



Deformasi perkerasan kaku pada usia dini

Diego Maradona Maharduta^a, Chatarina Niken^{b*}, Ratna Widyawati^c

^a Mahasiswa Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

^b Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

^c Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

HIGHLIGHTS

- Penelitian langsung dilakukan di lapangan
- Terdapat 4 bagian pada segmen yang diukur regangan susutnya.
- Penelitian berlangsung selama 24 jam sejak beton dalam kondisi setting.

INFO ARTIKEL

Diterima : 06-10-2024

Direvisi : 01-11-2024

Disetujui : 30-12-2024

Kata kunci:

Beton; perkerasan kaku; regangan; suhu

ABSTRAK

Sering ditemui keretakan pada perkerasan kaku. Salah satu penyebabnya ialah retak yang disebabkan oleh susut yang tidak mampu diakomodasi beton. Bila susut usia dini tidak bisa diakomodasi, maka resiko penurunan kinerja menjadi lebih besar. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui deformasi yang terjadi pada jalan beton di Provinsi Lampung, Indonesia sejak pengecoran sampai beton berumur 24 jam. Sampel penelitian berupa perkerasan kaku berukuran 5000×4500×300 mm dengan f_s' 4,5 MPa dan f_c' 25 MPa yang merupakan jalan tol sesungguhnya. *Curing* beton dilakukan dengan cara menyelimuti beton dengan geotextile dan dibasahi setiap 2 jam sejak beton berusia 13 jam 30 menit. Metode penelitian yang digunakan adalah observasi dan wawancara. Alat yang digunakan pada penelitian ialah Vibration Wired Embedded Strain Gauge (VWESG) dan penelitian dilakukan selama 24 jam sejak beton dicor. Analisis data pada penelitian ini menggunakan analisis deskripsi hasil pengamatan dan pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa deformasi beton yang terjadi pada perkerasan kaku di Indonesia dari yang terbesar hingga yang terkecil secara berurutan dimulai dari bagian tengah, bagian sisi panjang, bagian sisi pendek, lalu bagian sudut segmen.

© 2024 The Author(s). Published by Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Lampung

1. Pendahuluan

Perkerasan jalan yang umumnya digunakan yaitu perkerasan aspal yang merupakan perkerasan lentur dan perkerasan beton yang merupakan perkerasan kaku. Perkerasan kaku memberikan masa layan jangka panjang dan penerapan yang baik untuk lalu lintas yang padat. Akan tetapi, pemeliharaan yang tepat pada perkerasan kaku lebih sulit daripada perkerasan lentur jika terjadi kerusakan [1, 2]. Penyusutan merupakan fenomena umum pada beton, yang dapat menimbulkan tegangan tarik ketika penyusutan dibatasi. Penyusutan dapat menyebabkan keretakan sehingga dapat menurunkan umur layan struktur beton [3]. Deformasi akibat penyusutan beton merupakan salah satu

penyebab utama munculnya retakan, terutama pada elemen beton dengan permukaan terbuka yang besar seperti perkerasan jalan [4].

Susut pengeringan merupakan salah satu faktor terpenting dari ketahanan beton perkerasan jalan [5]. Hal ini terjadi karena adanya pertukaran kelembapan yang timbul akibat perubahan kelembapan relatif antara lingkungan dan beton [6-8]. Mekanisme susut pengeringan merupakan mekanisme yang kompleks yang belum sepenuhnya dipahami bahkan sampai saat ini [9]. Susut pengeringan dipengaruhi oleh banyak faktor seperti rasio air-semen, tulangan dan serat [10].

Penyusutan usia dini umumnya terjadi pada hari pertama [11]. Penyusutan usia dini menjadi perhatian karena pada jam-jam awal, segera setelah pengecoran, beton memiliki kapasitas regangan terendah dan paling sensitif terhadap tekanan internal [11]. Penyusutan pada usia dini dapat mengakibatkan retakan yang timbul dengan cara yang sama seperti pada usia selanjutnya. Percobaan menunjukkan bahwa penyusutan yang dimulai dari waktu setting awal merupakan penyebab utama dari retakan beton. *Curing*

* Penulis koresponden.

Alamat E-mail: chatarina.niken@eng.unila.ac.id (C.Niken).

Peer review dibawah tanggung-jawab Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.

DOI: <https://doi.org/10.23960/rekrijts.v28i3.114>

sering diabaikan pada waktu awal pengikatan hingga pengikatan akhir, karenanya retakan sering muncul. Susut pengeringan pada usia dini merupakan bagian penting dari susut usia dini.

