



Analisis Perkembangan Suhu Beton Massa pada Pekerjaan *Raft Foundation* Menggunakan Sistem *Thermocouple*

Edo Twenmayndaru Firmansyah¹, Wiweka Desandana², Anna Rumintang Nauli³^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

*Corresponding author

E-mail addresses: 22035010064@student.upnjatim.ac.id

ARTICLE INFO**Article history:**

Received October 15, 2025

Revised December 20, 2025

Accepted January 05, 2026

Available online January 07, 2026

Kata Kunci:*Fly Ash; Panas Hidrasi; Beton Massa; Pondasi Rakit; Pemantauan Suhu; Thermocouple.***Keywords:***Fly Ash; Heat of Hydration; Mass Concrete; Raft Foundation; Temperature Monitoring; Thermocouple.*

This is an open access article under the [CC BY-SA license](#).
Copyright © 2026 by Author. Published by Yayasan Sagita Akademia Maju.

A B S T R A K

Beton massa (*mass concrete*) memerlukan pengendalian panas hidrasi untuk mencegah retak termal, khususnya pada pekerjaan struktur dengan volume besar. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sebaran suhu beton massa pada pekerjaan *raft foundation* Tower A Proyek Mandiri Financial Center PIK menggunakan sistem pemantauan *thermocouple*. Pemantauan dilakukan pada enam titik dengan sensor pada bagian atas, tengah, dan bawah beton, serta satu sensor suhu udara. Beton yang digunakan bermutu f'_c 35 MPa dengan substitusi fly ash Tipe F sebesar 25%. Hasil penelitian menunjukkan suhu maksimum beton mencapai 75,8°C, dengan suhu tertinggi terjadi pada bagian tengah beton akibat akumulasi panas hidrasi. Perbedaan suhu vertikal berkisar antara 6,7°C hingga 13°C, masih memenuhi batas ACI 207.1R-96. Penerapan curing compound dan sistem insulasi terbukti efektif dalam mengendalikan perbedaan suhu. Monitoring *thermocouple* terbukti berperan penting dalam pengendalian mutu beton massa pada proyek di wilayah beriklim tropis.

A B S T R A C T

Mass concrete requires proper control of heat of hydration to prevent thermal cracking, particularly in large-volume structural elements. This study aims to evaluate the temperature distribution of mass concrete in the raft foundation of Tower A at the Mandiri Financial Center PIK Project using a thermocouple monitoring system. Temperature monitoring was conducted at six locations with sensors installed at the top, middle, and bottom of the concrete, along with one ambient air temperature sensor. The concrete used had a compressive strength of f'_c 35 MPa with a 25% substitution of Type F fly ash. The results indicate that the maximum concrete temperature reached 75.8°C, with the highest temperature occurring in the middle zone due to the accumulation of hydration heat. The vertical temperature difference ranged from 6.7°C to 13°C, remaining within the allowable limit specified by ACI 207.1R-96. The application of curing compound and an insulation system proved effective in controlling temperature differentials. Thermocouple monitoring plays a crucial role in quality control of mass concrete placement, particularly in tropical climate projects.

1. PENDAHULUAN

Konstruksi beton massa atau *mass concrete* adalah elemen penting dalam proyek gedung tinggi modern, salah satunya adalah Proyek Pembangunan Gedung Mandiri Financial Center PIK. Menurut ACI 116R, beton massa didefinisikan sebagai volume beton yang sangat besar sehingga memerlukan langkah-langkah khusus untuk menangani panas yang dihasilkan dari proses hidrasi semen dan perubahan volume yang terjadi, guna mengurangi risiko terjadinya retak. ACI 116R juga

menjelaskan bahwa elemen struktural yang memiliki dimensi lebih dari 1,2 meter biasanya dikategorikan sebagai beton massa dan membutuhkan perhatian khusus untuk pengendalian suhu.

Salah satu tantangan utama dalam pengecoran beton massa adalah tingginya panas hidrasi yang timbul selama pengerasan beton. Reaksi kimia antara semen dan air menghasilkan panas yang signifikan, terutama pada bagian tengah struktur beton. Panas ini tidak cepat hilang, bahkan mungkin terjebak di lokasi tertentu, menciptakan keadaan yang mendekati adiabatik. Penumpukan panas di dalam beton massa dapat menyebabkan peningkatan suhu yang besar, sementara bagian luar biasanya mendingin dengan lebih cepat karena interaksi dengan udara di sekitarnya.

