

**PENENTUAN LETAK PENGUKURAN *REFLECTED TEMPERATURE*
DENGAN MENGGUNAKAN TERMOKOPEL PADA PENGUJIAN
TERMOGRAFI AKTIF TERHADAP BETON BERTULANG**

Oleh

MUHAMMAD FAUZAN IKROMI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

ABSTRACT

DETERMINING THE LOCATION OF REFLECTED TEMPERATURE MEASUREMENTS USING THERMOCOUPLES IN ACTIVE THERMOGRAPHY TESTING OF REINFORCED CONCRETE

By

MUHAMMAD FAUZAN IKROMI

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 to finding the position of thermocouple installation around the heat source, so that the temperature values at that position are 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 thermocouples and infrared cameras as far as 1 meter, 2 meters, and 3 meters. The results showed the difference in measurement results using thermocouples and thermography of 2,3499 °C; 3,0246 °C; and 3,0946 °C, then the average T_{refl} value obtained from active thermography testing was 51,6496 °C; 57,9544 °C; and 59,7707 °C with the thermocouple located 5 cm in front of the halogen lamp and the average distance obtained by T_{refl} from the top of the grid board was 13 cm; 18 cm; and 19 cm. The average difference between the data before correction and the measurement data is 2,7385 °C; 3,3749 °C; and 3,4818 °C, respectively, then after the analysis of the calculation of the temperature difference with the measurement results has decreased, namely 0,4634°C; 1,4829°C; and 0,4666°C with the analysis of the error (ΔT_{err}) on average obtained 1,4479%; 4,3587%; 1,3187%. Based on the analysis results, the accuracy of the error data is good because the average value of error analysis (ΔT_{err}) <5%. This research cannot be done deterministically.

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

ABSTRACT

PENENTUAN LETAK PENGUKURAN REFLECTED TEMPERATURE DENGAN MENGGUNAKAN TERMOKOPEL PADA PENGUJIAN TERMOGRAFI AKTIF TERHADAP BETON BERTULANG

By

MUHAMMAD FAUZAN IKROMI

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, 2 meter, dan 3 meter. Hasil penelitian menunjukkan selisih hasil pengukuran menggunakan termokopel dan termografi sebesar 2,3499 °C; 3,0246 °C; dan 3,0946 °C, lalu rata-rata nilai T_{refl} yang didapatkan dari pengujian termografi aktif sebesar 51,6496°C; 57,9544°C; dan 59,7707°C dengan termokopel terletak 5 cm di depan lampu halogen dan jarak rata-rata yang didapatkan T_{refl} dari atas papan *grid* sebesar 13 cm; 18 cm; dan 19 cm. Selisih rata-rata antara data sebelum dikoreksi dan data hasil pengukuran berturut-turut sebesar 2,7385°C; 3,3749°C; dan 3,4818°C, lalu setelah dilakukan analisis perhitungan selisih suhu dengan hasil pengukuran mengalami penurunan yaitu berturut-turut sebesar 0,4634°C; 1,4829°C; dan 0,4666°C dengan analisis kesalahan (ΔT_{err}) rata-rata didapatkan 1,4479%; 4,3587%; 1,3187%. Berdasarkan hasil analisis tersebut menunjukkan akurasi data kesalahan tergolong bagus karena nilai rata-rata analisis kesalahan (ΔT_{err}) < 5%. Untuk penelitian ini tidak bisa dilakukan secara deterministik.

Keywords : *Reflected Temperature, Termografi aktif, Pengujian Non-destruktif*

**PENENTUAN LETAK PENGUKURAN *REFLECTED TEMPERATURE*
DENGAN MENGGUNAKAN TERMOKOPEL PADA PENGUJIAN
TERMOGRAFI AKTIF TERHADAP BETON BERTULANG**

Oleh

MUHAMMAD FAUZAN IKROMI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **PENENTUAN LETAK PENGUKURAN
REFLECTED TEMPERATURE DENGAN
MENGUNAKAN TERMOKOPEL PADA
PENGUJIAN TERMOGRAFI AKTIF
TERHADAP BETON BERTULANG**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Fauzan Ikromi**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915011070

Program Studi : S1 Teknik Sipil

Fakultas : Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.
NIP 19700430 199703 1 003

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19720829 199802 1 001

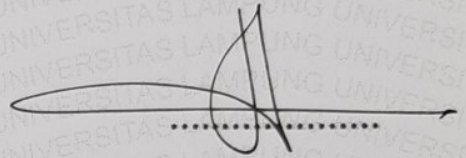
3. Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

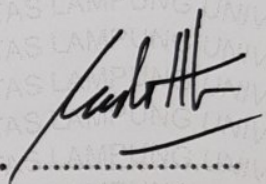
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

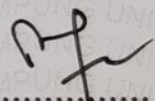
Ketua : **Suyadi, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. |
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **9 November 2023**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhammad Fauzan Ikromi

NPM : 1915011070

Prodi/Jurusan : S1/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi yang berjudul "*PENENTUAN LETAK PENGUKURAN REFLECTED TEMPERATURE DENGAN MENGGUNAKAN TERMOKOPEL PADA PENGUJIAN TERMOGRAFI AKTIF TERHADAP BETON BERTULANG*" tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Ide penelitian didapat dari Pembimbing I, oleh karena itu baik atas data penelitian berada pada Saya dan Pembimbing I, Bapak Suyadi, S.T., M.T.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Lampung, 9 November 2023



Muhammad Fauzan Ikromi

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Branti pada tanggal 15 Juni 2001, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Muslikh dan Ibu Sulikhatun. Penulis memiliki dua orang saudara yaitu dua kakak perempuan yang bernama Laili Mahmudah dan Najah Imtihani. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat dasar di SD N 2 Branti Raya pada tahun 2007-2013, lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMP N 4 Metro yang diselesaikan pada tahun 2016 dan dilanjutkan menempuh pendidikan tingkat atas di SMA N 1 Metro yang diselesaikan pada tahun 2019.

