

Studi numerik pengaruh suhu penempatan beton massa terhadap perkembangan gradien regangan sebagai penyelidikan awal pencegahan retak beton usia muda

Faizal Hanif¹, Ali Awaludin^{1*}, Angga Fajar Setiawan¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Early-age concrete
Finite element
Mass concrete
Strain gradient
Thermal expansion

Corresponding Author:

Ali Awaludin
ali.awaludin@ugm.ac.id

Abstract

Preexisting cracking was observed on a pier cap structure a week after concrete casting. External damage caused by existing cracks before being burdened by service load may compromise further structural performance. Several factors caused early-age concrete cracking involving elastic modulus maturity and hydration heat generation. Modifying concrete placing temperature is a common method to reduce accumulative hydration heat, especially in mass concrete structural design. Early-age concrete parameters such as elastic modulus maturity, temperature rise, and coefficient of thermal expansion were implemented in finite element models along with various temperature rise patterns following ACI 207.2R-07 specification. Utilizing the finite element analysis method could simulate strain gradient patterns caused by thermal expansion stress, which is influenced by temperature rise. This study demonstrated early study to reduce cracking risk by observing the influence of concrete placing temperature variations assessed by the strain gradient pattern and peak nominal strain. Finite element analysis results indicated a proportional relationship between the temperature of concrete placing and peak nominal strain with a similar potential for cracking risk zonation. Although the method of reducing concrete placement temperature was commonly practiced, this study showed that the method was considered ineffective in reducing early-age concrete cracking risk on mass concrete pier cap P87 structure.

Copyright © 2024 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Keretakan beton usia dini telah diamati pada sepanjang struktur *pier cap* P87 di Proyek Jalan Tol Jogja-Bawen. Lebar keretakan berkisar antara 0,20 mm hingga 0,35 mm yang dapat dikategorikan sebagai retak kritis menurut beberapa standar (Basteskär dkk., 2019). Retakan yang lebar dan meluas pada struktur utama memungkinkan terjadinya penetrasi air dan udara yang dapat menyebabkan kerusakan internal seperti korosi besi tulangan dan mengurangi daya rekat antara beton dengan baja tulangan

(Chang dkk., 2019). Kerusakan internal akibat retakan tersebut berpotensi mengurangi ketahanan dan masa layan struktur akibat berkurangnya kekakuan struktur secara keseluruhan (Purani, 2013). Beberapa metode pencegahan praktis diperlukan sebelum struktur dibebani oleh beban utama untuk menanggulangi retak yang tidak sesuai tingkat keberterimaan. Beberapa penyelidikan mengenai penyebab retak beton usia dini dikaitkan dengan peningkatan suhu hidrasi, usia modulus elastisitas, dan lain-lain (Liu dkk., 2018).

Penelitian mengenai keretakan serupa telah diteliti pada struktur *box culvert* oleh Liu dkk. (2018). Penyelidikan menggunakan pemodelan elemen hingga membuktikan bahwa keretakan tersebut erat kaitannya dengan muai termal akibat panas hidrasi yang ditunjukkan oleh hasil analisis berupa konsentrasi gradien regangan yang cocok dengan zona area retak. Penelitian lain oleh Chang dkk. (2019) pada struktur beton massa bentang girder prategang menunjukkan pengaruh sifat beton muda terhadap distribusi keretakan. Pemodelan menggunakan elemen hingga menunjukkan kecocokan distribusi retak yang ditunjukkan oleh angka faktor kerusakan regangan. Beberapa penelitian tersebut menunjukkan kaitan erat antara sifat beton massa usia dini dan panas hidrasi dengan potensi keretakan yang dapat ditimbulkan. Penelitian yang ada masih terbatas pada penyelidikan penyebab retak sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai cara pencegahan yang lebih konkret.

Desain beton bertulang dengan karakteristik beton massa sangat rentan terhadap keretakan yang disebabkan oleh peningkatan panas hidrasi pada inti beton massa dan proses pelepasannya ke permukaan beton (Saeed dkk., 2023). Struktur P87 dikategorikan sebagai beton massa karena memiliki dimensi yang lebih besar di atas 1,0 m (Bofang, 2014). Dengan kekuatan tarik beton yang sangat kecil dan ketidakmampuan menahan tegangan tarik yang signifikan akibat tegangan termal, maka volume massa beton mentah yang terkekang di dalam bekisting dengan dimensi lebih besar dari 2,4 m memerlukan perhatian khusus dalam pelaksanaannya (ACI Committee 207, 1998). Secara garis besar, terdapat 3 jenis metode untuk mengatasi panas hidrasi beton massa. Kesatu, metode prapendingin dengan mengurangi suhu awal sebelum penempatan beton (ACI Committee 207, 2007). Kedua, metode pascapendingin dengan menyirkulasikan air dingin melalui pipa pendingin tertanam (ACI Committee 207,

1998). Ketiga, modifikasi desain dengan penambahan tulangan suhu dan susut berdasarkan spesifikasi dari American Association of State Highway and Transportation Officials (2014) dan ACI Committee 318 (2007).