Perbedaan suhu yang besar antara bagian dalam dan luar beton massa bisa menimbulkan ancaman serius terhadap kekuatan struktural. Jika perbedaan suhu terlalu ekstrem, tegangan tarik yang muncul dapat melebihi kapasitas tarik beton, terutama pada fase awal saat beton belum mencapai kekuatan maksimalnya. Hal ini bisa mengakibatkan retak termal, yang selain mengurangi kekuatan struktural juga berdampak pada ketahanan beton dalam jangka panjang. ACI 207.1R-96 merekomendasikan agar selisih suhu antara inti dan permukaan beton tidak lebih dari 20°C untuk mencegah retak termal. ACI 207.1R-96 juga menekankan pentingnya pengendalian suhu dalam pengecoran beton massa untuk menghindari keretakan yang dapat menurunkan kekuatan dan daya tahan struktur.

Untuk mencegah masalah retak termal, pemantauan suhu yang tepat dan sistematis sangat dibutuhkan selama proses pengecoran dan pengerasan beton massa. *Thermocouple* adalah alat pengukur suhu yang efektif digunakan untuk tujuan ini karena kemampuannya memberikan pembacaan suhu secara *real-time* dengan akurasi tinggi dan dapat berfungsi dalam rentang suhu yang luas.

Dalam penelitian ini digunakan empat sensor *thermocouple*, yang masing-masing ditempatkan pada bagian atas, tengah, dan bawah struktur beton, serta satu sensor tambahan untuk mengukur suhu udara sekitar sebagai pembanding. Penggunaan empat sensor pada kedalaman yang berbeda ini bertujuan untuk memperoleh gambaran distribusi suhu secara menyeluruh pada beton massa, sesuai dengan rekomendasi ACI 207.1R-96 terkait pemantauan suhu pada titik-titik kritis beton.

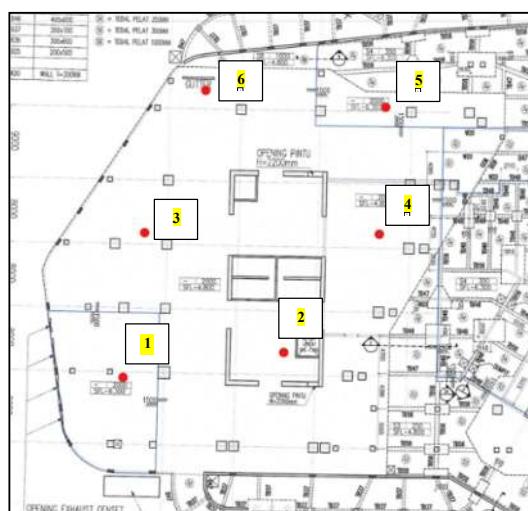
Periode kritis dalam perkembangan suhu beton massa terjadi pada 72 jam pertama setelah pengecoran, ketika sebagian besar reaksi hidrasi semen terjadi dengan intensif. Distribusi dan perubahan suhu selama periode ini sangat menentukan apakah akan terjadi retak termal atau tidak. ACI 207. 2R menyatakan bahwa suhu harus dimonitor secara terus-menerus selama periode kritis ini untuk memastikan perbedaan suhu tetap aman. Pemahaman yang baik tentang bagaimana distribusi suhu berkembang dari jam nol hingga jam ketujuh puluh dua sangat penting untuk menilai efektivitas metode pengendalian suhu yang digunakan, serta untuk menyediakan data empiris yang bermanfaat dalam perencanaan pengecoran beton massa di masa depan.

Berdasarkan isu yang ada, studi ini direncanakan untuk mengevaluasi sebaran suhu dalam proses pengecoran beton massa pada Proyek Pembangunan Gedung Mandiri Financial Center PIK dengan memanfaatkan sistem pemantauan *thermocouple*. Penelitian ini sejalan dengan *Sustainable Development Goal (SDG's)* 9

terkait pembangunan infrastruktur yang tangguh dan inovatif melalui penerapan teknologi pemantauan untuk meningkatkan mutu dan keandalan konstruksi. Selain itu, penggunaan fly ash sebagai material substitusi serta pengendalian panas hidrasi mendukung SDG's 12 tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab dengan mengoptimalkan pemanfaatan material dan mengurangi potensi pemborosan akibat kegagalan mutu beton. Temuan penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pengelolaan kualitas pengecoran beton massa serta menyajikan data suhu sebagai referensi bagi proyek-proyek sejenis di Indonesia, khususnya pada kondisi iklim tropis dengan suhu lingkungan yang tinggi.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Tower A, Proyek Pembangunan Gedung Mandiri Financial Center PIK dengan sebaran enam titik pengamatan.