Penelitian mengenai deformasi yang terjadi pada perkerasan kaku di beberapa negara lain sudah mendapatkan perhatian yang lebih baik dari akademisi maupun pemerintah

Pada penelitian sebelumnya, pengukur regangan dipasang di pusat, tepi, dan sudut pelat perkerasan beton Bandara Internasional Incheon (Korea Selatan) berdasarkan kedalaman pelat. Susut pengeringan yang dihitung cukup besar di dekat bagian atas pelat dimana air menguap, dan susut pengeringan diferensial antara bagian atas dan bawah pelat meningkat hingga umur beton hampir satu bulan [12]. Disisi lain, peningkatan kadar semen dari 12% menjadi 15% tidak berpengaruh signifikan terhadap regangan susut pengeringan rolled compacted concrete pavement (RCCP) pada umur awal, sementara itu, campuran dengan kadar semen 15% menunjukkan regangan susut pengeringan 6% lebih tinggi dalam jangka panjang [13]. Hasil pengujian lain menunjukkan bahwa dengan meningkatkan kadar semen pada RCCP dari 12% menjadi 15%, regangan susut pengeringan meningkat baik pada kondisi yang di-curing maupun yang tidak di-curing. Sangat direkomendasikan bahwa rasio agregat kasar terhadap agregat halus (C/F) digunakan pada kisaran 1,0 hingga 1,2 dalam campuran RCCP [14].

Penyusutan kimiawi sangat cepat pada pasta semen OPC. Namun, pada semen PPC, durasi setting relatif lebih sedikit dibandingkan dengan semen OPC dan portland slag cement (PSC). Perilaku penyusutan pengeringan pada semen OPC dan PSC mirip dalam 24 jam pertama. Untuk mencegah penyusutan dan mengoptimalkan proses hidrasi, pengawetan atau pembasahan sampel diperlukan pada semen PPC [15].

Penyusutan autogenous pasta alkali-activated fly ashslag (AAFS) pada 24 jam pertama setelah pengecoran terjadi terutama karena kontraksi volume oleh penyusutan kimiawi dalam keadaan segar, yang menempati sekitar 70% dari total penyusutan autogenous. [16].

Dalam upaya untuk mengontrol atau menghindari terjadinya kerusakan perkerasan kaku akibat hal tersebut, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai perkerasan kaku yang dipakai di Indonesia. Penelitian ini membahas deformasi pada struktur perkerasan kaku usia dini.

nggar

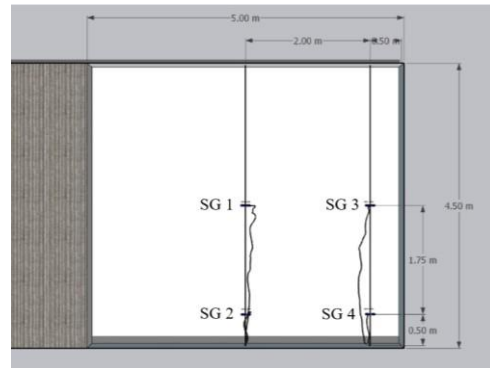
2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental pada segmen jalan tol sesungguhnya yang terletak pada Gerbang Tol Kota Baru, Lampung. Regangan susut di empat posisi seperti pada Gambar 1 diukur setiap interval 15 menit selama 24 jam pertama menggunakan Vibrating Wired Embedded Strain Gauge (VWESG). VWESG mempunyai kemampuan untuk mengukur regangan dengan resolusi sebesar 3000 $\mu\epsilon$ dan akurasi sekitar 0,025% dan suhu beton antara -80° C dan 60° C dengan akurasi sekitar 0,5%. Suhu dan kelembapan relatif lingkungan dicatat setiap pengukuran dilakukan menggunakan thermometer hygrometer.

Segera setelah beton sudah cukup mengeras, segmen diselubungi dengan geotextile basah yang disiram setiap 2 jam. Hal ini dilakukan agar sampel tidak dipengaruhi oleh

lingkungan. Sehingga air yang berada di udara tidak dapat menembus beton. Dikarenakan air merupakan faktor utama dalam proses hidrasi dan mekanisme penyusutan.

Simulasi numerik dilakukan pada dua skenario utama: pertama, tanpa perkuatan fondasi, dan kedua, dengan perkuatan tiang pancang. Hasil simulasi dianalisis dari aspek penurunan vertikal struktur (*settlement*), deformasi lateral tanah, serta faktor keamanan. Hasil tersebut divisualisasikan dalam bentuk kontur deformasi.