Modifikasi suhu penempatan awal beton merupakan metode yang mudah, murah dan cepat. Penerapan paling umum adalah dengan penambahan balok es pada adukan beton mentah, sehingga sangat cocok diterapkan pada struktur dengan tingkat rasio air-semen yang tidak ketat. Alternatif metode lain seperti metode kedua dan ketiga diperlukan, khususnya pada beton performa tinggi yang mensyaratkan rasio air-semen yang sangat ketat dan harus kurang dari 0,40 (Wu dkk., 2017). Metode analisis elemen hingga memungkinkan penyelidikan pengaruh suhu awal penempatan beton terhadap perkiraan regangan yang terjadi sehingga suhu optimum dapat diperkirakan.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki gradien regangan beton massa dengan variasi pola kenaikan suhu pada jangka waktu pengamatan tertentu dengan metode analisis elemen hingga. Penelitian ini akan membandingkan pola gradien retak dan regangan nominal puncak sebagai justifikasi potensi terjadinya keretakan beton beserta perkiraan zona berisiko. Kelayakan metode modifikasi suhu awal penempatan beton akan disajikan sebagai salah satu studi awal untuk menentukan alternatif solusi dalam mengatasi masalah keretakan yang sama.

Landasan Teori

Perkiraan perilaku regangan pada beton usia dini melibatkan beberapa parameter yang mempengaruhi perilaku beton muda secara ideal untuk mengembangkan model numerik yang tepat. Periode beton mulai mengalami proses pengerasan antara 100 hingga 150 menit setelah pengecoran untuk kondisi lapangan (Pinto & Hover, 1999; Schindler dkk., 2002). Setelah memulai proses pengerasan, efek maksimum panas hidrasi yang diikuti oleh sifat beton muda akan terjadi hingga 72 jam (Zhu dkk., 2020).

Periode jendela antara waktu mulai beton mengeras hingga efek hidrasi panas maksimum yang diamati ditentukan pada rentang 2 hingga 72 jam berdasarkan referensi-referensi tersebut.

Modulus elastisitas beton muda

Perkembangan modulus elastisitas beton secara progresif diperkirakan berdasarkan rumus yang diadopsi dari ACI 209R-92 dan ACI 318M-08. Kuat tekan terhadap usia beton dirumuskan sesuai dengan Pers. (1) (ACI Committee 209, 1997), sehingga modulus elastisitas terhadap usia beton dapat ditentukan berdasarkan Pers. (2) (ACI Committee 318, 2007).

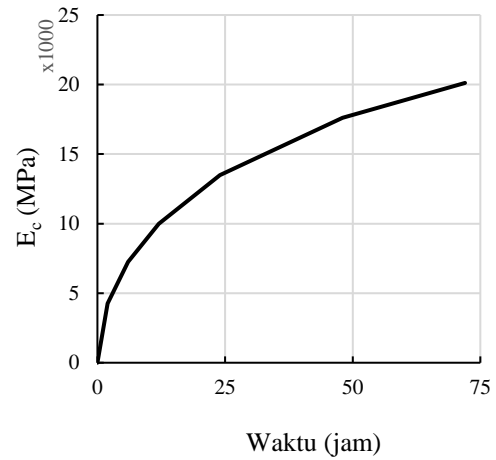
$$f'_c(t) = \frac{t}{a + \beta t} f'_{c28} \tag{1}$$

$$E_c(t) = 4700 \sqrt{f'_c(t)} \tag{2}$$

Dengan $f'_c(t)$ adalah kuat tekan terhadap waktu (MPa); t adalah usia beton (hari); $a=4.0$ dan $\beta=0.85$ berturut-turut adalah konstanta faktor curing dan tipe semen; $f'_{c28} = 40$ MPa adalah target usia beton; $E_c(t)$ adalah modulus elastisitas terhadap waktu (MPa). Perhitungan berdasarkan persamaan-persamaan di atas menghasilkan modulus elastisitas prediktif yang disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Ringkasan perhitungan kuat tekan modulus elastisitas terhadap waktu

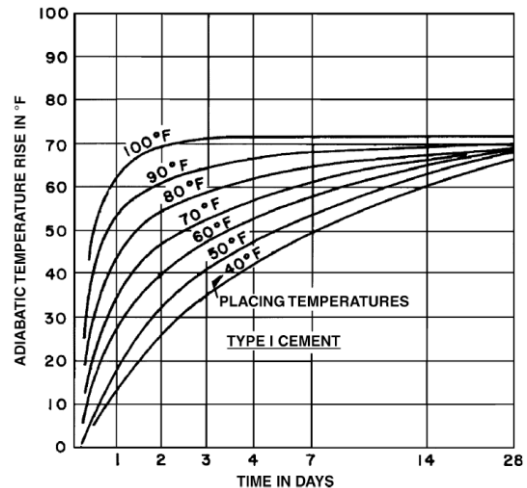
	Waktu		f'c(t) (MPa)	Ec(t) (MPa)
	(hari)	(jam)		
0	0.00	0	-	-
1	0.08	2	0.82	4253
2	0.25	6	2.37	9195
3	0.50	12	4.52	9992
4	1.00	24	8.25	13498
5	2.00	48	14.04	17608
6	3.00	72	18.32	20117



Gambar 1. Grafik perkembangan modulus elastisitas beton muda

Peningkatan suhu hidrasi

Spesifikasi ACI 207.2R-07 merupakan salah satu acuan yang dapat digunakan untuk menentukan pola kenaikan suhu panas hidrasi beton massa terhadap nilai suhu awal penempatan. Grafik acuan untuk efek terhadap peningkatan suhu hidrasi oleh setiap nilai suhu penempatan (T-1,2,3,4) pada beton semen Tipe I ditunjukkan oleh Gambar 2.