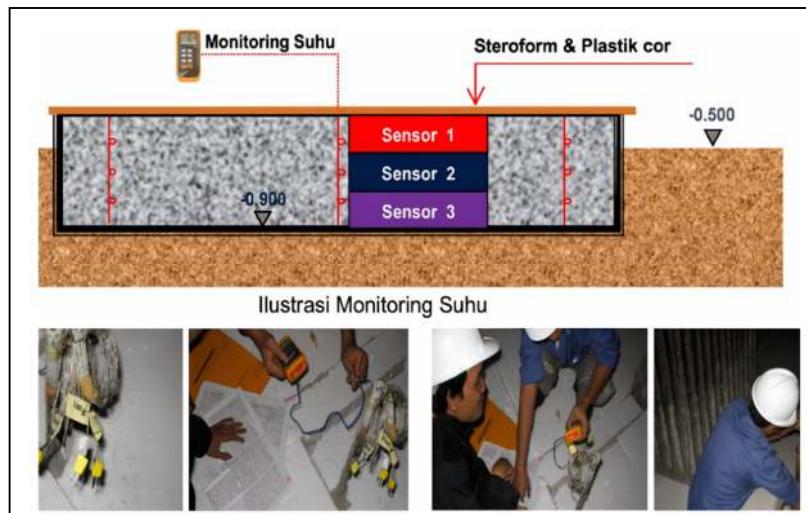


Gambar 1. Denah Penempatan Thermocouple pada Raft Foundation Tower A
(Sumber: Dokumen Proyek)

Jumlah titik pengamatan *thermocouple* ditetapkan sesuai denah lokasi pengujian, di mana setiap titik pengamatan terdiri atas tiga posisi sensor, yaitu sensor pada bagian atas, tengah, dan bawah struktur beton. Selain itu, dipasang satu sensor tambahan untuk mengukur suhu udara sekitar sebagai banding. Pengaturan ini dimaksudkan untuk memperoleh profil suhu yang representatif pada berbagai kedalaman struktur beton massa serta membandingkannya dengan kondisi lingkungan sekitar.

Prosedur pemasangan dan pengujian *thermocouple* dilaksanakan melalui beberapa tahapan. Pertama, penempatan *probe thermocouple* dilakukan pada pipa atau saluran yang telah disiapkan di dalam struktur *mass concrete*, sehingga sensor dapat merekam perubahan suhu secara langsung pada elemen beton. Kedua, dilakukan pengujian awal berupa pemanasan menggunakan sumber api sebagai langkah verifikasi fungsi sensor *thermocouple*. Prosedur pemanasan ini merupakan bagian dari standar pemeriksaan awal sebelum proses monitoring suhu dilaksanakan.

Setelah itu, ujung kabel *thermocouple* dihubungkan ke socket penghubung yang tersambung dengan alat ukur suhu. Sambungan tersebut diberi pelindung berupa plastik penutup untuk mencegah terjadinya gangguan akibat paparan air hujan atau kelembapan lingkungan. Tahap terakhir adalah pelaksanaan pengujian suhu, yang dilakukan setelah proses pemanasan awal selesai, dengan tujuan memastikan bahwa sensor *thermocouple* bekerja secara akurat pada titik pengamatan yang telah ditentukan.



Gambar 2. Ilustrasi Pekerjaan Thermocouple
(Sumber: Dokumen Proyek)

Prosedur pembacaan suhu dilakukan sebagai berikut:

1. Pengambilan data suhu dimulai setelah proses pemasangan insulasi pada permukaan beton selesai. Jenis insulasi yang umumnya digunakan pada permukaan beton meliputi:
 - a. Insulasi permukaan beton dapat berupa lapisan plastik.
 - b. Plywood berukuran $1,2 \times 2,4$ meter.
2. Pembacaan suhu dilakukan selama kurang lebih 7 hari.
3. Pengukuran suhu dimulai setelah proses pengecoran selesai, dengan ketentuan sebagai berikut:
 - a. Pada 24 jam pertama, pembacaan suhu dilakukan setiap 2 jam.
 - b. Untuk 48 jam berikutnya (hari ke-2 sampai hari ke-3), pembacaan dilakukan setiap 3 jam.
 - c. Setelah itu, pengukuran dilakukan setiap 4 jam hingga hari ke-7.
4. Seluruh hasil pembacaan suhu dicatat dan dimasukkan ke dalam *form* harian.
5. Suhu yang diharapkan selama proses curing harus memenuhi kriteria berikut:
 - a. Perbedaan suhu antara sensor tengah dan sensor atas serta antara sensor tengah dan sensor bawah tidak boleh melebihi 20°C .
 - b. Titik dengan suhu tertinggi umumnya adalah sensor pada posisi tengah.

6. Proses curing dinyatakan selesai apabila selisih suhu antara beton dan suhu udara luar telah kurang dari 20°C. Pada kondisi tersebut, bahan insulator sudah dapat dilepas.
7. Seluruh data hasil pembacaan suhu kemudian diolah dalam program untuk menghasilkan grafik kenaikan dan penurunan suhu selama proses curing.

