

Pengaruh Panas Hidrasi Semen Terhadap Perilaku Deformasi Beton Kolom Usia Dini

Aji Saputra¹⁾

Chatarina Niken²⁾

Dyah Indriana Kusumastuti²⁾

Ahmad Zakaria²⁾

Abstract

Concrete at an early age undergoes thermal deformation due to the heat generated by the cement hydration reaction. This deformation can cause cracks in the concrete. This study aims to determine the effect of cement hydration heat on the deformation behavior of early-age concrete columns. The study was conducted experimentally on 3 concrete column samples measuring 15 cm × 15 cm × 100 cm with a plan compressive strength of 20,75 MPa, using portland composite cement (PCC). The samples were covered with styrofoam immediately after casting. This research studied the behavior of concrete columns and the temperature inside using an embadded vibrating wire strain gauge embedded in each sample. The EVWSG was positioned at 45 cm from the bottom of the specimen. Observations were made for 24 hours at a span of every 15 minutes. The results showed that the behavior of deformation and temperature changes in concrete columns had a similar pattern. The minimum and maximum values of deformation and temperature in concrete respectively occurred at the age of 0 hour and 7,75 hours amounting to 5.4000E-0.7 (m/m) with a temperature of 29,5 °C and 5.6808E-0.5 (m/m) with a temperature of 36,1 °C and an average deformation of 3,0341E-0.5 with an average temperature of 32 °C.

Key words : Cement Hydration, Deformation, Concrete Column, Temperature in Concrete.

Abstrak

Beton pada usia dini mengalami deformasi termal akibat panas yang dihasilkan oleh reaksi hidrasi semen. Deformasi ini dapat menyebabkan keretakan pada beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh panas hidrasi semen terhadap perilaku deformasi pada kolom beton usia dini. Penelitian dilakukan secara eksperimental pada 3 sampel beton kolom berukuran 15 cm × 15 cm × 100 cm dengan kuat tekan rencana 20,75 MPa, menggunakan *portland composite cement* (PCC). Sampel ditutup dengan *styrofoam* segera setelah pengecoran. Penelitian ini mempelajari perilaku kolom beton dan suhu di dalamnya menggunakan alat *embadded vibrating wire strain gauge* yang ditanam pada tiap sampel. Posisi EVWSG berada pada 45 cm dari bagian bawah benda uji. Pengamatan dilakukan selama 24 jam dengan rentang setiap 15 menit. Hasil penelitian menunjukkan perilaku deformasi dan perubahan suhu dalam beton kolom memiliki pola yang mirip. Nilai minimum dan maksimum deformasi dan suhu dalam beton secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7,75 jam sebesar 5,4000E-0,7 (m/m) dengan suhu 29,5 °C dan 5,6808E-0,5 (m/m) dengan suhu 36,1 °C dan rata-rata deformasi sebesar 3,0341E-0,5 dengan rata-rata suhu 32°C.

Kata kunci : Hidrasi semen, deformasi, kolom beton, suhu dalam beton.

¹⁾ Mahasiswa S1 pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
Surel: saputraeye6@gmail.com

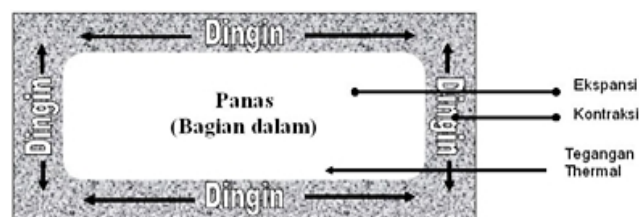
²⁾ Dosen pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Jalan. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 . Gedong Meneng Bandar Lampung. 35145.

I. PENDAHULUAN

Retak umumnya terjadi pada struktur beton, termasuk elemen kolom yang berfungsi meneruskan beban dari balok ke pondasi. Retak pada kolom dapat menimbulkan masalah serius bahkan sampai kehancuran kolom yang berakibat pada kegagalan struktur secara keseluruhan. Material yang tidak dapat mengakomodasi deformasi akan menurunkan ketahanan dan penampilan struktur. Beton merupakan material yang bersifat getas dengan toleransi terhadap deformasi yang rendah akibat tegangan tarik. Tegangan tarik muncul pada beton disebabkan oleh pembebanan, reaksi kimia dan lingkungan.

Pembebanan pada umumnya dianggap bertanggung jawab untuk menghasilkan sebagian besar tegangan tarik pada struktur beton, sementara banyak retakan pada beton dapat ditelusuri pada perubahan volumetrik intrinsik atau reaksi kimia yang pasti terjadi dalam pembentukan beton. Perubahan volume terjadi sebagai respon terhadap reaksi kimia dan efek termalnya pada beton. Perubahan suhu sebagai efek reaksi kimia antara semen dan air yang bersifat eksotermik, menyertai reaksi hidrasi semen. Ketika semen dicampur dengan air terjadi pelepasan panas, panas ini disebut panas hidrasi. Panas ini relatif cepat hilang pada bagian beton yang tipis dan tidak menimbulkan masalah. Pada bagian yang lebih tebal, karena konduktivitas termal beton yang lemah, gradien suhu yang tinggi dapat terjadi antara bagian dalam dan permukaan struktur (Rochaeti et al., 2014).