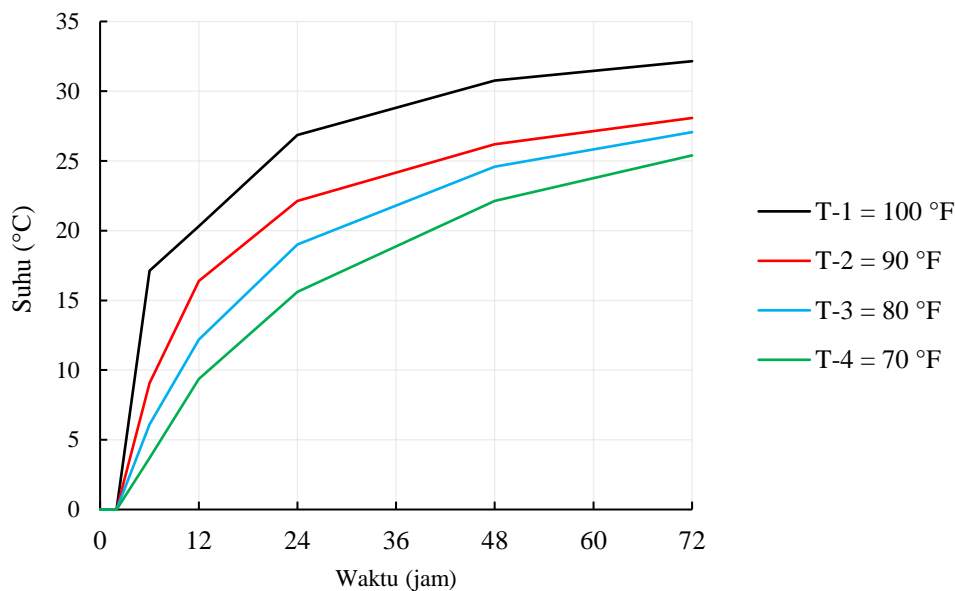
Gambar 2. Grafik hubungan suhu penempatan terhadap kenaikan suhu panas hidrasi (ACI Committee 207, 2007)

Kenaikan panas hidrasi total (ΔT) memiliki pengaruh penting dalam proses pengerasan beton saat sifat beton belum berkembang sepenuhnya. Perubahan suhu setiap waktu berdasarkan grafik tersebut merupakan perubahan konstan pada inti bagian beton massa (ΔT_x), sehingga pada penerapannya

kenaikan suhu perlu dikalikan setengahnya untuk menyimulasikan perbedaan suhu efektif antara bagian terluar dan terdalam beton (ΔT_y). Prediksi kenaikan suhu dapat didekati oleh grafik di atas yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Tabel 2. Hasil pendekatan terhadap kenaikan suhu secara kumulatif

Waktu (jam)	T-1=100°F=37.78°C $\Delta T-1=32.14^\circ\text{C}$		T-2=90°F=32.22°C $\Delta T-2=28.08^\circ\text{C}$		T-3=80°F=26.67°C $\Delta T-3=27.06^\circ\text{C}$		T-4=70°F=21.11°C $\Delta T-4=25.39^\circ\text{C}$	
	ΔT_{x1}	ΔT_{y1}	ΔT_{x2}	ΔT_{y2}	ΔT_{x3}	ΔT_{y3}	ΔT_{x4}	ΔT_{y4}
1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	6	17.13	8.56	9.07	4.53	6.09	3.05	3.70
3	12	20.32	10.16	16.40	8.20	12.19	6.09	9.36
4	24	26.85	13.43	22.13	11.06	19.01	9.50	15.60
5	48	30.77	15.39	26.19	13.10	24.60	12.30	22.13
6	72	32.15	16.07	28.08	14.04	27.06	13.53	25.39



Gambar 3. Grafik kenaikan suhu (ΔT_x) dalam variasi suhu penempatan beton

Tegangan akibat muai termal

Nilai stabil koefisien muai termal dapat diprediksi berdasarkan angka kelembapan relatif (Jeong dkk., 2012). Berdasarkan data perkiraan yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) pada hari pelaksanaan konstruksi, angka kelembapan relatif berkisar pada 70% hingga 80%. Sehingga berdasarkan penelitian oleh Jeong dkk. (2012), nilai koefisien muai termal dapat didekati dan ditentukan pada $13.90 \mu\text{strain}/^\circ\text{C}$. Koefisien

muai termal mempengaruhi besaran regangan secara proporsional berdasarkan persamaan umum hubungan antara regangan dengan perubahan suhu sesuai dan koefisien muai termalnya sesuai dengan Pers. (3) (Schindler dkk., 2002).