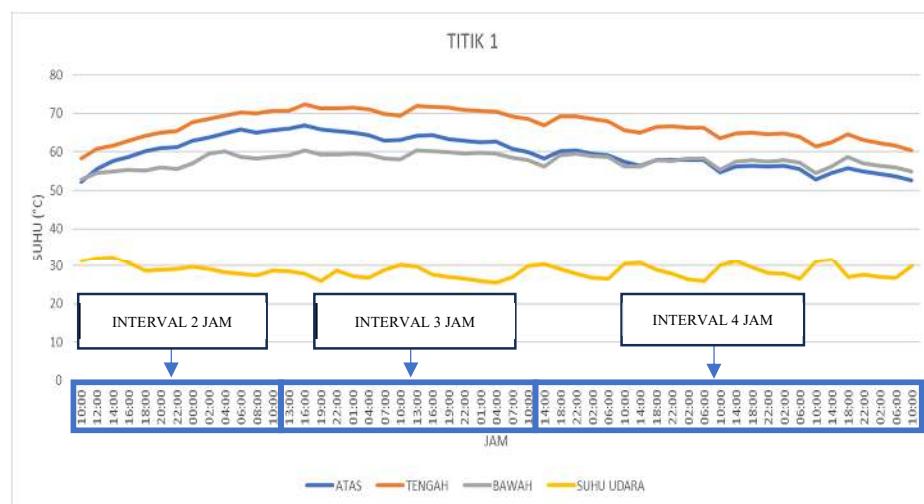
Sebagai objek penelitian, pekerjaan *mass concrete raft foundation* Tower A pada Proyek Pembangunan Gedung Mandiri Financial Center PIK membutuhkan beton dengan total volume 5.433 m³. Spesifikasi beton yang digunakan adalah mutu beton dengan kuat tekan karakteristik Fc' 35 MPa, dengan nilai slump 14 ± 2 cm untuk memastikan *workability* yang optimal selama proses pengcoran. Dalam rangka mengendalikan panas hidrasi dan meminimalkan risiko retak termal pada struktur *mass concrete*, komposisi beton menggunakan fly ash Tipe F sesuai standar ASTM C618 sebesar 25% dari total berat semen sebagai pengganti parsial semen Portland. Penggunaan fly ash ini bertujuan untuk mengurangi *heat of hydration*, meningkatkan durabilitas beton, serta memenuhi persyaratan teknis untuk pekerjaan *mass concrete* bervolume besar dengan ketebalan signifikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

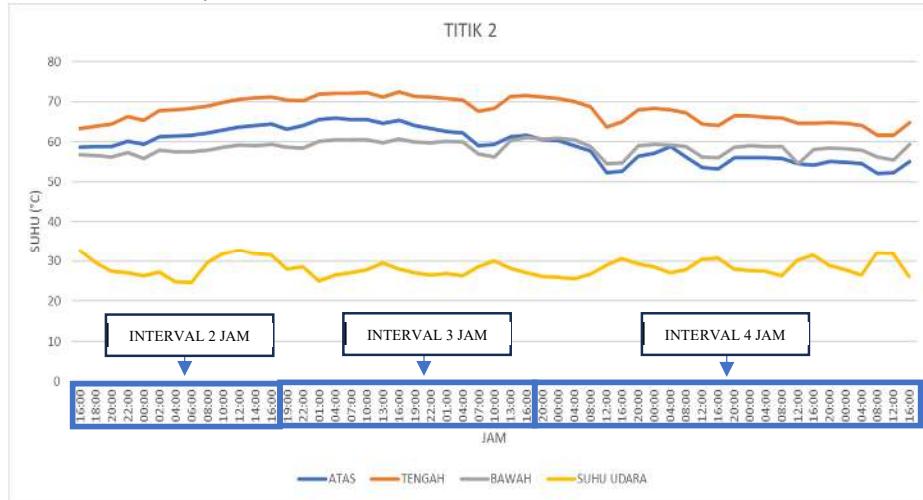
Titik 1

Perbedaan suhu maksimum yang terlihat antara bagian tengah dan bagian atas pada Titik 1 sebesar 9,2°C, terjadi pada tanggal 13 September Jam 18:00. Selain itu, perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan bagian bawah sebesar 12,1 yang terjadi pada tanggal 11 September jam 19:00. Kedua nilai ini berada di bawah batas spesifik 20 °C sesuai dengan standar ACI 207.1R-96. Gambar 3 menyajikan grafik perubahan suhu pada Titik 1 untuk kondisi bagian atas, tengah, bawah, dan suhu udara.



Titik 2

Untuk Titik 2, perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan bagian atas ditemukan sebesar $12,3^{\circ}\text{C}$ yang terjadi pada tanggal 13 September jam 16:00. Perbedaan suhu maksimum yang terlihat antara bagian tengah dan bagian bawah adalah $12,1^{\circ}\text{C}$ pada tanggal 12 September jam 10:00. Di lokasi ini, perbedaan suhu juga berada di bawah 20°C , sesuai dengan standar ACI 207.1R-96. Grafik perubahan suhu pada Titik 2 disajikan pada Gambar 4.