Beton memiliki sifat “*poor thermal conductivity*” sehingga beton dengan volume yang besar memerlukan waktu yang relatif lebih lama untuk melepaskan panas yang dikandungnya. Pada proses pelepasan panas, bagian permukaan beton akan lebih mudah melepaskan panas dibandingkan dengan bagian dalam. Hal ini mengakibatkan selalu terjadi perbedaan suhu antara beton bagian dalam dan bagian permukaan selama proses pelepasan panas berlangsung. Apabila hal ini tidak dapat diantisipasi atau dikendalikan, akan mengakibatkan retakan-retakan pada permukaan beton yang dapat berlanjut ke bagian dalam beton sehingga dapat mempengaruhi kekuatan dari konstruksi beton tersebut. Suhu maksimum beton segar yang diizinkan adalah 35°C (95°F) (Aldred dkk., 2007) Sedangkan maksimum perubahan suhu (*thermal shock*) yang dapat menyebabkan terjadinya kontraksi dan mengakibatkan retak adalah 40°C/jam (Rochaeti et al., 2014) Gambar 1 menunjukkan ilustrasi *poor thermal conductivity* pada beton.



Gambar 1. *Poor thermal conductivity* (Rochaeti et al., 2014).

Deformasi pada beton kolom yang terjadi selama tahap awal pengikatan meliputi penyusutan plastik yang terjadi saat beton masih plastis. Segera setelah semen bercampur dengan air terjadi deformasi kimiawi, bila pada saat tersebut spesimen dilindungi terhadap pengaruh luar maka disebut susut *autogenous*. Penyusutan pengeringan penguapan sebagian air dari pasta semen yang mengeras. Permukaan beton segar setelah dituang segera mengalami penyusutan plastik.

Penelitian mengenai deformasi pada beton usia dini telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pemantauan dan simulasi numerik terhadap temperatur dan regangan pada beton usia dini diperoleh perbandingan numerik antara prediksi numerik dengan hasil eksperimen (Azenha et al., 2009). Hubungan retak termal dan penyusutan usia dini pada struktur beton telah dipelajari oleh (Kucharczyková et al., 2017). Selama 24 jam pertama penuaan, semua campuran beton menunjukkan ekspansi. Deformasi usia dini pada beton dengan kandungan tambahan mineral yang tinggi dapat dibagi menjadi tiga fase yang digerakkan oleh mekanisme yang berbeda (Darquennes et al., 2011). Selain itu, tampak bahwa penggunaan tambahan mineral memiliki efek pada perilaku penyusutan plastik, tetapi dampak ini tidak sebanding dengan persentase penambahan mineral. Hal ini tergantung pada proses hidrasi dan struktur mikro material sementit.

(Tabatabai and Oesterle, 2017) menyimpulkan bahwa rangkai dan susut beton yang bergantung pada lingkungan dalam jangka pendek masing-masing dibatasi hingga maksimum sekitar 15% dari perubahan regangan suhu yang dialami beton. (Gilbert, 2017) mempelajari tentang pengendalian retak yang disebabkan oleh pengekan terhadap pendinginan usia dini dan penyusutan beton. (Zhao et al., 2020) telah melakukan analisis eksperimental dan teoretis tentang efek gabungan hidrasi, suhu dan kelembapan pada material berbasis semen usia dini.

Penyusutan usia dini balok beton berkinerja tinggi skala laboratorium dan skala penuh oleh (Niken, 2019) menunjukkan pola penyusutan dari spesimen skala penuh mirip dengan ukuran laboratorium. Penyusutan spesimen ukuran laboratorium adalah 31,5% lebih besar daripada spesimen skala penuh. (Wang et al., 2023) melakukan eksperimen penyusutan awal beton dan hukum pengembangan bidang suhu dan kelembapannya di lingkungan alami hasilnya menunjukkan bahwa kondisi retensi kelembaban dan retensi kelembaban termal mengurangi regangan susut beton pada umur 125 hari dengan rata-rata 30,7% dan 11,3%. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku deformasi kolom beton usia 0-24 jam. Perilaku deformasi yang diuji meliputi regangan (*strain*) dan suhu dalam beton yang dideteksi secara otomatis oleh kawat getar (EVWSG) yang ditanam pada tiap benda uji.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton (*concrete*) adalah campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*) (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Massa padat terbentuk setelah campuran beton mengeras seiring bertambahnya umur beton akibat reaksi kimia semen dengan air. Campuran bahan-bahan pembentuk beton harus ditetapkan sedemikian rupa, sehingga menghasilkan beton basah yang mudah dikerjakan, memenuhi kekuatan tekan rencana setelah mengeras dan cukup ekonomis (Untu and Windah, 2015).

2.2 Portland Composite Cement (PCC)

Semen *portland* komposit (PCC) merupakan material konstruksi yang masuk dalam daftar produk hijau dari *Green Listing* Indonesia. PCC merupakan semen hidrolis yang diproduksi dari campuran klinker semen *portland*, gips dan bahan mineral yang mempunyai sifat pozzolan. Dalam proses produksinya, penggunaan bahan bakar dapat berkurang hingga 20% dengan menggunakan material komposit seperti *slag* dan *fly ash* sebagai pengganti sebagian klinker (Yanita, 2020). Hal ini juga dapat mengurangi

potensi gas CO₂. PCC merupakan semen hidrolis yang dirancang untuk memiliki durabilitas yang tinggi, tahan terhadap sulfat dan panas hidrasi rendah.

2.3 Susut Beton

Penyusutan beton adalah perubahan volume yang terjadi selama dua tahap penuaan beton secara berurutan, yaitu tahap awal pengikatan dan pengerasan jangka panjang (Holt, 2005). Penyusutan meliputi penyusutan plastis, penyusutan kimiawi (termasuk penyusutan *autogenous*), dan penyusutan akibat pengeringan. Penyusutan plastis terjadi segera setelah beton segar dibuat yang merupakan tahap yang sangat awal ketika beton masih segar dan struktur padat yang akan menahan diri sendiri “*hold the body in place*” belum terbentuk.

Besarnya susut plastis tergantung pada penguapan air dari beton segar atau penyerapannya ke dalam badan beton kering atau tanah di bawahnya serta perdarahan campuran segar atau *fresh mixture bleeding*. Penyusutan kimiawi terjadi akibat reaksi semen dengan air. Penyusutan *autogenous* disebut juga penyusutan *self desiccation* karena terjadi selama ada air dalam struktur pori. Metode untuk menghitung deformasi beton terdapat pada (ACI 209R-92, 1997).