Gambar 1 Posisi VWESG pada segmen perkerasan kaku

Keterangan:

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

a. Bahan

Bahan perkerasan kaku antara lain Ordinary Portland Cement (OPC) Tipe I merk Baturaja, batu pecah dari Lampung Tengah dengan ukuran maksimum 30 mm dipilih sebagai agregat kasar, pasir dari Gunung Sugih dengan modulus kehalusan 2,41 dan ukuran maksimum 5 mm digunakan sebagai agregat halus. Superplasticizer tipe E (water reducing and accelerating admixture) juga digunakan dalam campuran untuk mengurangi jumlah air pengaduk sekaligus mempercepat proses pengikatan awal dan pengerasan beton.

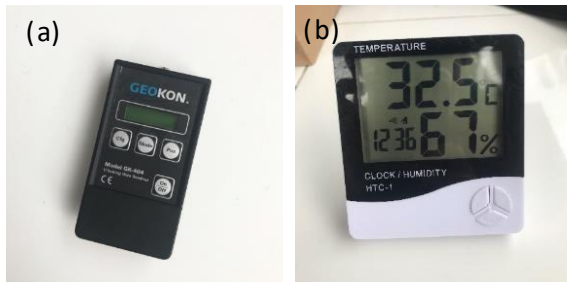
b. Proporsi Campuran

Proporsi campuran beton mutu $f_s' 4,5$ MPa dan $f_c' 25$ MPa dirancang mengacu pada SNI 7656-2012. Campuran yang digunakan untuk jalan beton disajikan pada Tabel 1. Dosis superplasticizer adalah 0,9% dari berat semen, faktor air semen (w/c) 0,35 dan slump 7,5 cm.

Tabel 1 Mix Design

Mutu Beton	Satuan	$f_s' 4,5$ MPa
Semen Tipe 1	kg	486
Agregat Kasar	kg	1076
Agregat Halus	kg	727
Air	liter	170
Superplasticizer Tipe E	liter	4,4
Total		2459

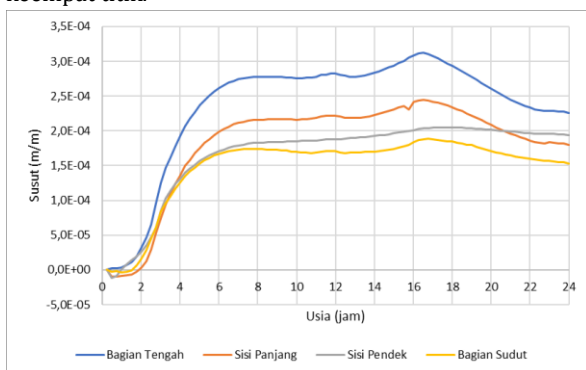
c. Alat Uji



Gambar 2. (a) Vibrating Wire Readout
(b) Thermometer hygrometer

3. Hasil dan Pembahasan

Pengukuran regangan diilustrasikan pada Gambar 3. Titik-titik data menunjukkan nilai dari regangan susut dari keempat titik.



Gambar 3 Susut selama 24 jam

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, regangan susut secara bertahap berubah. Pada bagian tengah, sisi panjang dan bagian sudut susut yang terjadi umumnya terus naik di awal dan mengalami kenaikan cukup tinggi pada 2,4 jam menuju 4,8 jam yaitu sekitar $1,72 \times 10^{-4}$ m/m; $1,45 \times 10^{-4}$ m/m; $1,07 \times 10^{-4}$ m/m. Sedangkan bagian sisi pendek sempat mengalami penurunan susut di awal atau bisa dikatakan beton mengembang dan kenaikan yang terjadi pada 2,4 jam menuju 4,8 jam tidak sebesar sampel lainnya, yaitu sekitar $1,09 \times 10^{-4}$ m/m. Fluktuasi ini dapat disebabkan oleh penyusutan kimiawi dan penyusutan pengeringan. Penyusutan autogenous adalah pengurangan volume makroskopis dari material semen ketika semen terhidrasi setelah waktu pengikatan awal tanpa pengaruh luar [17]. Penyusutan pengeringan dihasilkan oleh tegangan kapiler, tegangan permukaan padat, dan penarikan air yang terabsorpsi dan air interlayer dari gel semen [17, 18].