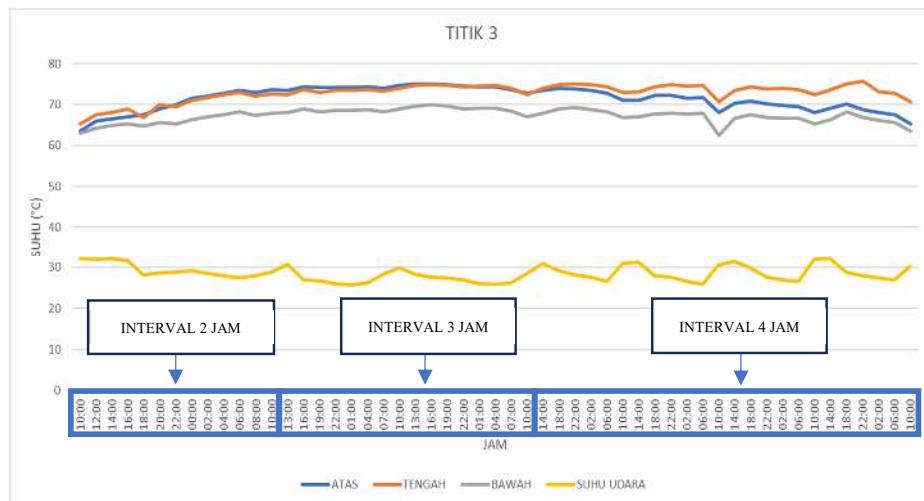


Gambar 4 Grafik Pembacaan Suhu Thermocouple Titik 2

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Titik 3

Untuk Titik 3, perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan bagian atas ditemukan sebesar 7°C yang terjadi pada tanggal 16 September jam 22:00. Perbedaan suhu maksimum yang terlihat antara bagian tengah dan bagian bawah adalah 9°C pada tanggal 16 September jam 22:00. Di lokasi ini, perbedaan suhu juga berada di bawah 20°C , sesuai dengan standar ACI 207.1R-96. Grafik perubahan suhu pada Titik 3 disajikan pada Gambar 5.

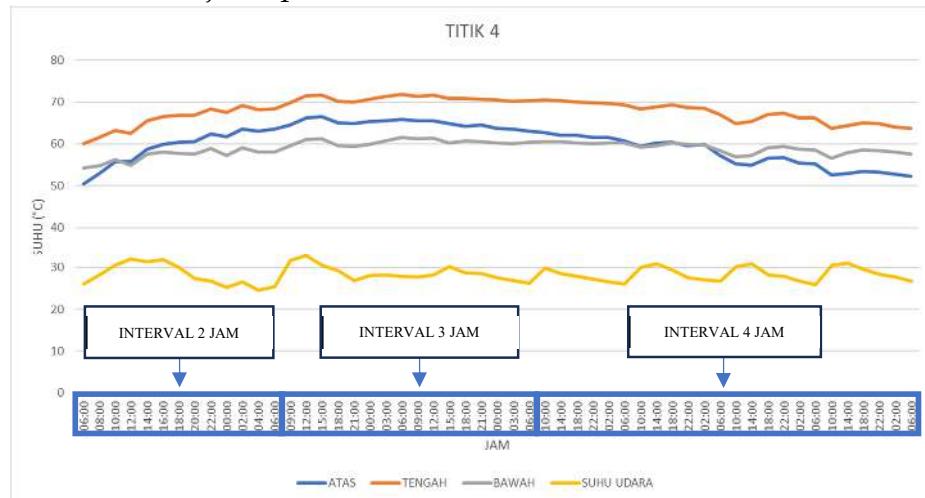


Gambar 5 Grafik Pembacaan Suhu Thermocouple Titik 3

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Titik 4

Untuk Titik 4, perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan bagian atas ditemukan sebesar $11,6^{\circ}\text{C}$ yang terjadi pada tanggal 15 September jam 18:00. Perbedaan suhu maksimum yang terlihat antara bagian tengah dan bagian bawah adalah $10,8^{\circ}\text{C}$ pada tanggal 11 September jam 00:00. Di lokasi ini, perbedaan suhu juga berada di bawah 20°C , sesuai dengan standar ACI 207.1R-96. Grafik perubahan suhu pada Titik 4 disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6 Grafik Pembacaan Suhu Thermocouple Titik 4
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Titik 5