2.4 Vibrating Wire Embedment Strain Gauge (VWESG)

Pengukur regangan kawat getar tipe tertanam (*embedment*) digunakan untuk mengukur regangan internal dalam struktur beton dengan cara ditanam pada struktur menggunakan satu konfigurasi multi-sumbu. VWESG mampu mendeteksi regangan hingga 3000 µε (mikro regangan) dengan akurasi sekitar 5% dan suhu beton antara -80°C dan 60°C dengan akurasi sekitar 5% (Niken et al., 2017).

III. METODE PENELITIAN

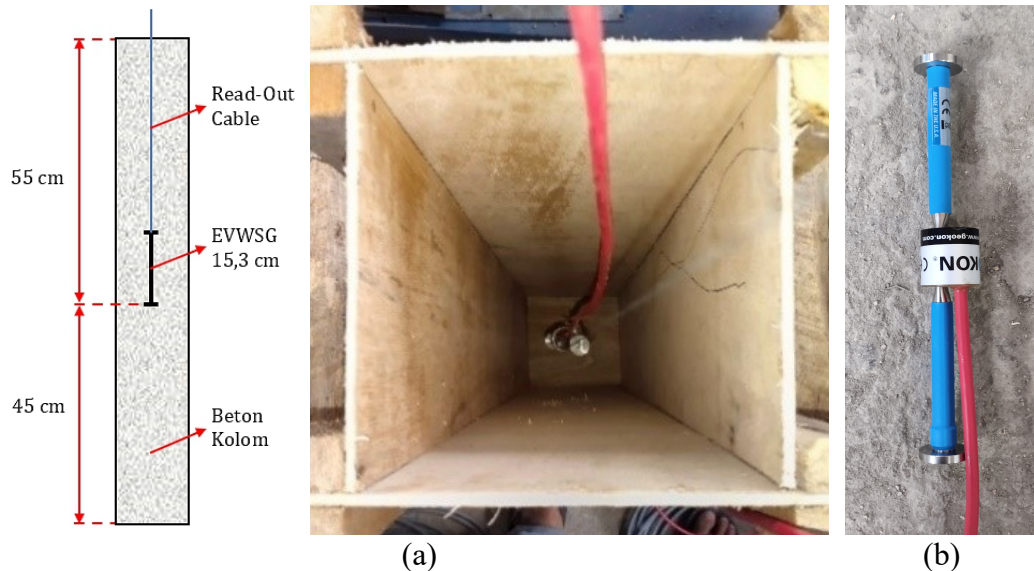
Penelitian ini dilakukan secara eksperimental untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan yaitu suhu dalam benda uji serta deformasi beton. Pengujian material mengikuti prosedur pada ASTM (*American Society for Testing and Material*) dan SNI (Standar Nasional Indonesia). Campuran beton normal direncanakan dengan metode (SNI 03 - 2843, 2000), dengan mutu rencana K-250 atau setara dengan $f'_c = 20,75$ MPa. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Alat *embadded vibrating wire strain gauge* (EVWSG) yang digunakan pada penelitian ini bermerek GEOKON yang sudah dikalibrasi. EVWSG digunakan untuk mendeteksi deformasi dan suhu di dalam beton.

3.1 Benda Uji

Benda uji yang digunakan berupa beton kolom (BK) dengan dimensi 150 mm × 150 mm × 1000 mm sebanyak 3 buah. Tabel 1 menunjukkan kode dan jumlah benda uji serta jenis pengujian yang dilakukan. Alat dan skema pemasangan EVWSG pada benda uji beton kolom dapat dilihat pada Gambar 2 dan benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Kode dan Jumlah Benda Uji

Pengujian	Kode			Umur Benda Uji (jam)
Deformasi	BK-1	BK-2	BK-3	0 - 24
Total	3 Benda Uji			



Gambar 2. (a) Skema benda uji dengan EVWSG; dan (b) Alat *embadded vibrating wire strain gauge* (EVWSG).

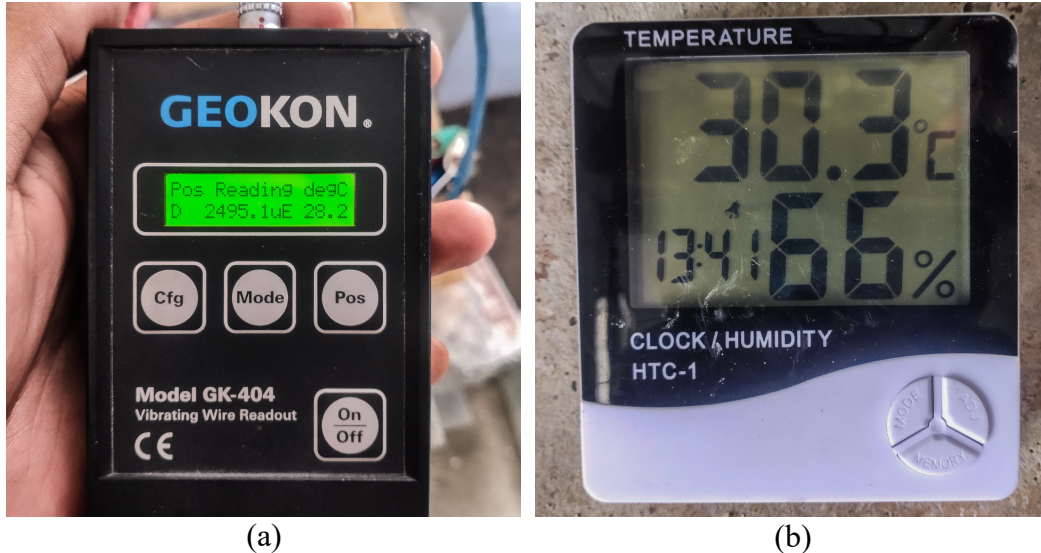


Gambar 3. Benda uji beton kolom (BK).