$$\varepsilon_T(t) = \Delta T \times CTE \tag{3}$$

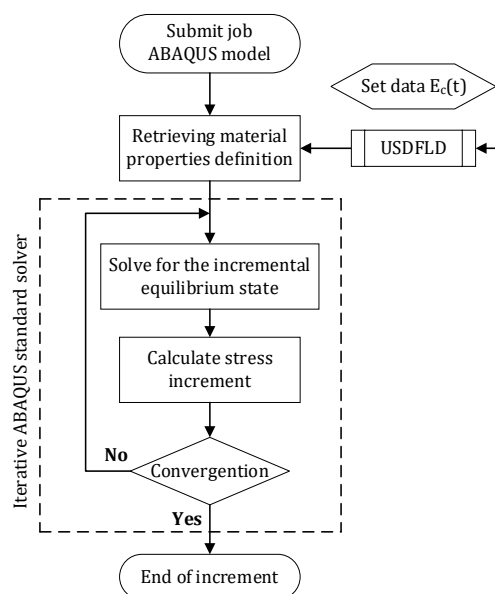
Dengan $\varepsilon_T(t)$ adalah regangan muai termal dalam strain tanpa satuan; ΔT adalah kenaikan temperatur dalam $^\circ\text{C}$; CTE adalah koefisien muai termal dalam $\text{strain}/^\circ\text{C}$.

Metode Penelitian

Analisis elemen hingga dilakukan menggunakan ABAQUS *standard solver* dengan kombinasi sub rutin Fortran. Sifat material didefinisikan dalam lingkup elastik untuk mengamati perilaku *non-damage* dengan batas regangan tertentu sebagai indikator potensi terjadinya keretakan.

ABAQUS dengan Fortran subrutin

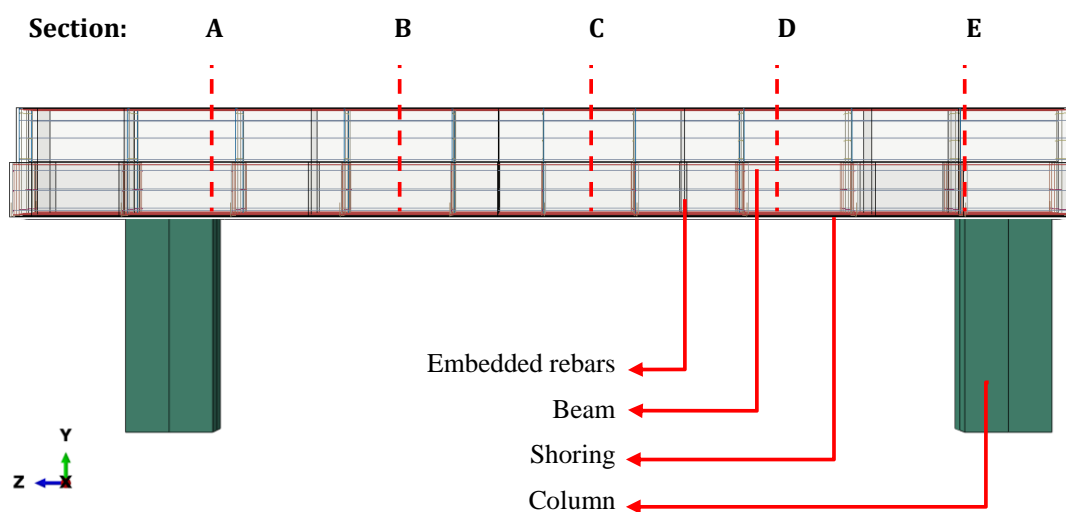
Sebagian besar program analisis elemen hingga tidak menyediakan antarmuka yang mudah untuk memasukkan parameter yang bersifat *time-dependent*. Sehingga sub rutin Fortran dikembangkan pada penelitian ini untuk memperluas kemampuan perangkat lunak ABAQUS. Fungsi sub rutin USDFLD digunakan untuk menerapkan fungsi definisi nilai modulus elastisitas yang berubah terhadap waktu. Nilai modulus elastisitas terhadap perubahan waktu didefinisikan pada saat pendefinisian sifat material dengan masukan *predefined fields*. Perhitungan regangan sesuai dengan Pers. (3) secara otomatis akan dihitung oleh ABAQUS *standard solver*. Garis besar bagan alir kombinasi kerja setiap *step* antara ABAQUS dengan sub rutin Fortran disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan alir metode penelitian

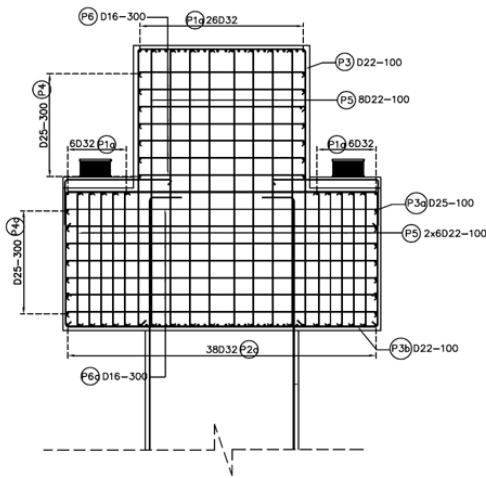
Model representatif

Gambar kerja proyek yang disederhanakan dalam model tiga dimensi (3D) dimodelkan dalam ABAQUS dengan dua jenis elemen beton dan tulangan, sesuai dengan Gambar 5. Bagian-bagian tersebut didiskritisasi menjadi C3D8R untuk beton dan T3D2 untuk rangka tulangan. Angka *meshing* ditetapkan pada 250 mm sesuai dengan hasil konvergensi yang telah dilakukan.