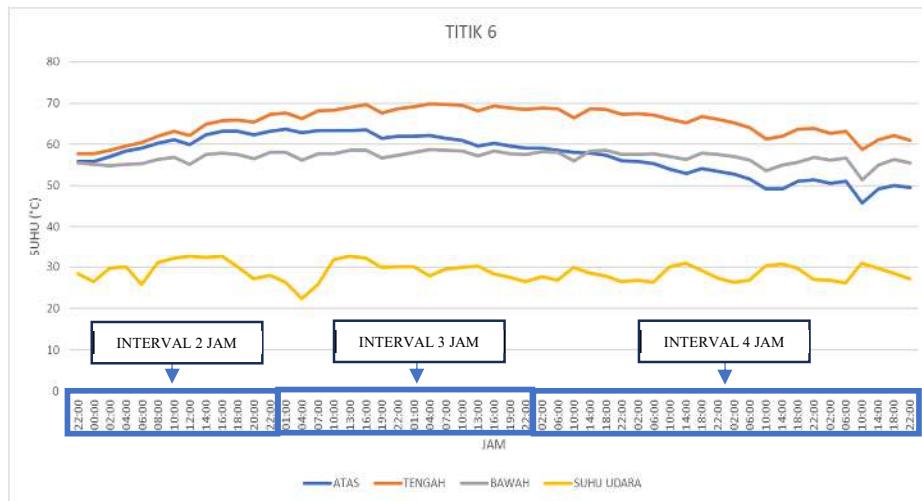
Untuk Titik 5, perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan bagian atas ditemukan sebesar $12,1^{\circ}\text{C}$ yang terjadi pada tanggal 14 September jam 10:00. Perbedaan suhu maksimum yang terlihat antara bagian tengah dan bagian bawah adalah $6,7^{\circ}\text{C}$ pada tanggal 08 September jam 22:00. Di lokasi ini, perbedaan suhu juga berada di bawah 20°C , sesuai dengan standar ACI 207.1R-96. Grafik perubahan suhu pada Titik 5 disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Grafik Pembacaan Suhu Thermocouple Titik 5
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Titik 6

Untuk Titik 6, perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan bagian atas ditemukan sebesar 13°C yang terjadi pada tanggal 15 September jam 10:00. Perbedaan suhu maksimum yang terlihat antara bagian tengah dan bagian bawah adalah $11,3^{\circ}\text{C}$ pada tanggal 10 September jam 22:00. Di lokasi ini, perbedaan suhu juga berada di bawah 20°C , sesuai dengan standar ACI 207.1R-96. Grafik perubahan suhu pada Titik 6 disajikan pada Gambar 8.



Tabel 2 Perbedaan Suhu Maksimum Antar Bagian (°C)

Perbedaan Maksimum	Suhu	Lokasi						Maksimum
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6	
Atas - Tengah		9,2	12,3	7	11,6	12,1	13	13
Tengah - Bawah		12,1	12,1	9	10,8	6,7	11,3	12,1

Untuk mengendalikan perbedaan suhu tersebut, diterapkan metode perawatan dengan sistem buka tutup insulasi yang bertujuan menjaga perbedaan suhu tidak melebihi 20°C sesuai standar ACI 207.1R-96 dan mencegah pengeringan cepat pada permukaan beton. Metode ini menggunakan kombinasi curing compound untuk mempertahankan kelembapan yang cukup, serta pemasangan plywood dan *plastic sheet* sebagai lapisan insulasi untuk mencegah pelepasan panas secara cepat dari permukaan beton. Proses curing dengan insulasi terus dilakukan hingga perbedaan suhu antara permukaan atas beton dengan udara luar mencapai kurang dari 20°C. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa pada hari ketujuh, perbedaan suhu telah menurun hingga 14,8°C, memenuhi batasan yang diizinkan, sehingga insulasi dapat dilepas dengan aman tanpa risiko keretakan termal.

Pembahasan

Hasil pemantauan suhu pada pekerjaan beton massa raft foundation Tower A menunjukkan pola perkembangan suhu yang konsisten dengan teori panas hidrasi beton pada elemen berdimensi besar. Kenaikan suhu yang signifikan pada fase awal pengecoran disebabkan oleh reaksi eksotermis antara semen dan air, di mana laju pelepasan panas lebih cepat dibandingkan kemampuan beton untuk melepaskan panas ke lingkungan, khususnya pada bagian inti beton. Kondisi ini sejalan dengan definisi dan karakteristik beton massa yang dijelaskan oleh American Concrete Institute (ACI), yang menyatakan bahwa beton dengan dimensi besar cenderung mengalami akumulasi panas hidrasi pada bagian tengah elemen struktur (ACI Committee 207, 1996).

Suhu maksimum beton yang tercatat sebesar 75,8°C masih berada dalam kisaran yang umum dijumpai pada pekerjaan beton massa di iklim tropis, terutama pada struktur dengan volume besar dan ketebalan signifikan. Beberapa penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa suhu beton massa dapat melampaui 70°C pada fase awal pengerasan, khususnya apabila tidak dilakukan pengendalian panas hidrasi secara memadai (Pardede & Oemar, 2020; Ulfah & Sugiyanto, 2021). Oleh karena itu, pencapaian suhu maksimum tersebut dapat dikatakan masih wajar, selama perbedaan suhu antarbagian beton tetap berada dalam batas aman.