3.2 Pengamatan Deformasi

Pengamatan berupa pembacaan pada alat *read-out* dilakukan setiap 15 menit selama 24 jam pertama setelah pengecoran. Dari hasil pembacaan alat *read-out* diperoleh besarnya regangan yang terjadi di dalam beton dan suhu dalamnya

dengan satuan °C. Suhu udara dan lingkungan sekitar dideteksi menggunakan Termometer hygrometer. Gambar 4 menunjukkan alat *read-out* dan termometer hygrometer.



Gambar 4. Pembacaan data (a) Regangan dan suhu dalam BK; (b) Kelembapan relatif (RH) dan suhu udara sekitar.

3.2 Analisa Deformasi Beton

Setelah diperoleh data regangan dan suhu dalam beton pada tiap benda uji, maka dilakukan pengolahan data sesuai dengan panduan penggunaan alat (EVWSG) dengan memperhitungkan perubahan regangan dan suhu dalam beton.

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

Dengan $\mu\varepsilon_{\text{true}}$ adalah regangan susut yang terjadi, B adalah koefisien kalibrasi EVWSG = 0,96, C_1 adalah koefisien ekspansi EVWSG = 12,2, C_2 adalah koefisien ekspansi beton = 10,4, R_i adalah regangan pada data ke-i, R_{i-1} adalah regangan pada data ke-i-1, T_i adalah suhu pada data ke-i dan T_{i+1} adalah suhu pada data ke-i-1.

3.3 Analisa Data Hasil Penelitian

Analisa data dilakukan menggunakan kriteria *dyxon* berdasarkan (American Standard Test of Materials, 2015). Uji *dyxon* dilakukan dengan menyusun data dari yang terendah (X_1) ke tertinggi (X_n). Persamaan kriteria *dyxon* untuk 3-7 sampel dengan $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$ dihitung dengan rumus:

$$\text{Data terendah : } \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} > D_n \quad (2)$$

$$\text{Data tertinggi : } \frac{x_n - x_{(n-1)}}{x_n - x_1} > D_n \quad (3)$$

Jika $D_{hitung} > D_{tabel}$, maka data tersebut merupakan pencilan dan harus dibuang. Hal tersebut dilakukan terhadap seluruh data hingga tidak ada pencilan data. Pemeriksaan penerimaan data hasil perhitungan dan nilai dari ASTM E178-02 nilai terbesar dan terkecil dengan membandingkan nilai pada taraf signifikan 5% yaitu 0,97.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Material

Data hasil pengujian material dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Hasil Pengujian Material

Jenis Pengujian	Material Dipakai	Nilai Pengujian	Standar ASTM C
Kadar Air	Agregat Halus	0,88 %	0 – 1 %
	Agregat Kasar	2,35 %	0 – 3 %
Berat Jenis	Agregat Halus	2,50 %	2,0 – 2,9
	Agregat Kasar	2,66 %	2,5 – 2,9
	Semen PCC	3,05 %	3,0 – 3,2
Penyerapan	Agregat Halus	1,03 %	1 – 3 %
	Agregat Kasar	2,22 %	1 – 3 %
Modulus Kehalusan	Agregat Halus	2,73	2,3 – 3,1
	Agregat Kasar	7,37	6 – 8
Berat Volume	Agregat Halus	1535 kg/m ³	-
	Agregat Kasar	1537,90 kg/m ³	-
Kadar Lumpur	Agregat Halus	2,67 %	< 5 %
Kandungan Zat Organik	Agregat Halus	Warna no. 2	< Warna no. 3
Waktu Pengikatan Awal Semen	Semen PCC	115,91 Menit	> 60 Menit
Kehalusan Semen	Semen PCC	Saringan no. 100 = 0 %	0 %
		Saringan no. 200 = 19,68 %	< 22 %

Dengan demikian, kualitas material memenuhi ASTM dan dapat digunakan sebagai campuran beton normal.

4.2 Hasil Perhitungan *Mix Design*

Kebutuhan material campuran beton dihitung menggunakan acuan SNI 03-2834-2000. *Slump* rencana yang digunakan sebesar 60–180 cm. Tabel 4 menunjukkan komposisi kebutuhan material campuran beton per m³ untuk mutu K-250 ($f'c = 20,75$ Mpa).

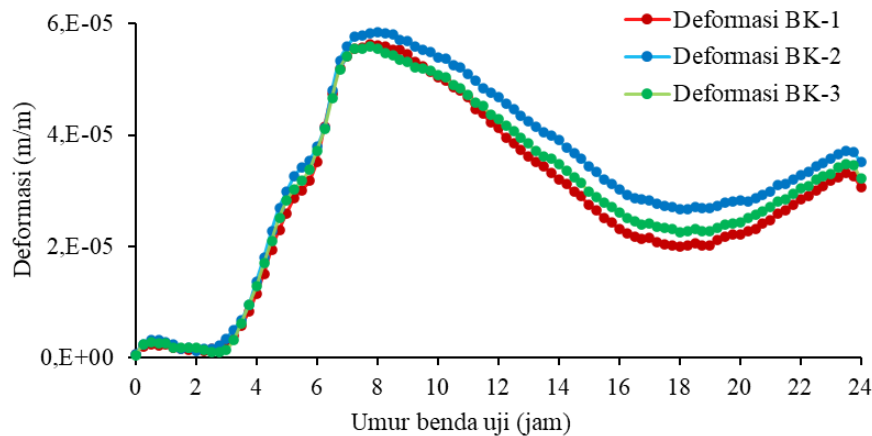
Tabel 4. Komposisi Kebutuhan Material Campuran Beton per m³