Gambar 5. Representasi model 3D di ABAQUS

Reaksi tumpuan berupa kekangan jepit pada ujung bawah kolom dan tumpuan reaksi terhadap sumbu Y untuk dukungan bekisting berupa bagian *shoring*. Tulangan *pier cap* dimodelkan secara lebih sederhana dengan rasio 1:10 dan tulangan kolom tidak dimodelkan untuk menghemat sumber daya komputasi. Pola penulangan disesuaikan terhadap gambar kerja yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tipikal penulangan P87 (sumber: gambar kerja proyek PT Adhi Karya)

Dimensi penampang melintang untuk setiap bagian dijelaskan pada Tabel 3. Rangkuman definisi parameter setiap jenis material disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Rangkuman dimensi penampang

	Dimensi
Pier Cap	<p>Panjang = 48700 mm</p>
Kolom	<p>Tinggi = 10000 mm</p>

Tabel 4. Rangkuman definisi parameter material

Material	Deskripsi
Beton	Modulus elastisitas (E) = 29832 Mpa untuk kolom, sesuai Tabel 1 untuk <i>pier cap</i> ; Koefisien muai termal (CTE) = 13.90 μ strain/ $^{\circ}$ C; Rasio Poisson = 0.2
Baja tulangan	Modulus elastisitas (E) = 200000 Mpa; kuat leleh (f_y) = 372 MPa

Variabel perubahan kenaikan suhu direpresentasikan oleh 4 jenis model yang dinyatakan pada Tabel 5. Input perubahan suhu pada ABAQUS didasarkan pada perbedaan suhu efektif antara bagian terluar dan terdalam beton (ΔT_y).

Tabel 5. Rangkuman variabel model

	Variabel	
	Suhu penempatan (T)	Kenaikan suhu (ΔT_y)
Model B-1	T-1=100 $^{\circ}$ F	ΔT_{y1}
Model B-2	T-2=90 $^{\circ}$ F	ΔT_{y2}
Model B-3	T-3=80 $^{\circ}$ F	ΔT_{y3}
Model B-4	T-4=70 $^{\circ}$ F	ΔT_{y4}

Evaluasi batas regangan

Kapasitas regangan *damage* ultimit beton berkisar antara 0.00015 hingga 0.00025 yang merupakan batas regangan tarik maksimum sebagai titik awal keretakan beton (Shen dkk., 2019). Model elemen hingga pada penelitian ini akan berfokus pada gradien regangan yang terbatas pada lingkup *non-damage*. Berdasarkan hasil output regangan, gradien tersebut akan diamati untuk mengetahui intensitas regangan dan perilakunya terhadap variasi kenaikan suhu panas hidrasi. Batas regangan dapat ditentukan secara sederhana dengan hasil pembagian antara kuat tarik beton oleh modulus elastisitas. Berdasarkan Pers. (2) dan Pers. (4) (ACI Committee 318, 2007), dapat ditentukan batas regangan tarik adalah 0.00012.

$$f_{ct}(t) = 0.56\sqrt{f'_c(t)} \quad (4)$$

Indikasi parameter perkembangan keretakan pada ABAQUS dapat diperoleh dari *damage-model*, regangan plastis, atau regangan logaritmik (Jumaa & Yousif, 2019). Pengukuran regangan logaritmik

banyak digunakan dalam model konstitutif yang beroperasi pada regangan volumetrik (Latorre & Montáns, 2014). Tegangan akibat muai termal beroperasi pada model regangan volumetrik, sehingga pengukuran regangan pada penelitian ini mengacu pada regangan logaritmik terhadap sumbu Z (LE33). Output regangan LE33 (ϵ_{33}) yang diperoleh dari ABAQUS akan direpresentasikan terhadap gradien regangan struktur secara keseluruhan dan perbandingan potongan setiap penampang melintang Section A, B, C, D, dan E.

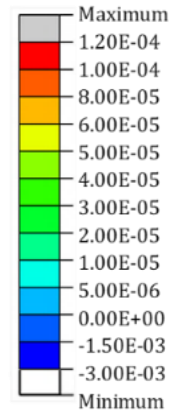
Hasil dan Pembahasan

Pemodelan elemen hingga yang bersifat iteratif dan berjenjang memungkinkan untuk mengamati evolusi tegangan atau regangan dengan penerapan tingkatan *integration point/step* yang menangani akumulasi perubahan regangan pada setiap langkah iterasi. Dalam durasi perhitungan simultan setiap *step*, setiap peningkatan atau pengurangan regangan diproses sebagai pembaruan kumulatif yang memutakhirkan aliran batas regangan retak yang telah ditentukan (Feenstra & De Borst, 1996). Model *non-damage* mengolah tahapan regangan retak secara bertahap dan akumulatif sehingga hasil akhirnya berupa zonasi area berisiko yang dapat ditunjukkan oleh skala gradasi warna tertentu (Geers dkk., 1998).