Distribusi suhu vertikal pada enam titik pengamatan menunjukkan bahwa bagian tengah beton secara konsisten mengalami suhu tertinggi dibandingkan bagian atas dan bawah. Fenomena ini terjadi akibat sifat beton massa yang mendekati kondisi adiabatik, sehingga panas yang terbentuk di dalam beton sulit dilepaskan dengan cepat ke lingkungan sekitar. Sementara itu, bagian atas beton cenderung mengalami pendinginan lebih cepat karena kontak langsung dengan udara luar, sedangkan bagian bawah dipengaruhi oleh kondisi tanah dan elemen pendukung di bawahnya. Pola ini juga ditemukan pada berbagai studi beton massa

lainnya, baik pada pekerjaan raft foundation maupun pile cap berdimensi besar (Handayani et al., n.d.; Abadiyah et al., 2021).

Perbedaan suhu maksimum antara bagian tengah dan permukaan beton pada seluruh titik pengamatan berada pada rentang 6,7°C hingga 13°C. Nilai tersebut masih jauh di bawah batas maksimum 20°C yang direkomendasikan oleh ACI 207.1R-96 sebagai ambang aman untuk mencegah terjadinya retak termal akibat tegangan tarik berlebih pada beton usia dini. Hal ini menunjukkan bahwa risiko terjadinya retak termal pada struktur raft foundation relatif rendah. Temuan ini konsisten dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa pengendalian selisih suhu merupakan faktor kunci dalam menjaga integritas struktural beton massa, bukan semata-mata nilai suhu maksimum beton (Simbolon & Sutanto, n.d.; Zakariya et al., n.d.).

Penggunaan fly ash Tipe F sebesar 25% sebagai substitusi parsial semen berperan penting dalam menekan laju panas hidrasi. Fly ash diketahui memiliki reaktivitas yang lebih lambat dibandingkan semen Portland, sehingga mampu menurunkan puncak suhu beton dan memperlambat laju kenaikan suhu pada fase awal pengerasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan fly ash pada beton massa tidak hanya efektif dalam mengurangi panas hidrasi, tetapi juga meningkatkan durabilitas beton dalam jangka panjang (Zakariya et al., n.d.; Ulfah & Sugiyanto, 2021). Dengan demikian, komposisi campuran beton yang digunakan pada penelitian ini dapat dikatakan tepat untuk pekerjaan beton massa berskala besar.

Selain komposisi material, metode curing dan sistem insulasi yang diterapkan juga berkontribusi signifikan terhadap keberhasilan pengendalian suhu beton. Penggunaan curing compound berfungsi menjaga kelembapan permukaan beton dan mencegah penguapan air yang terlalu cepat, sementara plywood dan plastic sheet berperan sebagai lapisan insulasi untuk memperlambat pelepasan panas dari permukaan beton. Sistem buka-tutup insulasi yang diterapkan secara bertahap terbukti efektif menjaga gradien suhu tetap stabil hingga perbedaan suhu antara beton dan udara luar berada di bawah 20°C. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi ACI 207 serta praktik lapangan pada proyek-proyek beton massa lainnya (ACI Committee 207, 1996; Pardede & Oemar, 2020).

Pemanfaatan sistem monitoring thermocouple memberikan keuntungan utama berupa ketersediaan data suhu secara kontinu dan akurat pada berbagai kedalaman beton. Data ini memungkinkan pengambilan keputusan teknis yang lebih tepat, khususnya terkait waktu pelepasan insulasi dan evaluasi risiko retak termal. Penelitian-penelitian terdahulu juga menegaskan bahwa monitoring suhu berbasis thermocouple merupakan metode yang andal dan direkomendasikan untuk pekerjaan beton massa pada proyek infrastruktur dan gedung bertingkat tinggi (Yulianti et al., 2024; Handayani et al., n.d.).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat temuan-temuan sebelumnya bahwa kombinasi desain campuran beton yang tepat, metode curing yang terkontrol, serta sistem pemantauan suhu yang andal mampu meminimalkan risiko keretakan termal pada beton massa, khususnya pada proyek konstruksi di wilayah beriklim tropis. Data suhu yang diperoleh juga dapat dijadikan referensi

empiris bagi perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan beton massa serupa di masa mendatang.

4. SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil pemantauan suhu beton massa pada pekerjaan raft foundation Tower A, dapat disimpulkan bahwa distribusi dan perbedaan suhu beton selama proses pengerasan masih berada dalam batas aman sesuai ketentuan ACI 207.1R-96. Suhu maksimum beton terjadi pada bagian tengah akibat akumulasi panas hidrasi, namun perbedaan suhu vertikal antara bagian atas, tengah, dan bawah tidak melebihi 20°C sehingga risiko retak termal dapat diminimalkan. Penggunaan fly ash sebagai substitusi parsial semen, serta penerapan metode curing dan sistem insulasi yang tepat, terbukti efektif dalam mengendalikan panas hidrasi. Monitoring suhu menggunakan thermocouple memberikan data yang akurat dan berperan penting dalam pengendalian mutu beton massa, khususnya pada pelaksanaan konstruksi di wilayah beriklim tropis.