No	Material	Jumlah (kg)
1	Agregat Halus	741,63
2	Agregat Kasar	1013,75
3	Semen	379,63
4	Air	205
5	Total	2340,01

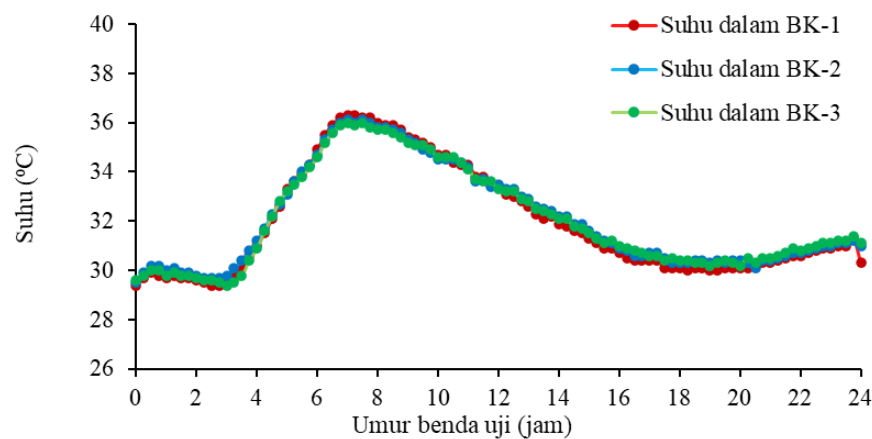
Dengan demikian diperoleh nilai faktor air semen (FAS) = 0,54, yang merupakan perbandingan w dan c, dengan w adalah air = 205 kg/m³ dan c adalah semen = 379,63 kg/m³.

4.3 Hasil Penelitian

Deformasi pada ketiga benda uji memiliki pola yang mirip dengan perubahan suhu dalam beton kolom (BK). Fenomena deformasi yang terjadi berupa ekspansi dan penyusutan. Perilaku deformasi dan suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.

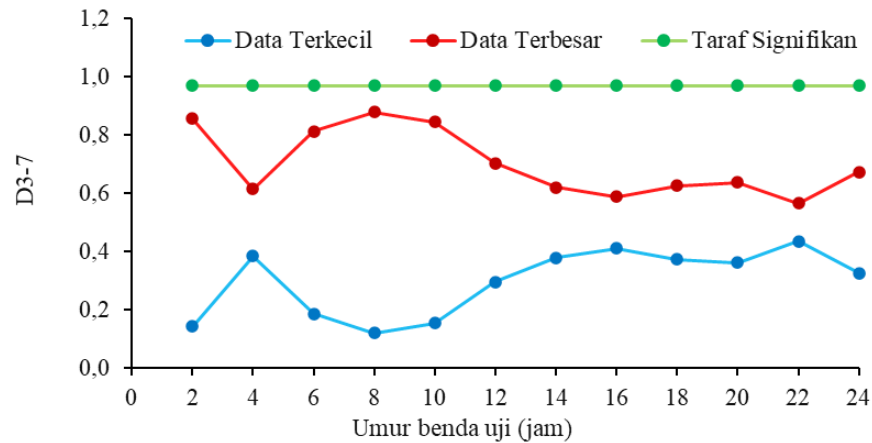


Gambar 5. Deformasi beton kolom umur 0-24 jam.

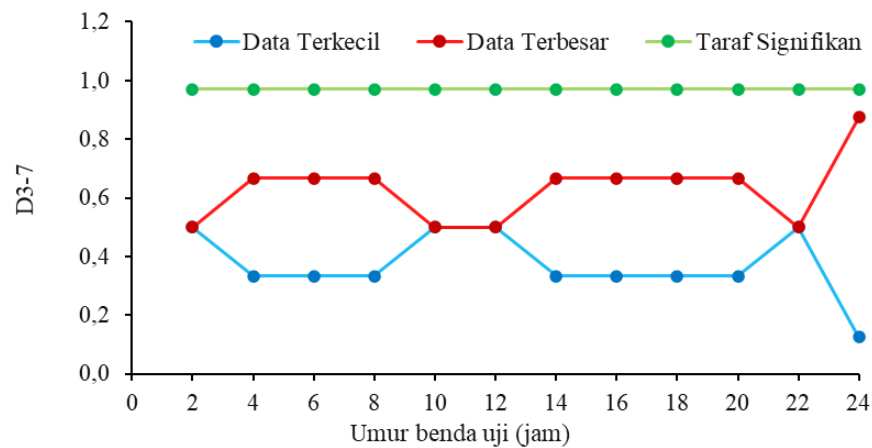


Gambar 6. Suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam.

Dari hasil pembacaan data, selanjutnya data tersebut dianalisa sesuai dengan ASTM E178-02. Hasil pengolahan data menggunakan kriteria *dyxon* menunjukkan nilai data terbesar dan data terkecil dibawah taraf signifikan 5% sehingga data dapat diterima, (Gambar 7 dan 8).

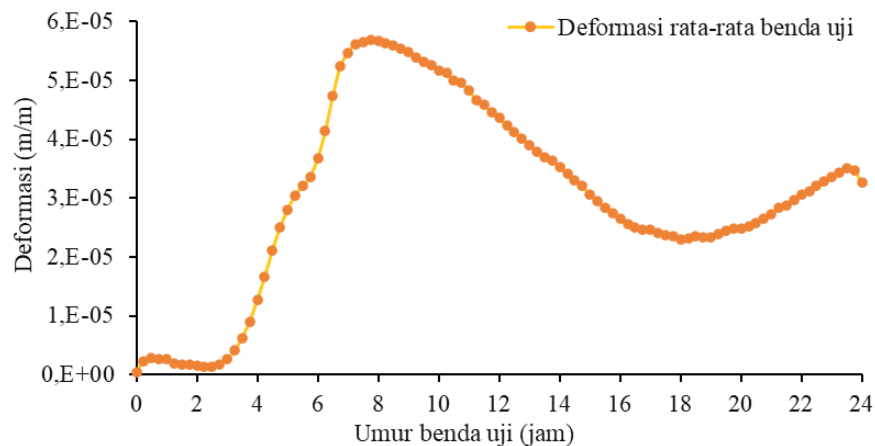


Gambar 7. Outlying deformasi kolom beton umur 0-24 jam.