Pola gradien regangan

Pola aliran regangan ditunjukkan oleh warna merah sebagai batas retak oleh regangan tarik dengan nominal 0.00012 dan warna abu-abu sebagai lingkup area yang telah mengalami transfer intensitas regangan, ditunjukkan oleh Gambar 7. Hasil perhitungan simultan secara *step-by-step* menunjukkan bahwa aliran batas regangan tarik terlokalisasi ke arah Section A untuk semua model, ditunjukkan pada Tabel 6. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi ketidakseimbangan transfer intensitas regangan tarik yang mengindikasikan ketidakmampuan desain struktur dalam mendistribusikan dengan baik tegangan

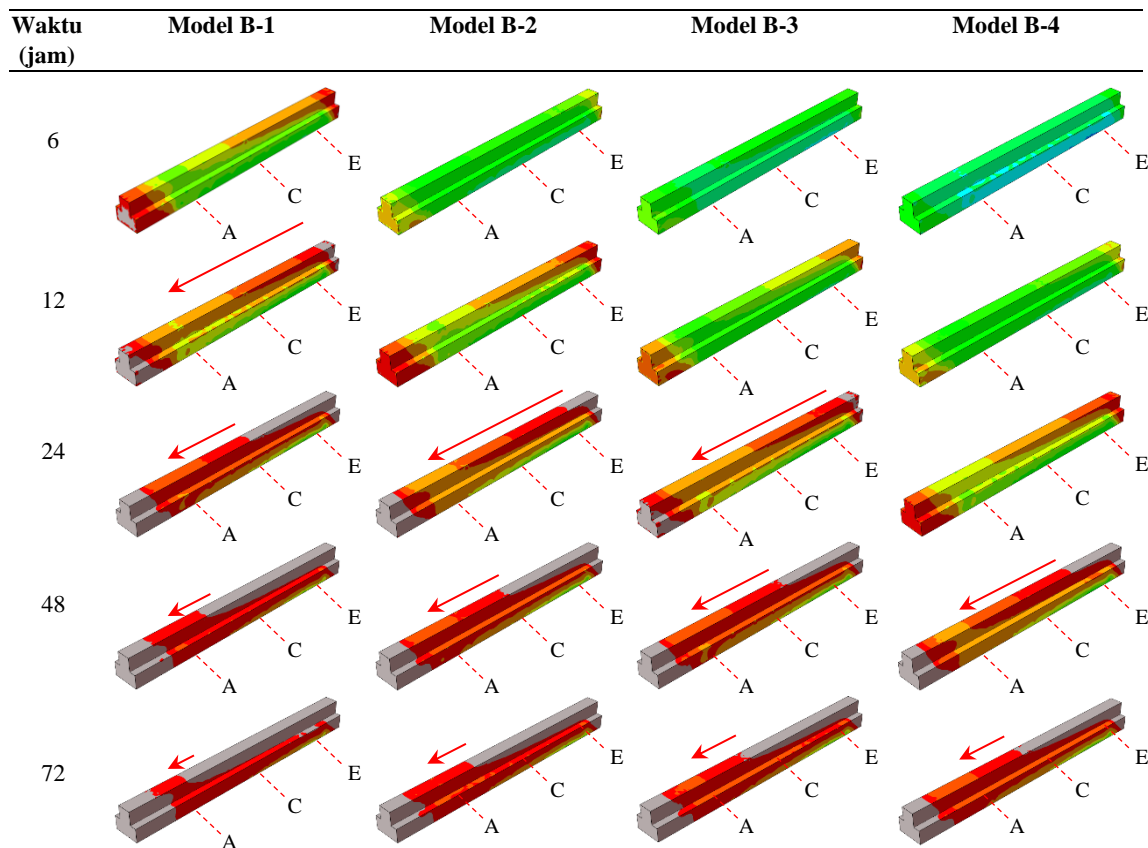
volumetrik akibat panas hidrasi. Akibat ketidakmampuan struktur untuk mendistribusikan gaya regangan secara seimbang ke kolom terdekat, dapat diperkirakan bahwa area pada sekitar Section A akan mengalami akumulasi aliran regangan tarik dan menjadi area berisiko tinggi untuk mengalami keretakan.



Gambar 7. Skala gradasi warna untuk gradien regangan

Semua model dengan variasi terhadap suhu penempatan beton menunjukkan tidak adanya perubahan signifikan dalam pola aliran gradien regangan. Area dengan warna abu-abu menunjukkan bahwa sebagian besar bagian struktur P87 secara tidak seragam masih mengalami gradien regangan *non-damage* yang melebihi batas regangan tarik. Hal tersebut mengindikasikan bahwa modifikasi terhadap penempatan suhu beton mentah tidak serta merta mengurangi potensi keretakan pada struktur P87. Perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait metode lain terkait penanggulangan potensi retak yang ada, terutama hubungannya terhadap kelayakan desain struktur dalam melayani regangan akibat perilaku beton massa usia dini. Perlakuan khusus seperti *curing* pada beton muda merupakan salah satu faktor lain yang dapat dipertimbangkan karena metode tersebut dapat mempengaruhi suhu terluar permukaan beton dan secara langsung mengurangi perbedaan suhu efektif antara bagian terluar dan terdalam beton (ΔT_y).