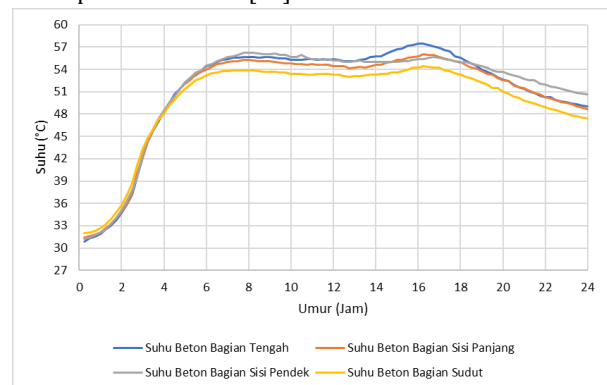
Kurva deformasi di keempat titik kurang lebih sama, tetapi masih ada perbedaan pada bagian sisi pendek. Ketika beton berusia lebih dari 17 jam, bagian sisi pendek tidak mengalami kembang. Nilai absolut regangan penyusutan dari yang terbesar ialah bagian sudut, sisi pendek, sisi panjang dan bagian tengah. Sedangkan regangan pengembangan dari yang terbesar ialah bagian tengah, sisi panjang, sisi pendek dan bagian sudut. Laju pertumbuhan susut autogenous dan susut pengeringan berangsur-angsur

berkurang, seiring dengan bertambahnya umur beton dan perkembangan hidrasi [17, 18].

Tren variasi regangan adalah mengalami susut pada proses pemanasan (umur 1 sampai 16 jam) dan mengalami kembang pada proses pendinginan (umur 0 sampai 1 jam dan 16 sampai 24 jam). Terdapat beberapa pergantian pemuaian dan penyusutan. Hal ini disebabkan oleh:

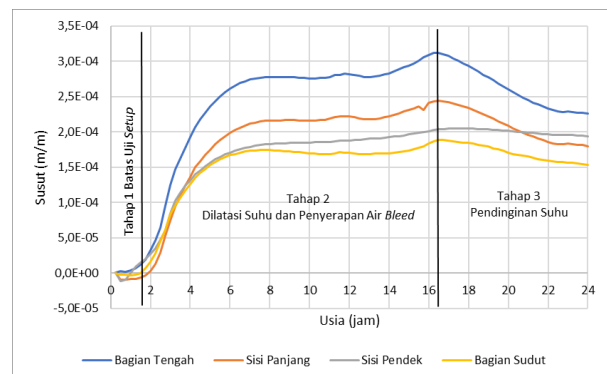
- 1) Respon suhu internal beton (Gambar 4) terhadap suhu lingkungan adalah proses konduksi panas dengan jeda waktu tertentu.
- 2) Hilangnya air pada beton yang terdiri dari air kapiler, air yang terabsorpsi dan air interlayer akan menyebabkan susut pengeringan. Hilangnya air interlayer pada gel tobermorite dari pasta semen meningkat seiring dengan naiknya temperatur [19, 20].
- 3) Laju difusi temperatur pada beton lebih besar daripada susut pengeringan sekitar 1000 kali [21].

Susut kimiawi dipengaruhi oleh perubahan temperatur pada beton [22]. Alasan yang mungkin yaitu adanya evolusi struktur mikro dan energi aktivasi semu yang dipengaruhi oleh temperatur [23]. Dibandingkan dengan deformasi termal dan susut pengeringan, susut autogenous merupakan komponen perubahan volume yang paling penting pada beton pada umur awal [24].



Gambar 4 Suhu beton vs waktu

Pengukuran deformasi autogenous pada usia dini dapat dibagi ke dalam 3 tahap yang berbeda. Tahap-tahap ini ditandai pada Gambar 5 dan dijelaskan pada bagian berikut.



Gambar 5 Tahapan 24 jam pertama dari hasil deformasi autogenous awal

- Tahap A: ~ (0 - 1½ jam)

Selama jam-jam pertama pencampuran, beton berbentuk cair dan bertindak sebagai plastis. Kondisi perkerasan kaku masih dipengaruhi oleh lingkungan sekitar, terutama suhu dan kelembapan relatif.

Suhu sekitar memengaruhi laju hidrasi beton; semakin tinggi suhu, semakin cepat reaksi hidrasi terjadi. Pada suhu yang tinggi, air dalam beton juga lebih cepat menguap, menyebabkan deformasi plastis lebih signifikan karena kehilangan air pada tahap awal. Sebaliknya, pada suhu yang rendah, laju hidrasi lebih lambat dan kehilangan air karena penguapan lebih sedikit, mengurangi deformasi plastis.

