

Penentuan Letak Pengukuran *Reflected Temperature* dengan Menggunakan Termokopel pada Pengujian Termografi Aktif Terhadap Beton Bertulang

Muhammad Fauzan Ikromi ¹⁾

Suyadi Kartorono²⁾

Masdar Helmi ³⁾

Mohd. Isneini ⁴⁾

Abstract

Active thermography testing is one of the non-destructive tests that uses an infrared camera as a recorder and produces a thermogram. Thermogram is an interpretation of the heat energy received by the infrared camera thermal sensor which still contains noise. Reflected temperature (T_{refl}) is one of the noise that arises from active thermography testing and will be used as a correction value. This research presents a method for finding the position of thermocouple installation around the heat source, so that the temperature value at that position is used as the T_{refl} value to correct noise in the thermogram. Cube-shaped concrete samples with a size of 10x10x15 cm were measured using a thermocouple and an infrared camera 1 meter away. The results showed that the difference between the measurement results using thermocouples and thermography was 2,349 °C, then the average T_{refl} value obtained from active thermography testing was 51,649 °C located 13 cm from the top of the grid board and 5 cm in front of the halogen lamp. The concrete surface temperature before correction has a higher value because it has noise, but after analyzing the temperature calculation has decreased and is close to the temperature of the thermocouple measurement results with an error analysis (ΔT_{err}) an average of 1,448% is obtained. Based on the results of the analysis, the accuracy of the error data is classified as good because the average value of error analysis (ΔT_{err}) <5%.

Keywords : *Reflected Temperature, Active thermography, Non-destructive Testing*

Abstrak

Pengujian termografi aktif merupakan salah satu pengujian non-destruktif yang menggunakan kamera inframerah sebagai perekam dan menghasilkan termogram. Termogram merupakan interpretasi energi panas yang diterima oleh sensor termal kamera inframerah yang masih mengandung *noise*. *Reflected temperature* (T_{refl}) merupakan salah satu *noise* yang muncul dari pengujian termografi aktif dan akan digunakan sebagai nilai koreksi. penelitian ini menyajikan suatu metode untuk mencari posisi pemasangan termokopel di sekitar sumber panas, sehingga nilai suhu pada posisi tersebut digunakan sebagai nilai T_{refl} untuk memperbaiki *noise* pada termogram. Sampel beton berbentuk kubus dengan ukuran 10x10x15 cm diukur suhu permukaannya menggunakan termokopel dan kamera inframerah sejauh 1 meter. Hasil penelitian menunjukkan selisih hasil pengukuran menggunakan termokopel dan termografi sebesar 2,349 °C, lalu rata-rata nilai T_{refl} yang didapatkan dari pengujian termografi aktif sebesar 51,649°C terletak 13 cm dari atas papan *grid* sebesar dan 5 cm di depan lampu halogen. Suhu permukaan beton sebelum dikoreksi memiliki nilai yang lebih tinggi karena memiliki *noise*, namun setelah dilakukan analisis perhitungan suhu mengalami penurunan dan mendekati suhu hasil pengukuran termokopel dengan analisis kesalahan (ΔT_{err}) rata-rata didapatkan 1,448%. Berdasarkan hasil analisis tersebut menunjukkan akurasi data kesalahan tergolong bagus karena nilai rata-rata analisis kesalahan (ΔT_{err}) <5%.

Kata kunci : *Reflected Temperature, Termografi aktif, Pengujian Non-destruktif*

¹⁾ Mahasiswa S1 pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
Surel: fauzan.ikromi15@gmail.com

^{2,3,4)} Dosen pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung, Jalan. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 . Gedong Meneng Bandar Lampung. 35145.

I. PENDAHULUAN

Kerusakan dini pada beton bertulang membuat tantangan yang signifikan bagi kita yang bertanggung jawab atas inspeksi dan pemeliharaan beton. Terdapat beberapa metode pengujian/inspeksi untuk memeriksa kondisi beton diantaranya pengujian destruktif (DT) dan pengujian *non-destruktif* (NDT). Pengujian destruktif (DT) yaitu pengujian yang mengharuskan kita merusak beton untuk mendapatkan sedangkan pengujian *non-destruktif* (NDT) yaitu pengujian yang dapat dilakukan tanpa harus merusak beton (Irwansyah, 2019). Salah satu pengujian *non-destruktif* (NDT) adalah pengujian termografi aktif.

