipe 1 = 486 kg
- Agregat Kasar
 - Ukuran 10-20 mm = 546 kg
 - Ukuran 20-30 mm = 530 kg
- Agregat Halus = 727 kg
- Air = 170 liter
- W/C = 0,35
- *Superplasticizer* Naptha = 4,4 liter (0,9% dari berat semen)

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. *Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG)*
Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) adalah alat yang digunakan untuk mengukur regangan dan suhu internal pada beton. VWSG ini ditanam pada benda uji guna membantu mendeteksi regangan dan suhu internal yang terjadi.
2. *Vibrating Wire Readout*
Alat ini digunakan untuk membaca hasil regangan dan temperatur internal yang dihasilkan oleh *VWSG*.
3. *Hygrometer Temperature Clock (HTC)*
Alat ini berfungsi untuk mengukur temperatur sekitar dan kelembapan relatif.

3.2 Data Penelitian

Data yang diambil dalam penelitian ini yaitu:

1. Data kelembapan relatif
2. Data temperatur sekitar
3. Data regangan yang terjadi pada beton
4. Data suhu internal beton

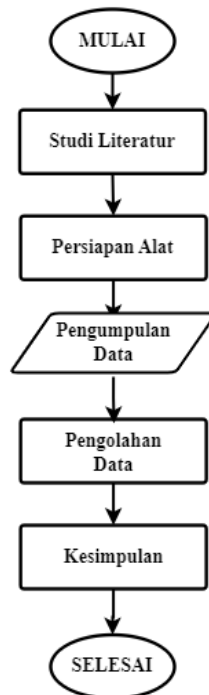
3.3 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian lihat Gambar 2.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Tahap pertama dalam penelitian ini adalah mengkaji beberapa literatur seperti jurnal-jurnal baik nasional maupun internasional, buku-buku, dan literatur lain yang terkait dalam penelitian ini.
2. Pengumpulan Data
Setelah itu, tahap selanjutnya adalah mengumpulkan data-data seperti yang sudah disebutkan dalam subbab 3.2.
3. Analisis Data
Setelah semua data sudah lengkap, selanjutnya adalah melakukan analisis data untuk mencari regangan susut yang sebenarnya. Hasil dari analisis data lapangan akan dibandingkan dengan ACI 209R-92.
4. Kesimpulan
Membuat kesimpulan berdasarkan analisis data yang sudah dilakukan.



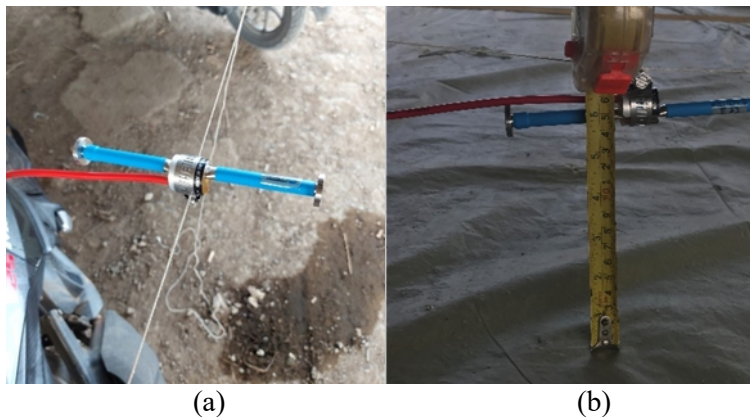
Gambar 2. Diagram alir penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pelaksanaan Penelitian

Dalam pemasangan alat VWSG (*Vibrating Wire Strain Gauge*) ke dalam *rigid pavement*, ada tahap yang dilakukan sebagai berikut:

1. Alat *VWSG* diikat tali dengan tujuan untuk mempermudah pemasangan alat ke dalam segmen yang akan di cor.
2. Kemudian tali diikat ke bekisting dan digantung sesuai ketinggian rencana, setengah dari tebal segmen perkerasan kaku yaitu 15 cm
3. Ketika tinggi beton saat pengecoran sudah mencapai setengah tebal segmen, dilakukan pemotongan tali, kemudian di cor kembali sampai ketebalan mencapai 30 cm.