Tabel 6. Aliran batas regangan tarik untuk setiap jenjang waktu



Regangan batas puncak

Karena model *non-damage* bersifat mengakumulasi perubahan regangan pada setiap *step*, maka regangan batas puncak dapat diamati pada kondisi akhir waktu simulasi. Tabel 7 dan Gambar 8 menyajikan perhitungan data dan perbandingan regangan puncak pada langkah waktu jam ke-72 atau hari ketiga. Dengan membandingkan secara langsung pengurangan kenaikan suhu hidrasi (ΔT) terhadap reduksi regangan puncak (ϵ_{33}), maka dapat diamati bahwa reduksi regangan puncak memiliki hubungan yang proporsional terhadap pengurangan kenaikan suhu hidrasi. Sebagai contoh, hubungan proporsional tersebut menunjukkan bahwa penurunan regangan puncak akan sebanding dengan usaha untuk menurunkan suhu sebesar 20.99% (selisih $\Delta T-4$ dan $\Delta T-1$) untuk suhu penempatan beton 21.11°C ($T-4$). Mengingat data

prediksi kenaikan suhu hidrasi yang secara teoritis didekati dengan grafik perolehan dari spesifikasi ACI 207.2R-07, alternatif lain dalam menentukan pola kenaikan suhu hidrasi dapat dilakukan dengan pengujian spesimen sehingga regangan puncak dapat diprediksi secara lebih faktual. Sehingga dalam penerapan lebih lanjut dapat dilakukan simulasi model *damage* untuk mengetahui hubungan yang lebih ideal untuk melakukan justifikasi terhadap potensi keretakan yang lebih nyata.

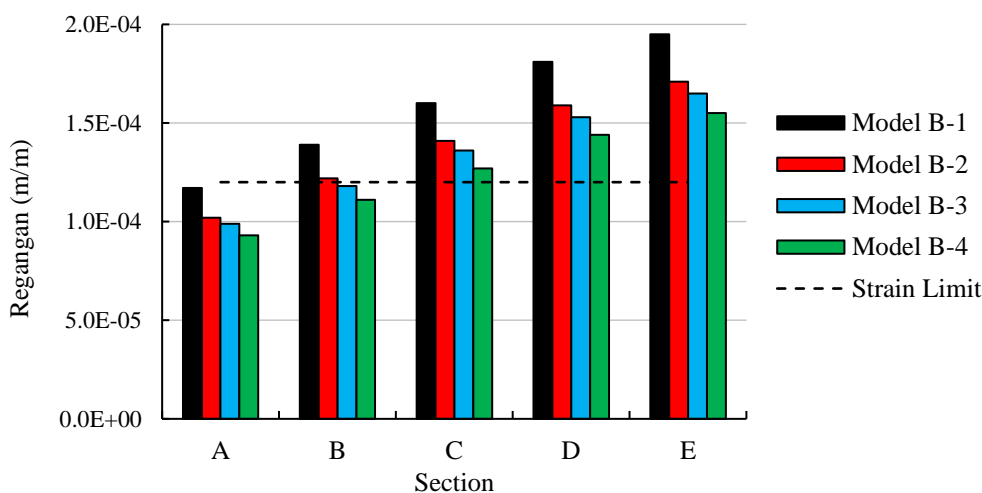
Berdasarkan Model B-4 dengan suhu penempatan beton paling rendah pada 21.11°C ($T-4$), keseluruhan struktur masih mengalami regangan tarik puncak di atas batas regangan tarik yang mengindikasikan masih adanya potensi retak yang dapat terjadi. Regangan tarik puncak pada suhu penempatan paling rendah (Model B-4) secara umum mulai terjadi dari Section E dengan $\epsilon_{33-E4} = 1.55E-4$ (79.49% ϵ_{33-E1}) yang

dapat dikatakan masih jauh dari batas regangan tarik target. Hal tersebut menjadikan metode modifikasi suhu penempatan beton menjadi kurang efektif dan efisien sebagai metode pencegahan retak karena diperlukan suhu awal yang jauh kurang dari 21.11°C. Pencapaian usaha pengurangan suhu penempatan beton di

lapangan dapat menjadi kendala karena dipengaruhi oleh faktor yang lebih kompleks, terutama untuk lokasi proyek di area tropis dengan suhu atmosfer yang sangat tinggi. Sehingga penerapan metode lain seperti metode kedua atau ketiga dapat dipertimbangkan untuk melakukan pencegahan retak pada struktur P87.

Tabel 7. Perbandingan variabel penurunan suhu penempatan terhadap regangan puncak

	ΔT (°C)	Regangan puncak setiap penampang/section (ϵ_{33})				
		A	B	C	D	E
B-1	$\Delta T-1=32.14$	$\epsilon_{33-A1}=1.2E-4$	$\epsilon_{33-B1}=1.4E-4$	$\epsilon_{33-C1}=1.6E-4$	$\epsilon_{33-D1}=1.8E-4$	$\epsilon_{33-E1}=1.9E-4$
B-2	87.36% ($\Delta T-1$)	87.18% ϵ_{33-A1}	87.77% ϵ_{33-B1}	88.13% ϵ_{33-C1}	87.85% ϵ_{33-D1}	87.69% ϵ_{33-E1}
B-3	84.20% ($\Delta T-1$)	84.53% ϵ_{33-A1}	84.89% ϵ_{33-B1}	85.00% ϵ_{33-C1}	84.53% ϵ_{33-D1}	84.62% ϵ_{33-E1}
B-4	79.01% ($\Delta T-1$)	79.49% ϵ_{33-A1}	79.86% ϵ_{33-B1}	79.38% ϵ_{33-C1}	79.56% ϵ_{33-D1}	79.49% ϵ_{33-E1}