Pengujian termografi aktif adalah pengujian yang memerlukan sumber energi eksternal untuk menginduksi perbedaan suhu antara area yang rusak dan tidak rusak pada spesimen yang diperiksa (Ibarra-Castaneda *et al.*, 2009). Salah satu sumber energi eksternal yang bisa digunakan untuk pengujian termografi aktif adalah lampu halogen. Ketika permukaan beton dipanaskan menggunakan lampu halogen terjadi mekanisme radiasi, konveksi, dan konduksi. Pengujian ini menggunakan kamera inframerah sebagai alat ukur/perekam. Hasil dari perekaman ini berupa termogram. Termogram disini merupakan interpretasi energi panas yang diterima oleh sensor termal kamera inframerah yang masih mengandung *noise*, karena ketika kamera inframerah mengukur sesuatu, kamera inframerah tidak hanya menerima radiasi yang dipancarkan objek tersebut, tetapi juga radiasi dari sumber lain seperti objek sekitar atau atmosfer (Tran *et al.*, 2017).

Reflected Temperature (T_{refl}) merupakan salah satu *noise* yang muncul dari pengujian termografi aktif yang nantinya akan digunakan sebagai nilai koreksi. Ketika pengujian termografi aktif dilakukan di dalam ruangan, variasi pada suhu ruangan akan dominan terhadap pengaruh radiasi dari sumber panas sedangkan kenaikan suhu ruangan akan terus terjadi selama pengujian. Akibatnya ada kesulitan dalam menemukan lokasi nilai T_{refl} yang merupakan nilai sebagai faktor koreksi (Kartorono *et al.*, 2022).

Pada penelitian ini disajikan suatu metode untuk mencari posisi pemasangan termokopel di sekitar sumber panas, sehingga nilai suhu pada posisi tersebut digunakan sebagai nilai T_{refl} untuk memperbaiki *noise* pada termogram. Selain pengukuran dari metode termografi aktif yang telah dijelaskan di atas digunakan juga termokopel yang sudah ditanam di dalam sampel beton untuk mengukur suhu permukaan beton sebagai nilai banding dari hasil pengukuran menggunakan metode termografi aktif.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengujian Tak Merusak (*Non-Destructive Test*)

Pengujian tak merusak (*Non-destructive test*) adalah suatu pengujian yang dilakukan dengan tidak merusak material saat inspeksi terhadap suatu benda. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kerusakan dan tetap memelihara suatu material yang terdapat dalam benda tersebut (Irwansyah, 2019).

Contoh dari *non-destructive test* antara lain : pengujian emisi akustik (AE), pengujian emisi akustik (AE), radar penembus tanah (GPR), pengujian radiografi neutron (NR), pengujian radiografi (RT), pengujian termal/inframerah (IRT), pengujian ultrasonik (UT).

2.2. Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal dapat didefinisikan sebagai ukuran kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan panas. Konduktivitas termal adalah sifat material dan menunjukkan berapa banyak panas yang mengalir per satuan luas ketika gradien suhu adalah satu.

Bahan dengan konduktivitas termal tinggi disebut konduktor, sedangkan bahan dengan konduktivitas termal rendah disebut isolator. Konduktivitas termal bervariasi dengan suhu, tetapi untuk banyak masalah teknik, perubahannya cukup kecil untuk diabaikan. Nilai konduktivitas termal menunjukkan seberapa cepat panas mengalir dalam suatu bahan. Semakin cepat suatu molekul bergerak, semakin cepat ia mengangkut energi. Oleh karena itu, konduktivitas termal tergantung pada suhu. Saat mengukur konduktivitas termal, mekanisme transmisinya adalah konduksi (Rinaldi, 2016).

Tabel 1. Konduktivitas Termal pada Berbagai Bahan

<i>Material</i>	<i>Thermal conductivity, W/mK</i>
Copper	386
Aluminium	204,2
Carbon Steel 1% C	43,3
Chrome Steel 20% Cr	22,5
Chrome Nickel Steel	12,8
Concrete	1,13
Glass	0,67
Water	0,60
Asbestos	0,11
Air	0,026

(Sumber: Kothandaraman, 2006)

2.3. Termografi

Termografi inframerah (IRT) adalah ilmu yang didedikasikan untuk perolehan dan pemrosesan informasi termal dari perangkat pengukuran non-kontak. Ini didasarkan pada radiasi inframerah (di bawah merah), suatu bentuk radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang lebih panjang daripada cahaya tampak. Setiap objek di suhu di atas nol mutlak ($T > 0 \text{ K}$) memancarkan radiasi inframerah (Usamentiaga *et al.*, 2014).