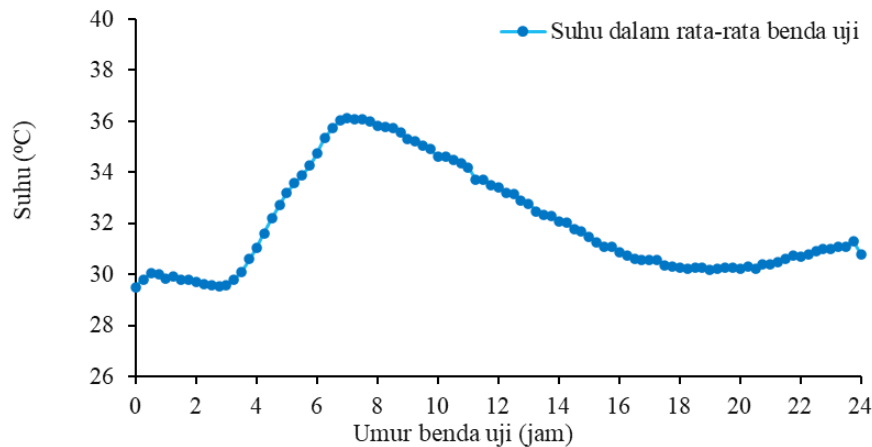


Gambar 8. Outlying suhu dalam kolom beton umur 0-24 jam.

Deformasi rata-rata beton kolom dan perubahan suhu dalam rata-rata dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Deformasi rata-rata kolom beton umur 0-24 jam.



Gambar 10. Suhu dalam rata-rata kolom beton umur 0-24 jam.

Suhu dalam beton mempengaruhi besar deformasi pada beton kolom umur 0-24 jam. Deformasi minimum dan maksimum pada beton kolom umur 0-24 jam secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7,75 jam sebesar $5,4000\text{E-}07$ (m/m) dan $5,6808\text{E-}05$ (m/m) dengan rata-rata $3,0341\text{E-}05$ (m/m). Perubahan suhu maksimum dalam kolom beton secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7-7,50 jam sebesar $29,5$ °C dan $36,1$ °C dengan rata-rata 32 °C.

Proses kimia akan berlangsung ketika air dicampur dengan semen yang disebut reaksi hidrasi semen, bahan kimia dalam semen bereaksi dengan air dan membentuk senyawa baru. Dengan adanya air, silikat (C_3S dan C_2S) dan aluminat (C_3A dan C_4AF) membentuk produk hidrasi yang pada akhirnya menghasilkan massa keras atau pasta semen terhidrasi (Marchon and Flatt, 2016). Penyusutan terjadi pada ketiga beton kolom umur 0-30 menit, hal ini disebabkan oleh reaksi hidrasi semen segera setelah pengecoran. Ketika semen dicampur dengan air, ion kalsium dan ion hidroksida dilepaskan dari permukaan C_3S sehingga menjadi larutan basa karena PH meningkat. C_3S dan C_2S menghasilkan produk hidrasi berupa kalsium silikat hidrat ($\text{C}_3\text{S}_3\text{H}_3$) dan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Kalsium silikat hidrat adalah produk hidrasi terpenting semen *portland* (Aitcin, 2016). Ketika kalsium dan hidroksida mencapai konsentrasi kritis, kristalisasi CH dan CSH mulai terbentuk.

Umur 0,5-3 jam beton kolom mengembang bersamaan dengan penurunan suhu dalam beton, disebut masa dorman. Pada umumnya masa dorman terjadi pada umur 2-4 jam setelah pengecoran dan menyebabkan semen tetap plastis. Reaksi hidrasi semen melambat dan CH mengkristal dari larutan, CSH berkembang pada permukaan C_3S dan membentuk lapisan pelindung. Dengan bertambahnya ketebalan lapisan pelindung tersebut, waktu yang dibutuhkan air untuk menembus lapisan semakin meningkat, sehingga laju reaksi difusi menurun, menyebabkan berakhirnya fase dorman. C_2S terhidrasi dengan kecepatan yang lebih lambat karena merupakan senyawa yang kurang reaktif. Selama masa dorman, CSH masih terbentuk hingga mencapai nilai kritis tertentu yang menandakan awal dimulainya masa akselerasi (Marchon and Flatt, 2016).

Periode percepatan terjadi pada umur 3-7 jam, dimana semen terhidrasi dengan cepat. Laju hidrasi maksimum terjadi pada tahap ini, di mana puncak utama pelepasan panas

terjadi sesuai dengan presipitasi CSH dan CH yang bertanggung jawab dalam *setting* dan dimulainya pengerasan awal. Puncak terjadinya pelepasan panas disebabkan oleh peningkatan pelarutan C_3S .