Saran

Untuk penelitian dan pelaksanaan pekerjaan beton massa selanjutnya, disarankan agar sistem monitoring suhu thermocouple tetap diterapkan secara kontinu dengan jumlah titik pengamatan yang memadai guna memperoleh distribusi suhu yang lebih representatif. Selain itu, optimalisasi komposisi campuran beton, khususnya penggunaan bahan tambah seperti fly ash atau material pozzolan lainnya, perlu terus dikaji untuk menekan panas hidrasi. Penerapan metode curing dan insulasi juga sebaiknya disesuaikan dengan kondisi iklim dan volume beton agar pengendalian suhu lebih efektif serta risiko retak termal dapat diminimalkan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abadiyah, S., Basirun, & Harits Nur Hafidz, J. (2021). *STUDI PERBEDAAN TEMPERATUR BETON MASSA PADA PEKERJAAN RAFT FOUNDATION DENGAN KETEBALAN 2,5 METER*.
- American Concrete Institute Committee 207. (1996). *Mass concrete (ACI 207.1R-96)*. American Concrete Institute.
- Endawati, J., & Diasti Densi Widuri dan Moeljono, L. (n.d.). *Pengaruh Panas Hidrasi Beton Dengan Semen Type II Terhadap Ketebalan Elemen Beton-Rochaeti dkk. PENGARUH PANAS HIDRASI BETON DENGAN SEMEN TYPE II TERHADAP KETEBALAN ELEMEN BETON*.
- Handayani, J., Lutfi, M., Chayati, N., Muhammad, F., & Taqwa, L. (n.d.). *STUDI PENGARUH TEMPERATUR BETON MASSA PADA RAFT FOUNDATION KETEBALAN 3 METER (Studi Kasus: Proyek MCC Tower-Jakarta)*. In *Jurnal Komposit* (Vol. 3, Issue 1).
- Pardede, M. D., & Oemar, F. (2020). *PENGENDALIAN SUHU BETON MASSA 3500M3 MENGGUNAKAN BALOK ES DAN PENGARUHNYA TERHADAP BETON* (Studi Kasus : Pondasi Raft Gedung PPAG2). In *Jurnal Teknik Sipil-Arsitektur* (Vol. 19, Issue 2).
- Pulau, J., Bentang, B., Suranto, P. Y., & Pamadya, O. (n.d.). *Analisis Metode Pendinginan Pengecoran Pile Cap Pada Proyek Duplikasi*.

- Setio, H. D., & Ediansjah, dan Z. (n.d.). *PENGARUH JARAK TERHADAP INTERVAL WAKTU PERUBAHAN SUHU PERMUKAAN BETON PADA UJI THERMOGRAPHY AKTIF.*
- Simbolon, R., & Sutanto, H. (n.d.). *Metode Pengendalian Suhu Beton Massa Pekerjaan Pengecoran Pile Cap Jembatan dengan Pengaliran Air Laut Menggunakan Pipa-pipa PVC didalam Beton Studi Kasus : Pengecoran Pile Cap Jembatan Pulau Balang Bentang Pendek.*
- Ulfah, U., & Sugiyanto, S. (2021). ANALISA KENAIKAN TEMPERATUR PADA BETON BERDIMENSI BESAR (MASS CONCRETE) DENGAN SEMEN TYPE V PADA PONDASI STRUKTURAL TURBINE HOUSE. *Rang Teknik Journal*, 4(2), 365-373. <https://doi.org/10.31869/rtj.v4i2.2642>
- Yulianti, G. A., Ramadhani, Y. P., Puspitasari, N. D., Veteran, U. ", & Timur, J. (2024). MONITORING SUHU BETON PONDASI RAFT MENGGUNAKAN THERMOCOUPLE PADA PROYEK PEMBANGUNAN RUMAH SAKIT. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(2), 185-194. <https://doi.org/10.62017/merdeka>
- Zakariya, A., Yudhono, G., Rosyadi, S., Pembangunan Jembatan, D., Kerja Pembangunan Jalan Tol Manado -Bitung Provinsi Sulawesi Utara, S., Pattimura No, J., Baru, K., Selatan, J., SBY No, J., Airmadidi, K., & Minahasa Utara, K. (n.d.). KAJIAN TEMPERATUR BETON SAAT HARDENING TIME MENGGUNAKAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN TAMBAH SEMEN (STUDY OF CONCRETE TEMPERATURE DURING HARDENING TIME USING FLY ASH AS SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL). In *Jurnal Jalan-Jembatan* (Vol. 38, Issue 2).