2.3.1. Termografi Pasif

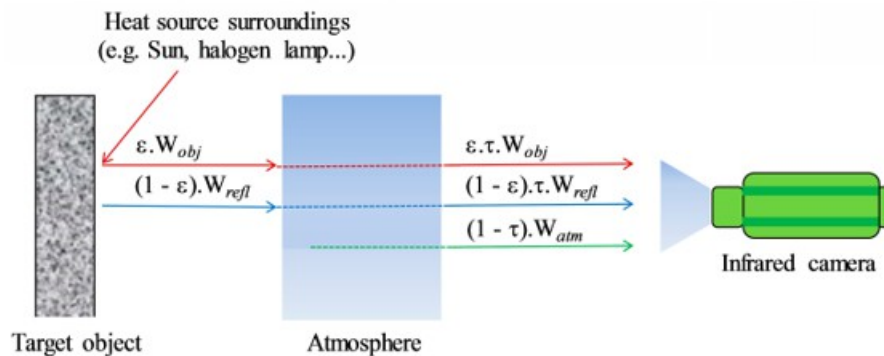
Termografi pasif tidak membutuhkan sumber energi radiasi eksternal dan tidak ada kontrol energi yang terjadi, seperti matahari, udara panas, penguapan kelembaban, dan pemuatan struktural. Kamera inframerah (IR) secara pasif merekam energi radiasi langsung dari objek. Contoh dari banyak penelitian yang dilakukan menggunakan termografi pasif untuk deteksi kerusakan selama pemuatan struktural kelelahan siklik (Zalameda & Winfree, 2018).

2.3.2. Termografi Aktif

Berbeda dengan termografi pasif pengujian termografi aktif memerlukan sumber energi eksternal untuk menginduksi perbedaan suhu antara area yang rusak dan tidak rusak pada spesimen yang diperiksa (Ibarra-Castanedo *et al.*, 2009). Termografi aktif juga mengacu pada kontrol energi, seperti waktu mulai, durasi, jumlah energi, dan frekuensi. Contoh sumber panas pada termografi aktif adalah *flash lamp*, *quartz lamp*, *eddy current*, *microwave*, dan *ultrasound* (Zalameda & Winfree, 2018).

Termografi sebagai teknik yang mengukur radiasi inframerah yang dipancarkan objek dan mengubah energi yang terdeteksi menjadi nilai suhu. Setiap piksel mewakili titik termal yang ditampilkan pada gambar atau termogram. Seperti yang terlihat pada ilustrasi

Gambar 1 hasil dari reamer inframerah akan mengandung radiasi dari sumber lain (Tran *et al.*, 2017).



Gambar 1. Prinsip kamera inframerah ketika menerima radiasi (Tran *et al.*, 2017).

Pada ilustrasi di atas dijelaskan kamera inframerah tidak akan langsung merekam suhu yang berada pada permukaan beton secara tepat karena adanya *noise* berupa *reflected temperature* (T_{refl}) adalah radiasi termal yang berasal dari objek lain yang memantulkan target yang diukur. Untuk mendapatkan nilai suhu permukaan yang akurat dengan pencitraan termal, nilai ini (bersama dengan emisivitas) harus dihitung dan diprogram ke dalam "Parameter Objek" kamera (atau perangkat lunak terkait jika memproses gambar yang disimpan). Ini digunakan agar perangkat lunak dapat mengompensasi, dan mengabaikan, efek radiasi ini karena tidak berhubungan dengan suhu permukaan sebenarnya dari objek yang diukur (Dravnsnik, 2019).

Untuk objek dengan emisivitas tinggi, *reflected temperature* memiliki pengaruh yang lebih kecil. Namun, untuk objek dengan emisivitas rendah, ini merupakan faktor penting yang harus dipahami dengan cermat. Saat emisivitas berkurang, apa yang diukur (dan lihat secara termal) lebih banyak berasal dari permukaan objek di sekitarnya (termasuk kamera dan operator), bukan target yang diperiksa (Dravnsnik, 2019).

Panas internal yang disebabkan oleh peralatan, manusia, dan pencahayaan. Sementara untuk panas internal diperoleh dari konduksi, konveksi, dan panas karena ventilasi. Selain itu suhu udara luar juga mempengaruhi proses perpindahan panas yang ada di dalam ruangan, melalui konduksi di dalam dinding. Besarnya perpindahan kalor akibat konveksi tergantung pada koefisien kalor (h_c). Dalam penelitiannya (Smith, 2010) menyebutkan bahwa nilai tergantung pada kecepatan angin (v) dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$h_c = 6.22 + 8.73v^{0.652} \quad (1)$$

Ketika di dalam ruangan angin dapat diabaikan sehingga , maka Berdasarkan rumus dasar perpindahan kalor, radiasi memiliki pengaruh terbesar. Hal ini akan terus terjadi sampai proses pemanasan selesai. Yang artinya penggunaan lampu halogen sebagai sumber panas akan memberikan pengaruh yang dominan terhadap proses perpindahan panas. *Reflected temperature* (T_{refl}) akan digunakan sebagai koreksi *noise*. Besarnya nilai radiasi yang diterima oleh sensor kamera inframerah akan dipengaruhi oleh faktor

transmisi (τ), Suhu (T_{atm}), dan emisivitas objek (ϵ_{obj}) (Kartorono *et al.*, 2022). Total energi radiasi (W_{tot}) yang diterima merupakan kombinasi antara radiasi objek dan lingkungan (atmosfer). Seperti yang terlihat dalam persamaan di bawah ini (Tran *et al.*, 2017).