Gambar 3. Pemasangan alat *VWSG* (a) pengikatan kawat dengan tali (b) pengukuran ketinggian alat.

4. Perkerasan kaku akan di curing selama 14 hari. Mulai hari ke 15-90 dimulai pengamatan dan pengambilan data seperti data suhu internal beton, regangan pada beton, temperatur lingkungan, dan kelembapan relatif. Pengamatan beton pada umur 15-21 hari dilakukan sekali setiap hari. Saat beton berumur 21 hari, kendaraan mulai melewati perkerasan kaku. Pada umur ke 22-90, dilakukan pengamatan sekali dalam seminggu.

4.2 Analisis Data

Data yang sudah didapatkan dari pembacaan *VWSG Readout* diolah dengan melakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai regangan yang sebenarnya dengan rumus sebagai berikut:

$$\mu\epsilon_{true} = (R_i - R_{i-1})B + (T_i - T_{i-1})(C_1 - C_2) \quad (1)$$

Dimana:

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

Hasil perhitungan regangan yang terjadi sebenarnya dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 4 dibawah ini:

Tabel 1. Regangan Susut yang Terjadi Sebenarnya pada Perkerasan Kaku

Hari ke-	SG 1 (Middle)	SG 2 (Long-wise)	SG 3 (Short-wise)	SG 4 (Corner)
15	2,031,E-04	1,620,E-04	1,433,E-04	1,437,E-04
16	1,944,E-04	1,530,E-04	1,420,E-04	1,396,E-04
17	1,807,E-04	1,471,E-04	1,411,E-04	1,311,E-04
18	1,680,E-04	1,388,E-04	1,380,E-04	1,231,E-04
19	1,635,E-04	1,382,E-04	1,433,E-04	1,236,E-04
20	1,742,E-04	1,409,E-04	1,419,E-04	1,215,E-04
21	1,808,E-04	1,432,E-04	1,444,E-04	1,270,E-04
28	1,901,E-04	1,528,E-04	1,525,E-04	1,379,E-04
35	2,184,E-04	1,763,E-04	1,677,E-04	1,633,E-04
42	2,325,E-04	1,951,E-04	1,924,E-04	1,871,E-04
49	2,425,E-04	2,066,E-04	1,980,E-04	1,947,E-04
56	2,680,E-04	2,287,E-04	2,088,E-04	2,165,E-04
63	2,743,E-04	2,328,E-04	2,209,E-04	2,212,E-04
70	2,761,E-04	2,383,E-04	2,285,E-04	2,267,E-04

77	2,857,E-04	2,511,E-04	2,452,E-04	2,409,E-04
84	2,952,E-04	2,592,E-04	2,473,E-04	2,534,E-04
91	2,999,E-04	2,605,E-04	2,537,E-04	2,575,E-04

Regangan terbesar terjadi pada bagian tengah (SG 1). Hal ini dikarenakan daerah tengah memiliki luasan yang berkontak langsung dengan udara sekitar paling besar, jadi suhu dan kelembapan sekitar bisa masuk ke dalam beton. Masuknya suhu dan kelembapan sekitar pada beton bisa mempercepat penguapan air yang ada dalam beton.

Hasil regangan yang sudah diteliti, kemudian dibandingkan dengan perhitungan regangan berdasarkan ACI 209R-92. Perhitungan regangan berdasarkan ACI 209R-92 diperoleh dari persamaan:

$$(\epsilon_{SH})_t = \frac{t}{35+t} (\epsilon_{SH})_u \quad (2)$$

Keterangan:

t = waktu (hari)

$(\epsilon_{SH})_t$ = regangan susut pada saat t (m/m)

$(\epsilon_{SH})_u$ = regangan ultimit susut = $\gamma_{SH} \times 925 \times 10^{-6}$ (m/m)

γ_{SH} = faktor koreksi

Berdasarkan ACI 209R-92, rentang nilai $(\epsilon_{SH})_u$ adalah 415×10^{-6} sampai 1070×10^{-6} (m/m). Dengan mengabaikan susut dan rangkai spesifik pada agregat, nilai rata-rata yang disarankan ACI untuk $(\epsilon_{SH})_u$ adalah 780×10^{-6} (m/m). Akan tetapi, dikarenakan iklim di Indonesia berbeda dengan di Amerika Serikat, nilai $(\epsilon_{SH})_u$ berubah untuk menyesuaikan iklim di Indonesia. Setelah melakukan *trial and error*, didapatkan nilai ACI 209R-92 yang mendekati hasil di lapangan dengan menggunakan $(\epsilon_{SH})_u$ sebesar 925×10^{-6} (m/m).