Kelembapan relatif juga mempengaruhi deformasi beton usia dini. Pada kondisi kelembapan tinggi, penguapan air dari beton berkurang, mengurangi deformasi plastis karena kehilangan air terbatas. Namun, kelembapan yang tinggi juga dapat memperlambat pengerasan beton secara keseluruhan. Sebaliknya, pada kelembapan rendah, penguapan air lebih cepat, menyebabkan deformasi plastis lebih besar, tetapi proses pengerasan dapat lebih cepat.

- Tahap B: $\sim (1\frac{1}{2} - 16\frac{1}{2}\text{jam})$

Efek termal dan reabsorpsi air yang keluar menyebabkan penyusutan sampel dari satu setengah ($1\frac{1}{2}$) hingga empat belas (14) jam sejak pengukuran dimulai. Air ekstra naik ke permukaan sampel beton saat agregat dan partikel semen mengendap. Setelah tahap A, air yang keluar (jika ada) dalam hal ini ditarik kembali ke dalam sampel melalui hisapan kapiler yang memungkinkan sampel menyusut. Pada saat air bleed benar-benar terserap ke dalam sampel beton, hidrasi yang sedang berlangsung memperbesar kenaikan tekanan kapiler. Hal tersebut merupakan penyebab utama deformasi penyusutan autogenous pada usia dini. Namun, dalam kasus ini, reabsorpsi air yang keluar bertepatan dengan fase penyusutan termal sehingga penyusutan yang dikontrol oleh tegangan kapiler tidak teramati dengan jelas. Penyusutan termal yang dikontrol oleh reaksi hidrasi melebihi hisapan kapiler dan menyebabkan penyusutan yang besar.

Curing dilaksanakan sejak beton berumur 13,5 jam dengan menggunakan geotextile yang dibasahi setiap dua jam. Geotextile membantu mengurangi pengaruh langsung dari perubahan suhu dan kelembapan lingkungan pada permukaan beton. Dengan menahan perubahan suhu dan kelembapan, geotextile dapat membantu mengurangi deformasi termal dan kembang susut yang disebabkan oleh perubahan kondisi lingkungan.

Geotextile juga bertindak sebagai penghalang bagi penetrasi air ke dalam beton. Ketika air meresap ke dalam beton, itu bisa menjadi salah satu faktor penyebab susut yang signifikan, terutama jika terjadi sirkulasi air yang tidak merata di sepanjang permukaan beton. Dengan geotextile yang membatasi penetrasi air, deformasi kembang susut yang disebabkan oleh perubahan kadar air dapat dikurangi.

- Tahap C: $\sim (16\frac{1}{2} + \text{jam})$

Pada akhir pembentukan panas hidrasi, sampel mulai mendingin yang mengakibatkan pengembangan sampel beton. Pengembangan selama tahap lanjutan ini cukup besar karena efek pendinginan. Namun, ketika sampel beton mencapai suhu ruangan (curing), deformasi pengembangan berlanjut pada tingkat yang jauh lebih lambat. Dengan perkembangan hidrasi, ketersediaan air menjadi lebih rendah dalam struktur mikro sampel beton, dan hisapan kapiler berkontribusi pada deformasi penyusutan autogenous.

3. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, penyusutan autogenous usia awal diselidiki. Berdasarkan hasil eksperimen, kesimpulan utama dapat ditarik sebagai berikut:

- 1) Deformasi beton yang terjadi pada perkerasan kaku di Indonesia dari yang terbesar hingga yang terkecil secara berurutan dimulai dari bagian tengah, bagian sisi panjang, bagian sisi pendek, lalu bagian sudut segmen.
- 2) Dengan bertambahnya umur dan perkembangan hidrasi, regangan susut beton menurun dan regangan muai meningkat.
- 3) Deformasi yang terjadi pada 24 jam pertama pada perkerasan kaku mengalami fluktuasi. Dimana pada umur 0 sampai 1 jam, perkerasan kaku mengalami susut dan kembang secara bergantian, dan dilanjutkan penyusutan pada umur 1 hingga 16 jam. Pada umur 16 sampai 24 jam perkerasan kaku mengalami pendinginan sehingga deformasi yang terjadi adalah susut.