$$W_{tot} = \epsilon_{obj} (\tau \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4) + (1 - \epsilon_{obj}) (\tau \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4) + (1 - \tau) (\sigma \cdot (T_{atm})^4) \quad (2)$$

Transmisi atmosfer diperkirakan menggunakan jarak dari objek ke kamera dan kelembapan relatif (Usamentiaga *et al.*, 2014). Transmisi atmosfer mendekati 1,0 ketika jarak survei kecil (misalnya, jarak umum untuk IRT aktif adalah sekitar 3 sampai 5 m). Maka suhu benda (T_{obj}) hanya membutuhkan pengukuran emisivitas dan *reflected temperature*. T_{refl} sama dengan suhu udara (T_{atm}) untuk objek dengan emisivitas tinggi dalam banyak kasus (Tran *et al.*, 2017). Berdasarkan (User's Manual FLIR Ex Series, 2012), T_{refl} sama dengan T_{amb} , jadi T_{refl} dapat dituliskan sebagai persamaan di bawah ini.

$$T_{refl} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - \epsilon_{obj} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4}{(1 - \epsilon_{obj}) \cdot \sigma}} \quad (3)$$

Dengan $W_{tot} = \epsilon_{obj} \cdot \sigma \cdot T_{tot}^4$ maka dituliskan.

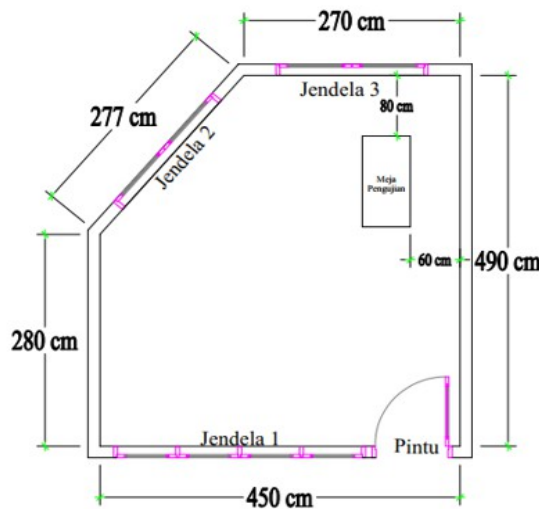
$$T_{refl} = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_{obj} \cdot (T_{tot})^4 - \epsilon_{obj} \cdot (T_{obj})^4}{(1 - \epsilon_{obj})}} \quad (4)$$

Lalu untuk mencari nilai T_{obj} dituliskan.

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_{obj} \cdot (T_{tot})^4 - (1 - \epsilon_{obj}) \cdot (T_{refl})^4}{\epsilon_{obj}}} \quad (5)$$

III. METODE PENELITIAN

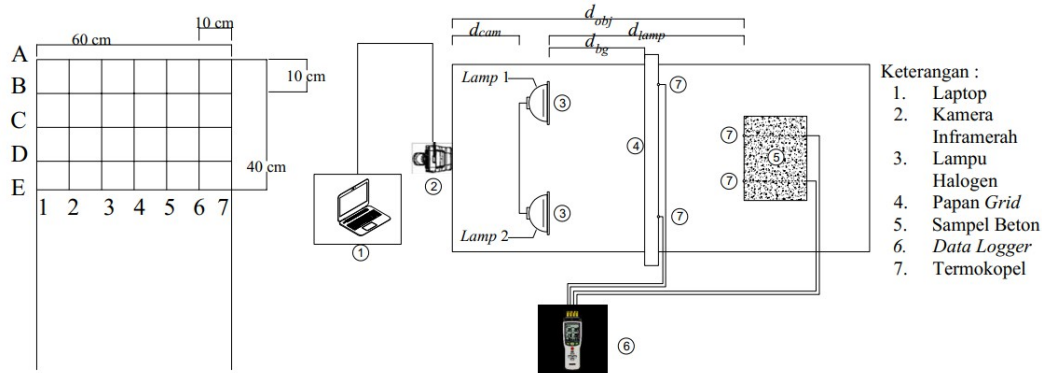
Lokasi penelitian di salah satu ruangan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah ruang penelitian.

3.1. Pengujian Termografi Aktif

Penelitian kali ini masih berdasarkan penelitian (Kartorono *et al.*, 2022), pada sampel benda uji akan dilakukan pengujian termografi aktif seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengujian termografi aktif.