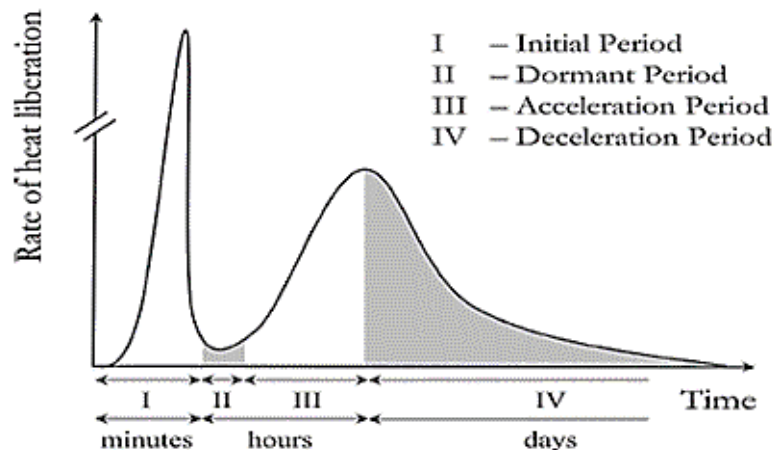
Beton kolom umur 8-20 jam mengembang. Fenomena ini disebut deselerasi, yaitu laju reaksi yang melambat yang sepenuhnya bergantung pada difusi. Proses hidrasi menghasilkan panas, sehingga terjadi kenaikan suhu yang mempengaruhi laju pengerasan dan penyusutan beton. Tri Calcium Aluminate (C_3A), bereaksi sangat cepat dengan air yang berdampak pada pengikatan awal semen. Kehadiran C_3A memberikan kontribusi yang kecil terhadap kekuatan semen kecuali pada usia dini, namun memfasilitasi kombinasi kapur dengan silika. Gypsum bereaksi dengan C_4AF membentuk Kalsium sulfoaluminat dan kalsium sulfoferit. C_4AF mempercepat hidrasi silikat.

Hidrasi C_3A menghasilkan trikalsium aluminat hidrat membentuk kristal kubik yang dikelilingi oleh kalsium silikat hidrat. Reaksi C_3A dengan air disertai dengan pelepasan panas dalam jumlah besar. Pada semen *portland*, reaksi ini langsung menyebabkan pengerasan yang dikenal sebagai *flash setting* (Aïtcin, 2016). Kalsium sulfat dalam bentuk Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) yang ditambahkan ke klinker melalui proses penggilingan menyebabkan tertundanya reaksi C_3A dengan air, sehingga memberikan waktu yang cukup bagi hidrasi C_3S hingga terjadinya *natural setting*. Sebagian dari gipsium ini dapat diubah menjadi hemihidrat ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) karena peningkatan suhu (John and Lothenbach, 2023). Hemihidrat larut lebih cepat dalam air daripada gipsium dan melepaskan ion monosulfat yang bereaksi cepat dengan C_3A untuk membentuk *ettringite* yang terserap pada C_3A . Reaksi gipsium dengan C_3A berlanjut hingga salah satunya habis, sedangkan C_3S terus terhidrasi. Jika C_3A habis sebelum gipsium, kelebihan gipsium mengembang dan menyebabkan kerusakan pasta semen, namun jika gipsium habis sebelum C_3A , sisa C_3A mulai terhidrasi (Aïtcin, 2016).

Produk hidrasi silikat adalah *gel* kalsium silikat hidrat (*gel* CSH) dan fase kristal kalsium hidroksida, atau *portlandite* (CH). Reaksi hidrasi antara aluminat dan kalsium sulfat mengarah pada pembentukan dua kelompok fase yang berbeda. Salah satu fase disebut hidrat trisulfoaluminoforit (AFt). Fase yang paling penting adalah *ettringite*, dan hidrat monosulfoaluminoforit (AFm), yang terdiri dari trombosit kalsium bermuatan positif dan aluminium pada koordinasi oktahedral dengan oksigen (Marchon and Flatt, 2016). Fase AFm berbeda satu sama lain dengan ion tandingan yang disisipkan di antara trombosit. Pada fase ini sulfat disebut monosulfoaluminat, hidroksida (hidrokalsium), karbonat (monokarboaluminat), karbonat dan hidroksil (hemokarboaluminat), dan klorida (garam Friedel) (Marchon and Flatt, 2016).

Pelepasan panas yang tinggi pada umur 0-15 menit setelah pengecoran menunjukkan pelarutan fase anhidrat dan pengendapan *ettringite* yang cepat. Reaksi ini berlangsung cukup singkat dan langsung diikuti oleh pengembangan beton kolom. Hal ini disebabkan oleh pembentukan membran pelindung fase *ettringite* atau Afm. Sedangkan untuk *alite*, puncak eksotermik pertama terjadi pada saat yang sama yaitu segera setelah pengecoran dilakukan. Hal ini disebabkan oleh pembasahan permukaan semen dan pelarutan cepat fase anhidrat. Selain itu, pada menit-menit pertama, *ettringite* mengendap karena tingginya reaktivitas aluminat dan ketersediaan kalsium sulfat. Puncak tajam yang terjadi diikuti dengan perlambatan reaksi secara tiba-tiba dan periode induksi.

Puncak utama kedua terjadi pada umur 7-7,5 jam. Fenomena ini berhubungan dengan pengendapan produk utama hidrasi silikat (fase akselerasi), dengan peningkatan pelepasan panas terutama disebabkan oleh peningkatan pelarutan C_3S secara simultan, namun reaksi ini kemudian melambat. Puncak pertama pada tahap I disebabkan oleh pelarutan alit yang sangat eksotermik. Tahap ini berlangsung beberapa menit dan diikuti dengan perlambatan awal pada tahap I dan periode laju reaksi rendah pada tahap II, yang dikenal sebagai fase induksi atau periode dorman (Marchon and Flatt, 2016). Ilustrasi periode hidrasi berdasarkan laju pengembangan panas dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Ilustrasi skematis periode hidrasi berdasarkan laju pengembangan panas (John and Lothenbach, 2023).