Gambar 8. Grafik perbandingan regangan puncak secara keseluruhan

Kesimpulan

Simulasi 4 model dengan variasi kenaikan suhu hidrasi menggunakan perangkat lunak ABAQUS dan sub rutin Fortran pada lingkup *non-damage* dapat memberikan gambaran awal gambaran untuk memprediksi potensi keretakan beton usia dini terutama pada struktur *pier cap* P87. Pola gradien regangan pada setiap variasi kenaikan suhu hidrasi masih menunjukkan potensi serupa yaitu lokalisasi area zona rawan retak pada Section A. Berdasarkan hasil pengamatan tersebut, perlu dilakukan kajian lebih lanjut terkait kelayakan desain struktur *pier cap* P87 terutama dalam hal mendistribusikan regangan akibat panas hidrasi. Hal penting lain yang dapat diamati

adalah regangan puncak pada suhu penempatan beton terendah yang dimodelkan masih memiliki regangan puncak di atas regangan tarik batas. Sehingga dalam penerapan modifikasi suhu penempatan beton sesuai dengan pola kenaikan suhu pada studi ini, akan diperlukan usaha lebih ekstra untuk mencapai suhu penempatan beton yang lebih rendah agar diperoleh capaian regangan puncak yang lebih rendah. Perlu dilakukan investigasi lebih lanjut terhadap kajian penerapan metode kedua dan ketiga dalam rangka menentukan alternatif metode yang lebih efektif dan efisien untuk mencegah terjadinya keretakan beton usia dini pada struktur beton massa *pier cap* P87.

Daftar Pustaka

- ACI Committee 207. (1998). ACI 207.4R-93 Cooling and insulating systems for mass concrete. Dalam ACI 207.4 R-93.
- ACI Committee 207. (2007). ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete.
- ACI Committee 209. (1997). ACI 209R-92 Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures.
- ACI Committee 318. (2007). ACI 318M-08 Building Code Requirements for Structural Concrete.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
- Bastesk ar, M., Engen, M., Kanstad, T., & Foss a, K. T. (2019). A review of literature and code requirements for the crack width limitations for design of concrete structures in serviceability limit states. *Structural Concrete*, 20(2), 678–688. <https://doi.org/10.1002/suco.201800183>
- Bofang, Z. (2014). Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06038-3>
- Chang, S., Yang, M., Sun, Y., & Liu, K. (2019). Calculation Method of Early-Age Crack Width in Reinforced Concrete Bridge through a Nonlinear FEA Model. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 23(7), 3088–3096. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-2129-0>
- Feenstra, P. H., & De Borst, R. (1996). A composite plasticity model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 33(5), 707–730. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(95\)00060-N](https://doi.org/10.1016/0020-7683(95)00060-N)
- Geers, M. G. D., de Borst, R., Brekelmans, W. A. M., & Peerlings, R. H. J. (1998). Strain-based transient-gradient damage model for failure analyses. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 160(1–2), 133–153. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(98\)80011-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)80011-X)
- Jeong, J.-H., Zollinger, D. G., Lim, J.-S., & Park, J.-Y. (2012). Age and Moisture Effects on Thermal Expansion of Concrete Pavement Slabs. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 8–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000342](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000342)
- Jumaa, G. B., & Yousif, A. R. (2019). Numerical modeling of size effect in shear strength of FRP-reinforced concrete beams. *Structures*, 20, 237–254. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.008>
- Latorre, M., & Mont ans, F. J. (2014). On the interpretation of the logarithmic strain tensor in an arbitrary system of representation. *International Journal of Solids and Structures*, 51(7–8), 1507–1515. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.12.041>
- Liu, Y., Schindler, A. K., & Davidson, J. S. (2018). Finite-Element Modeling and Analysis of Early-Age Cracking Risk of Cast-In-Place Concrete Culverts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(27), 24–36. <https://doi.org/10.1177/0361198118774157>
- Pinto, R., & Hover, K. (1999). Application of Maturity Approach to Setting Times. *ACI Materials Journal*, 96(6). <https://doi.org/10.14359/795>
- Purani, D. (2013). Incorporating shrinkage effects in FE Modeling of Prestressed Concrete Bridge. Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies.
- Saeed, M. K., Rahman, M. K., Alfawzan, M., Basha, S., & Dahish, H. A. (2023). Recycling of date kernel powder (DKP) in mass concrete for mitigating heat generation and risk of cracking at an early age. *Construction and Building Materials*, 376, 131033. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131033>
- Schindler, A. K., Dossey, T., & McCullough, B. F. (2002). Temperature control during construction to improve the long term performance of Portland cement concrete pavements.
- Shen, Q., Chen, W., Liu, C., Zou, W., & Pan, L. (2019). The Tensile Strength and Damage Characteristic of Two Types of Concrete and Their Interface. *Materials*, 13(1), 16. <https://doi.org/10.3390/ma13010016>
- 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>
- Zhu, L., Wang, J.-J., Li, X., Zhao, G.-Y., & Huo, X.-J. (2020). Experimental and numerical study on creep and shrinkage effects of ultra high-performance concrete beam. *Composites Part B: Engineering*, 184, 107713. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107713>