3.1.1. Pengujian Distribusi Suhu Ruangan

Pengujian distribusi suhu ruangan dilakukan untuk mencari letak noise yang ada di antara beton dan lampu halogen menggunakan bantuan papan grid untuk memudahkan pemetaan data. Proses pertama dilakukan menggunakan data logger yang tersambung dengan termokopel pada papan grid yang berukuran 60 x 40 cm dan dilakukan pada 2 tahap yaitu pemanasan dan pendinginan masing-masing selama 1800 detik. Jarak lampu halogen dan beton sejauh 30 cm (d_{lamp}) dan keduanya diletakkan sejajar satu sama lain, dengan jarak lampu halogen dengan papan grid (d_{bg}) 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm dan 25 cm.

3.1.2. Pengujian Termografi Aktif

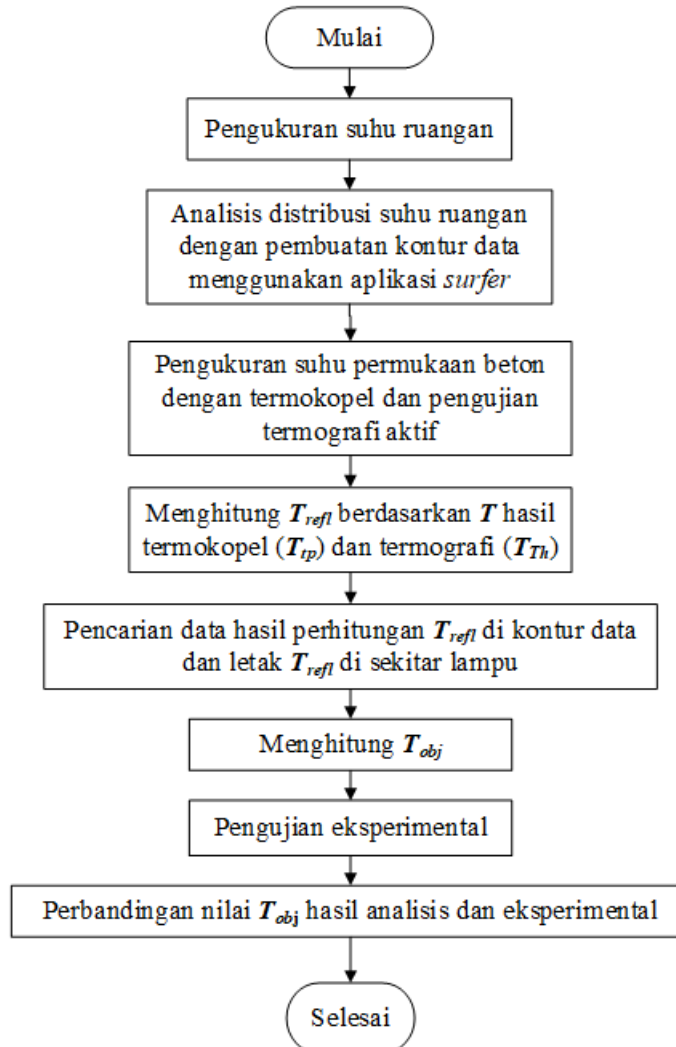
Setelah pengukuran suhu ruangan dilakukan, selanjutnya pengujian termografi aktif atau mengukur suhu permukaan beton menggunakan kamera inframerah dan juga mengukur menggunakan *data logger* untuk mengetahui suhu permukaan beton secara akurat. Sampel beton diletakkan pada jarak 1 m. Pengujian ini dilakukan dilakukan pada tahap pemanasan dan tahap pendinginan masing-masing selama 1800 detik. Pengukuran dilakukan di 2 (dua) termokopel yang dipasang pada permukaan beton.

3.1.3. Pengujian Eksperimental

Pelaksanaan pengujian eksperimental masih sama seperti pengujian termografi aktif, namun perbedaannya setelah lokasi dari T_{refl} ditentukan berdasarkan kontur distribusi suhu. Selanjutnya dilakukan pengujian eksperimental sebagai koreksi kebenaran dari data yang dianalisis, dengan termokopel diletakkan di papan *grid* sesuai hasil analisis perhitungan T_{refl} .

3.2. Analisis Hasil Penelitian

Ketika proses pengujian selesai selanjutnya kita akan melakukan analisis terhadap data yang sudah kita peroleh, diantaranya sebagai berikut :