Ucapan Terima Kasih

Penulis sangat berterima kasih kepada Ibu Prof. C. Niken, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan peralatan yang diperlukan selama penelitian. Saya sangat berterima kasih kepada CV. Aprillio Construction atas bimbingan dan bantuannya terhadap penelitian saya.

Daftar Pustaka

- [1] Yang SC, Park GH, Know SM (2000) Construction trends of Korea concrete pavement. Korean Soc Road Eng 2(3):11– 32.
- [2] Um JY (2000) Methodology for constraining asphalt concrete overlay against reflection cracking. Korea Expressway Corporation Road Research Institute.
- [3] American Concrete Institute (ACI) (1992) Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures. ACI 209R-92. Report by ACI committee 209.
- [4] Gilbert RI (2001) Shrinkage, cracking and deflection-the serviceability of concrete structures. Electron J Struct Eng 1(1):2–145.

- [5] Li H, Xiao HG, Yuan J, Ou J (2004) Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Compos B Eng* 35(2):185–189.
- [6] Mohseni E, Saadati R, Kordbacheh N, Parpinchi ZS, Tang W (2017) Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. *J Clean Prod* 168:605–613.
- [7] Rousakis TC (2016) Reusable and recyclable nonbonded composite tapes and ropes for concrete columns confinement. *Compos B Eng* 103:15–22.
- [8] Gesoglu M, Ozturan T, Güneyisi E (2006) Effects of coldbonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. *Cem Concr Compos* 28(7):598–605.
- [9] Dohnalová L, Havlásek P (2020) Size Effect on The Ultimate Drying Shrinkage of Concrete-Experimental Evidence and Engineering Practice. *Acta Polytech CTU Proc* 26:13–18.
- [10] Mastali M, Kinnunen P, Dalvand A, Firouz RM, Illikainen M (2018) Drying shrinkage in alkali-activated binders—a critical review. *Constr Build Mater* 190:533–550.
- [11] E. Holt, (2005), Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages, *Cement Concrete Res.* 35 (3) 464–472.
- [12] Hae-Won Park, Dong-Hyuk Kim, Jin-Sun Lim, Cha-Sang Shim and Jin-Hoon Jeong, (2019), Prediction of differential drying shrinkage of airport concrete pavement slab *INTERNATIONAL JOURNAL OF PAVEMENT ENGINEERING* ISSN: 1029-8436
- [13] M. Abbasi, P. Shafigh, M.R. Baharum (2020), The Effect of Cement Content on Drying Shrinkage of Roller Compacted Concrete Pavement *AIP Conference Proceedings* 2284, 020019; <https://doi.org/10.1063/5.0027929> Published Online: 20 October 2020
- [14] M. Abbasi, P. Shafigh, M.R. Baharum, (2021), The effect of coarse to fine aggregate ratio on drying shrinkage of roller compacted concrete pavement in different curing conditions *Materiales de Construcción* Vol. 71, Issue 342, e246 ISSN-L: 0465-2746 <https://doi.org/10.3989/mc.2021.03520>
- [15] R.K. Mishra, R.K. Tripathi, Vikas Dubey, (2016), Early age shrinkage pattern of concrete on replacement of fine aggregate with industrial by-product, Raipur, India, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*
- [16] Guohao Fang, Hossein Bahrami, Mingzhong Zhang, (2018), Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated fly ash-slag pastes cured at ambient temperature within 24 h. University College London, London, *Construction and Building Materials*
- [17] American Concrete Institute Committee 209, (1997), Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure, Reapproved 1997, ACI, Farmington Hills, Mich, USA.
- [18] Z. P. Bazant and S. Baweja, (1995), Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structure: Model B3, ACI Committee, Michigan, Mich, USA.
- [19] P. Kumar Mehta and J. M. Paulo, (2006), Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 3rd edition.
- [20] T. Aly and J. G. Sanjayan, (2009), “Mechanism of early age shrinkage of concretes,” *Materials and Structures*, vol. 42, no. 4, pp. 461–468.
- [21] B. Zhu, (1999), Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete, China Electric Power Press.
- [22] K. M. Lee, H. K. Lee, S. H. Lee, and G. Y. Kim, (2006), “Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag,” *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1279–1285.
- [23] D. Shen, J. Jiang, J. Shen, P. Yao, and G. Jiang, (2016), “Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age,” *Construction and Building Materials*, vol. 103, pp. 67–76.
- [24] P. Lura, (2003), Autogenous deformation and internal curing of concrete [Ph.D. thesis], Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.