Faktor koreksi γ_{SH} mempunyai faktor yang menunjukkan kondisi yang berbeda, yaitu:

$$\gamma_{SH} = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \quad (3)$$

Keterangan:

K_1 = faktor *curing*

K_2 = faktor kelembapan relatif

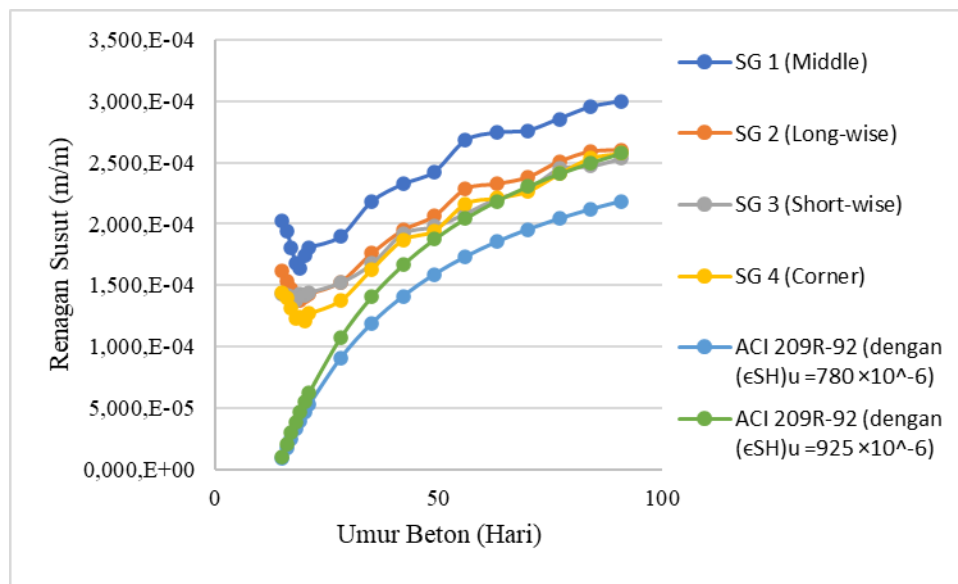
K_3 = faktor ketebalan rata-rata benda uji

K_4 = faktor kekentalan beton

K_5 = faktor kandungan agregat halus

K_6 = faktor kandungan semen

K_7 = faktor kandungan udara



Gambar 4. Perbandingan Regangan yang Diteliti dengan ACI 209R-92

Terdapat perbedaan antara regangan susut hasil penelitian di lapangan dan hasil prediksi dari ACI 209R-92 yang menggunakan nilai $(\epsilon_{SH})_u$ sebesar 780×10^{-6} (m/m) (Gambar 4), dimana hasil pada hari ke 90 lebih kecil 15,6%-36,7% daripada hasil penelitian. Perbedaan ini disebabkan karena penelitian ini dilakukan di Indonesia, dimana suhu rata-rata cukup tinggi karena berada di iklim tropis. Suhu yang tinggi bisa memperbesar terjadinya regangan susut. Berbeda dengan Amerika Serikat, negara yang menerbitkan ACI, dimana Amerika Serikat memiliki suhu rata-rata yang lebih rendah dibandingkan di Indonesia karena berada di iklim sub tropis. Menurut *National Centers for Environmental Information*, suhu rata-rata di Amerika Serikat sekitar 54,5°F, atau sekitar 12,5°C, sementara suhu rata-rata dalam penelitian kali ini berkisar 30,1°C. Maka dari itu, untuk memprediksi susut dengan ACI 209R-92 menggunakan nilai $(\epsilon_{SH})_u$ sebesar 925×10^{-6} (m/m) agar lebih mendekati nilai aslinya.