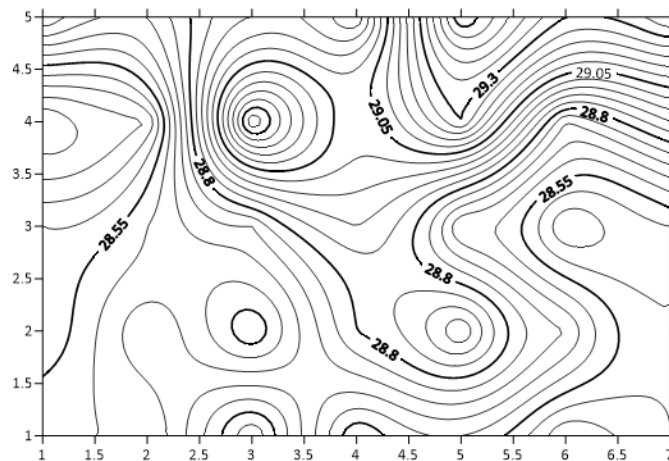
Gambar 4. Diagram alir analisis hasil penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Distribusi Suhu Ruangan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui distribusi suhu ruangan di antara lampu halogen dan beton ketika pengujian termografi aktif dilakukan. Pengujian ini dilakukan menggunakan *data logger* yang dihubungkan dengan termokopel pada papan *grid* dengan metode *grid* per 10 cm. Proses pengambilan data dilakukan dengan lampu halogen dihidupkan dengan papan *grid* berada di antara lampu halogen dan beton. Pada proses ini data akan direkam oleh *data logger* selama 1 jam dengan 30 menit fase pemanasan (ketika lampu halogen hidup) dan 30 menit fase pendinginan (ketika lampu halogen mati). Data yang dapat direkam *data logger* dalam 1 kali pengambilan data sebanyak 4 data, dengan 1 termokopel mengukur suhu ruangan sebagai acuan dan 3

termokopel mengukur titik pada papan *grid*. Pengambilan data dapat dimulai ketika data logger pada 4 termokopel memiliki nilai yang hampir sama yang menandakan kondisi suhu di sekitar papan *grid* dan suhu ruangan sebagai acuan sudah sama. ketika pengambilan data berlangsung tidak lupa untuk mencatat waktu perekaman data, agar memudahkan ketika data diolah. Setelah dilakukan pengolahan, selanjutnya data distribusi suhu ruangan akan diolah menjadi kontur dat melalui *software surfer 25* seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kontur suhu TG-5 0 menit.

4.2. Pengujian Termografi Aktif

Pengujian termografi aktif dilakukan dengan mengukur suhu permukaan beton yang seharusnya dilakukan dengan mengukur suhu pada 2 titik permukaan beton yang ditanami termokopel dengan menggunakan data logger dan kamera inframerah namun karena adanya kendala dimana salah satu termokopel pecah sehingga pengukuran hanya dilakukan pada satu titik pada sisi kanan beton, untuk kamera inframerah diletakkan pada jarak 1m dari beton seperti terlihat di Gambar 6.

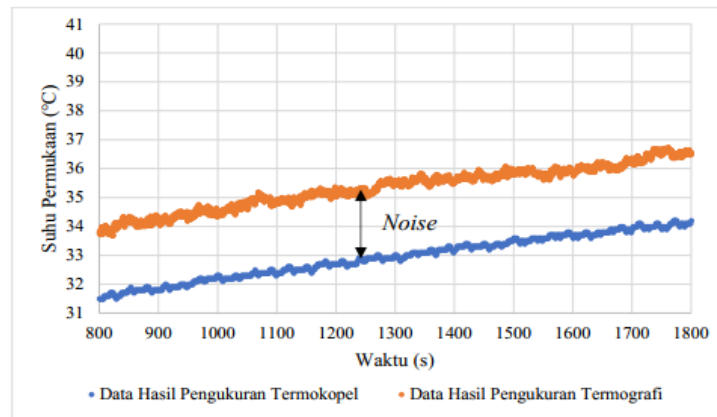


Gambar 6. Pengujian termografi aktif.

Menurut (Kartorono *et al.*, 2023) suhu permukaan beton akan berubah secara signifikan sampai (T_{heat}) = 800 detik, kemudian suhu permukaan beton akan bersifat linier sampai

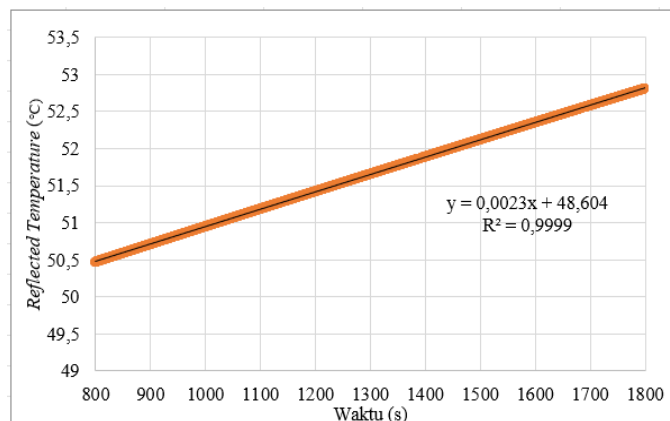
fase pemanasan selesai. Hal tersebut terjadi karena suhu maksimum lampu halogen dipertahankan pada 550°C saat menyala. Kondisi ini membuat suhu ruangan dan suhu permukaan beton stabil saat suhu lampu halogen mencapai puncaknya. Berdasarkan fenomena tersebut data yang akan dipakai untuk pencarian nilai T_{refl} ini adalah data hasil pada waktu pemanasan (T_{heat}) = 800-1800 detik.