Perlambatan kedua terjadi pada umur 8-19 jam disebut fase deselerasi. Selama perlambatan ini, terjadi puncak kedua yang mewakili titik penipisan sulfat dan berhubungan dengan pengendapan *ettringite* yang lebih cepat dan disolusi C_3A yang lebih tinggi. Tahap terakhir adalah periode aktivitas rendah yaitu laju reaksi yang konstan (20-24 jam). Suhu mempunyai pengaruh yang kecil terhadap hidrasi pada tahap ini dan terjadi penyusutan pada beton kolom.

Fenomena deformasi kembang susut yang berbanding lurus dengan perubahan suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam disebabkan oleh hidrasi semen dengan air. Proses hidrasi menghasilkan produk hidrasi dan panas yang berdampak pada perubahan volume beton kolom. Perubahan volume ini dapat berakibat pada tingkat risiko terjadinya retakan yang mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton. Penyusutan pada hari pertama setelah pencetakan beton dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap penyusutan akhir dan meningkatkan risiko terjadinya retakan (Niken, 2019).

V. KESIMPULAN

Semua bentuk penyusutan pada beton umur 0-24 jam pada dasarnya, berasal dari proses hidrasi yang bersifat eksotermik yang secara langsung mempengaruhi suhu dalam beton. Dalam reaksi kimiawi, terjadi perubahan dari material penyusun beton menjadi produk hidrasi sehingga menyebabkan berkurangnya volume selama reaksi berlangsung. Pola perilaku susut 24 jam pertama sama dengan pola panas hidrasinya.

Proses hidrasi menghasilkan produk hidrasi dan panas yang berdampak pada perubahan volume beton kolom. Perubahan volume ini dapat berakibat pada tingkat risiko terjadinya retakan yang mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton.

Deformasi minimum dan maksimum pada beton kolom umur 0-24 jam secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7,75 jam dengan besaran $5,4000\text{E-}07$ (m/m) dan $5,6808\text{E-}05$ (m/m) dengan rata-rata $3,0341\text{E-}05$ (m/m). Perubahan suhu maksimum dalam kolom beton secara berurutan terjadi pada umur 0 jam dan 7-7,50 jam sebesar $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $36,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan rata-rata $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fenomena deformasi kembang susut berbanding lurus dengan perubahan suhu dalam beton kolom umur 0-24 jam. Ketika suhu dalam beton meningkat, beton mengalami ekspansi, sedangkan ketika suhu dalam beton menurun, beton mengalami penyusutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aïtcin, P. C., 2016. Phenomenology of cement hydration. *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 15–25). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00002-3>
- American Concrete Institute. ACI 305., 2007. Specification for Hot Weather Concreting. *ACI Committee 305*. www.concrete.org
- American Concrete Institute. ACI 209R-92., 1997. Prediction of Creep , Shrinkage , and Temperature Effects in Concrete Structures. 47 P.
- American Standard Test of Materials., 2015. Dealing With Outlying Observations. *Astm*, 1–18. <https://doi.org/10.1520/E0178-08>. Copyright
- Azenha, M., Faria, R., and Ferreira, D., 2009. Identification of early-age concrete temperatures and strains: Monitoring and numerical simulation. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.03.004>
- Badan Standardisasi Nasional., 2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *SNI 2847-2019*, 8, 720.
- Darquennes, A., Khokhar, M. I. A., Rozière, E., Loukili, A., Grondin, F., and Staquet, S., 2011. Early age deformations of concrete with high content of mineral additions. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1836–1847. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.077>
- Gilbert, R. I., 2017. Cracking Caused by Early-age Deformation of Concrete-Prediction and Control. *Procedia Engineering*, 172, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.012>
- Holt, E., 2005. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.009>
- John, E., and Lothenbach, B., 2023. Cement hydration mechanisms through time – a review. *Journal of Materials Science* (Vol. 58, Issue 24, pp. 9805–9833). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08651-9>

- Kucharczyková, B., Daněk, P., Kocáb, D., and Misák, P., 2017. Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete. *Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3027301>
- Marchon, D., and Flatt, R. J., 2016. Mechanisms of cement hydration. *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 129–145). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>
- Niken, C., 2019. Early–Age Shrinkage of High-Performance Concrete Beam in Laboratory and Full-Scale. *Civil and Environmental Research*. <https://doi.org/10.7176/cer/11-4-05>
- Niken, C., Tjahjono, E., and Supartono, F., 2017. Long term deformation of beams and columns of high performance concrete. *International Journal of Technology*, 8(5), 811–819. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i5.863>
- Rochaeti, Endawati, J., Widuri, L. D. D., dan Moeljono., 2014. Pengaruh Panas Hidrasi Beton Dengan Semen Type II Terhadap Ketebalan Elemen Beton. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 16(2), 183–194. <https://doi.org/10.15294/jtsp.v16i2.7231>
- SNI 03 – 2843., 2000. Standar Nasional Indonesia Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. BSN.
- Tabatabai, H., and Oesterle, R. G., 2017. Short-term environment-dependent creep and shrinkage of mature concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69(24), 1243–1255. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00052>
- Untu, G. E., dan Windah, E. J. K. R. S., 2015. Variasi Kuat Tekan Beton. *Jurnal Sipil Statistik*, 3(10), 703–708.
- Wang, Y., Zhu, J., Guo, Y., and Wang, C., 2023. Early shrinkage experiment of concrete and the development law of its temperature and humidity field in natural environment. *Journal of Building Engineering*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105528>
- Yanita, R., 2020. Semen PCC Sebagai Material GREEN CONSTRUCTION dan Kinerja Beton yang Dihasilkan. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 19(1), 13–18. <https://doi.org/10.31258/jst.v19.n1.p13-18>
- Zhao, H., Jiang, K., Yang, R., Tang, Y., and Liu, J., 2020. Experimental and theoretical analysis on coupled effect of hydration, temperature and humidity in early-age cement-based materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118784>