V. KESIMPULAN

Susut (*shrinkage*) adalah perubahan volume beton akibat berkurangnya kandungan air pada beton. Susut merupakan proses yang *irreversible* yang artinya jika beton sudah benar-benar susut, tidak akan kembali lagi ke volume awal meskipun dijenuhkan dengan air. Perilaku susut pada beton berbeda-beda sesuai dengan iklimnya. Pada penelitian ini, susut yang terbesar sampai hari ke-90 terjadi pada bagian tengah beton, yaitu sebesar 2,999,E-04. Hal ini disebabkan karena daerah tengah memiliki luasan yang berkontak langsung dengan udara sekitar paling besar jadi pengaruh lingkungan sekitar langsung mempengaruhi beton. Perbedaan antara regangan susut hasil penelitian dengan prediksi dari ACI 209R-92 yang menggunakan nilai $(\epsilon_{SH})_u$ sebesar 780×10^{-6} (m/m) terlihat dengan jelas dimana prediksi dari ACI lebih kecil 15,6%-36,7% daripada hasil penelitian. Hal itu dikarenakan iklim yang berbeda antara Indonesia dan Amerika Serikat, tempat dimana ACI diterbitkan. Oleh karena itu, nilai $(\epsilon_{SH})_u$ diubah menjadi 925×10^{-6} (m/m) agar lebih mendekati nilai aslinya.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 209. 1997. *ACI 209R-92: Prediction of Creep, Shrinkage, Temperature Effects in Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- Al-Shathr, B., Abdulameer, A., & Al-Attar, T. 2018. The role of ambient temperature variation on drying shrinkage development of self-compacting Portland-limestone cement concrete. *MATEC Web of Conferences* 162. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816202021>.
- Barde, D., Harinkhede, B., & Gajghate, V. 2023. Evolution of Cement Concrete Road in Highway: A Review. *International Journal of Research Publication and Reviews* 4(5): 3696-3699.
- Chatarina, N. 2021. Short-term deformation model of high-performance concrete plate based on surrounding temperature. *The Journal of Asian Concrete Federation* 7(2): 63–73. <https://doi.org/10.18702/acf.2021.12.7.2.63>.
- Fadhillah, G. M., Putri, R. A., Tudjono, S., & Priastiwi, Y. A. 2017. Kajian susut beton pada struktur beton bertulang yang cepat bongkar perancah studi kasus Gedung ICT Center Universitas Diponegoro. *Jurnal Karya Teknik Sipil* 6(2): 214-227.
- Fattouh, M. S., Tayeh, B. A., Agwa, I. S., & Elsayed, E. K. 2023. Improvement in the flexural behaviour of road pavement slab concrete containing steel fibre and silica fume. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01720>.
- Manual Desain Perkerasan Jalan No. 02/M/BM/2017. Direktorat Jendral Bina Marga, Jakarta.
- Nashruddin, A.Z., Buana, C. 2021. Analisis Penilaian Kerusakan Jalan dan Perbaikan Perkerasan pada Jalan Raya Roomo, Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik. *Jurnal Teknik ITS* 10(1): 27-34.
- Pd T-14-2003 Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen. Direktorat Jendral Bina Marga, Jakarta.
- Priana, S. E. 2018. Analisa faktor penyebab kerusakan jalan (studi kasus ruas jalan lingkaran utara Kota Padang Panjang). *Rang Teknik Journal* 1(1): 86-89. <https://doi.org/10.31869/rtj.v1i1.609>.
- Undang-undang Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2022 Tentang Perubahan Kedua Atas Undang-undang Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan. Sekretariat Negara. Jakarta.
- Yudaningrum, F., Ikhwanudin. 2017. Identifikasi Jenis Kerusakan Jalan (Studi Kasus Ruas Jalan Kedungmundu-Meteseh). *TEKNIKA* 12(2): 16-23. <https://dx.doi.org/10.26623/teknika.v12i2.638>.
- Zhang, P., Li, Q., Chen, Y., Shi, Y., & Ling, Y. F. 2019. Durability of steel fiber-reinforced concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Materials* 12(13). <https://doi.org/10.3390/ma12132184>.