Berdasarkan Gambar 7 data hasil termografi memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan data hasil pengukuran termokopel, dengan rata-rata selisih sebesar 2,399 °C. Hal tersebut terjadi karena adanya *noise* pada data hasil pengukuran termografi yang membuat data yang direkam memiliki nilai lebih besar. *Noise* tersebut adalah *reflected temperature* yang akan kita cari menggunakan Persamaan 4.



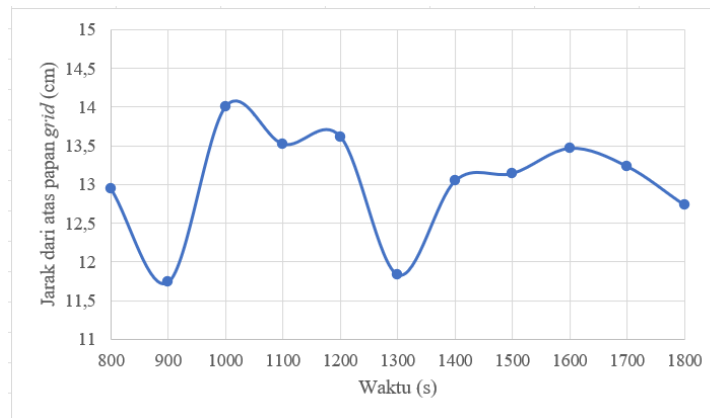
Gambar 7. Perbandingan data hasil pengukuran termokopel dan termografi aktif.

Berdasarkan Gambar 8 nilai *reflected temperature* yang didapatkan dari analisis perhitungan menggunakan Persamaan 4 semakin lama waktu pengujian nilai *reflected temperature* yang didapatkan semakin besar, lalu didapatkan *reflected temperature* rata-rata sebesar 51,649°C.



Gambar 8. Hasil analisis perhitungan *reflected temperature*.

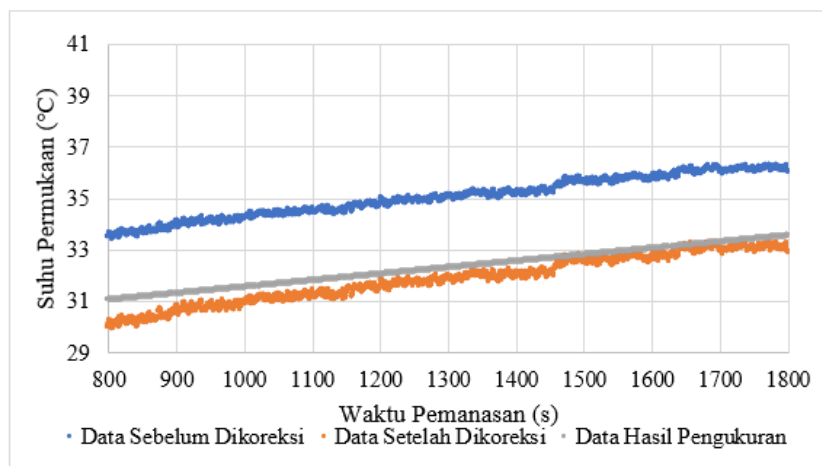
Berdasarkan Gambar 9 jarak *reflected temperature* dari atas papan *grid* yang didapatkan dari pencarian berdasarkan kontur suhu TG-5 jarak yang didapatkan naik turun tidak beraturan, jika diambil rata-rata jarak *reflected temperature* dari atas papan *grid* sebesar 13 cm.



Gambar 9. Jarak *reflected temperature* dari atas papan *grid* .

4.3. Pengujian Eksperimental

Pengujian eksperimental menggunakan papan *grid* untuk meletakkan termokopel sebagai nilai *reflected temperature* yang telah didapatkan dari analisis pada pengujian termografi aktif. Berdasarkan Gambar 10 suhu permukaan beton sebelum dikoreksi memiliki nilai yang lebih tinggi karena memiliki *noise* yang belum direduksi, namun setelah dilakukan analisis perhitungan menggunakan suhu mengalami penurunan dan mendekati suhu hasil pengukuran termokopel .

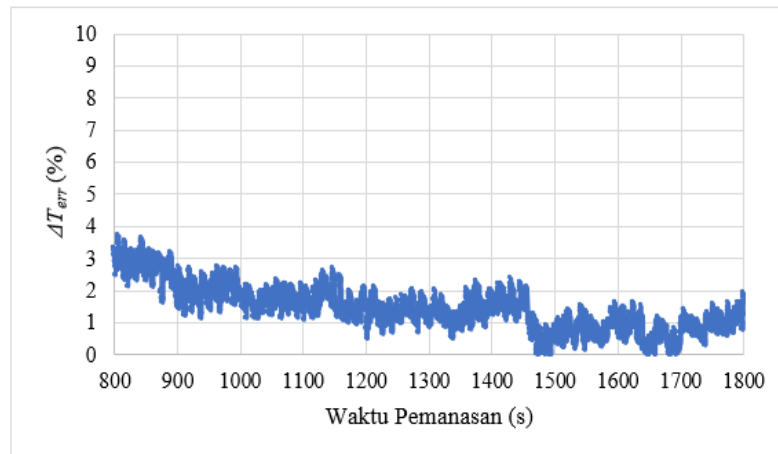


Gambar 10. Suhu permukaan beton sebelum dan sesudah dikoreksi.

Menurut (Kartorono *et al.*, 2023) dalam penelitian untuk melihat baik atau tidaknya analisis dilakukan perhitungan analisis kesalahan (ΔT_{err}) menggunakan Persamaan 6 sebagai berikut :

$$\Delta T_{err}(i) = \frac{(T_{obj}(i) - T_{tc}(i))}{(T_{tc}(i))} \times 100 \quad (6)$$

Berdasarkan Gambar 11 pada pengujian eksperimental didapatkan (ΔT_{err}) tertinggi 3,705%; terendah 0,002%; dan rata-rata 1,448%; Berdasarkan hasil analisis tersebut menunjukkan akurasi data kesalahan tergolong bagus karena nilai rata-rata perhitungan (ΔT_{err}) < 5%.



Gambar 11. Analisis kesalahan perhitungan (ΔT_{err}).

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan di atas, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengukuran termografi memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan Hasil pengukuran termokopel dengan selisih sebesar 2,399 °C .Hal tersebut membuktikan bahwasanya adanya *noise* pada pengujian termografi aktif yang membuat hasil pengukuran termografi aktif lebih besar.
2. *Reflected temperature* yang didapatkan dari analisis perhitungan sebesar 51,649°C terletak 13 cm dari atas papan *grid* sebesar dan 5 cm di depan lampu halogen.
3. (ΔT_{err}) tertinggi 3,705%; terendah 0,002%; dan rata-rata 1,448%. Berdasarkan hasil analisis perhitungan tersebut menunjukkan akurasi data kesalahan tergolong bagus karena nilai rata-rata perhitungan (ΔT_{err}) <5%.

DAFTAR PUSTAKA

- Dravnsnik, J. (2019). *Understanding emissivity and reflected temperature*. Diakses pada 21 Februari 2023, dari <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-emissivity-reflected-temperature-justin-dravnsnik/>
- FLIR Systems. (2012). *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals: The ultimate resource guide for using infrared in the research and Development Industry*.
- Ibarra-Castanedo, C., Piau, J. M., Guilbert, S., Avdelidis, N., Genest, M., Bendada, A., & Maldague, X. P. V. (2009). Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures. *Research in Nondestructive Evaluation*, 20(1), 1–31. <https://doi.org/10.1080/09349840802366617>
- Irwansyah, I. (2019). Deteksi cacat pada material dengan teknik pengujian tidak merusak. *Lensa*, 2(48), 7-13. <https://ijc.ilearning.co/index.php/LENSA/article/view/1278>

- Kartorono, S., Setio, H. D., Surahman, A., & Zulkifli, E. (2022). Determination of reflected temperature in active thermography measurements for corrosion quantification of reinforced concrete elements. *The Fourth International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment*, March 8-9, 2022, 1-8.
- Kartorono, S., Setio, H. D., Surahman, A., & Zulkifli, E. (2023). Determination of Reflected Temperature in Active Thermography Measurements for Corrosion Quantification of Reinforced Concrete Elements. *Structural Durability & Health Monitoring (SDHM)*, 17(3), 195-208. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2022.023259>
- Kothandaraman, C. P. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer (3rd ed)*. New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Smith, J. O. (2010). *Determination of the convective heat transfer coefficients from the surfaces of buildings within urban street canyons*. (Disertasi Doktorat, University of Bath).
- Tran, Q. H., Han, D., Kang, C., Haldar, A., & Huh, J. (2017). Effects of ambient temperature and relative humidity on subsurface defect detection in concrete structures by active thermal imaging. *Sensors*, 17(8), 1-18. <https://doi.org/10.3390/s17081718>
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305-12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>
- Zalameda, J., & Winfree, W. (2018). Detection and characterization of damage in quasi-static loaded composite structures using passive thermography. *Sensors*, 18(10), 1-18. <https://doi.org/10.3390/s18103562>