Pada tahun 2019 penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS UNILA) sebagai Anggota Penelitian dan Pengembangan Periode 2020-2021 dan Kepala Departemen Penelitian dan Pengembangan Periode 2021-2022. Penulis juga telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Tanjung Ratu, Kecamatan Katibung, Kabupaten Lampung Selatan selama 40 hari, Januari – Februari 2022. Di tahun yang sama, tepatnya di bulan Juli – Oktober penulis juga telah melakukan kerja praktik di Proyek Pembangunan Gedung Laboratorium Teknik 5.3 Institut Teknologi Sumatera selama 3 bulan.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi kampus dan menjadi diangkat menjadi Koordinator Acara pada acara *Civil Bring Evolution 7* yang merupakan acara berskala Nasional untuk organisasi HIMATEKS UNILA. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Penentuan Letak Pengukuran *Reflected Temperature* dengan Menggunakan Termokopel pada Pengujian Termografi Aktif Terhadap Beton Bertulang”.

Tugas akhir ini ku persembahkan teruntuk Bapak, Ibu,

Laili, Imti, keluarga, sahabat dan teman-teman.

Kalian semua adalah alasanku sesegera mungkin untuk menyelesaikan studi ini

&

Teman – teman SOLID 19!

KATA INSPIRASI

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Ketahuilah, setiap kalian adalah pemimpin, dan setiap dari kalian bertanggung jawab atas yang ia pimpin. Seorang lelaki adalah pemimpin bagi keluarganya, dan ia bertanggung jawab atas keluarganya”

(HR. Bukhari dan Muslim)

“Manusia adalah makhluk yang membuat kesalahan”

(Kirigaya Kazuto)

“Terkadang kau akan melihat sesuatu saat memejamkan mata”

(Arthut Boyle)

“Teman adalah orang yang menyelamatkan kita dari neraka yang bernama kesepian”

(Uzumaki Naruto)

“Tetaplah bermimpi sampai tidak ada hal lagi yang perlu dimimpikan”

(Penulis)

LEMBAR PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

Allah SWT yang telah memberikan kekuatan serta kemampuan kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini. Karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya skripsi ini dapat selesai.

Ayah dan Bunda yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan, semangat, dan motivasi.

Kedua adikku, Bani dan Fikri beserta Nenek yang juga selalu memberikan dukungan dalam hal apapun.

Teman-teman terdekat yang sudah banyak membantu selama proses skripsi, kebersamaan, mendengarkan keluh kesah, menyemangati, memberikan nasihat dan masukan selama ini.

Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat menginspirasi untuk ilmu yang diberikan dan turut andil dalam menyelesaikan skripsi ini.

Almamaterku Universitas Lampung

PRAKATA

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“PENENTUAN LETAK PENGUKURAN *REFLECTED TEMPERATURE* DENGAN MENGGUNAKAN TERMOKOPEL PADA PENGUJIAN TERMOGRAFI AKTIF TERHADAP BETON BERTULANG”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata 1 di Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya,serta senantiasa memudahkan dalam segala urusan hamba-Nya.
2. Bapak Dr. Eng. Helmi Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Prodi S1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
5. Bapak Suyadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan skripsi.
6. Bapak Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam pengerjaan skripsi.

7. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan saran terkait isi skripsi.
8. Seluruh Civitas Akademik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
9. Keluarga tercinta terutama kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan moral dan materil kepada penulis.
10. Rafif, Naufal, Alief, Alvany, Vernady, Marsyalino, Amir, Munif, Rizka, Andi, Hijrah, Ulwan, Daffa, dan Fajar senantiasa menjadi tempat berkeluh kesah terbaik dan selalu mendukung dalam menjalani proses perkuliahan.
11. Teman-teman slyhterin yang selalu membantu ketika kelas perkuliahan sejak awal perkuliahan sampai selesai ini.
12. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2019 (SOLID 19) yang telah berjuang bersama, berbagi kenangan dan pengalaman yang tak terlupakan.
13. Terakhir, terimakasih untuk diri sendiri karena telah mampu berusaha dan berjuang sejauh ini. Mampu mengendalikan diri dari berbagai tekanan diluar keadaan dan tidak pernah memutuskan menyerah sesulit apapun proses penyusunan tugas akhir ini dengan menyelesaikan sebaik dan semaksimal mungkin.

Penulis menyadari akan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki penulis sehingga masih terdapat kekurangan dalam penulisan Skripsi ini. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak yang berkepentingan. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat untuk pihak yang memerlukan.

Bandar Lampung,

2023

Muhammad Fauzan Ikromi

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kerusakan Pada Beton	5
2.2 Pengujian Tak Merusak (<i>Non-Destructive Test</i>).....	6
2.3 <i>Thermal Transfer</i>	6
2.3.1 Radiasi	8
2.3.2 Konveksi.....	8
2.3.3 Konduksi.....	8
2.4 Termografi.....	9
2.4.1 Termografi Pasif.....	9
2.4.2 Termografi Aktif	9
2.5 Instrumen yang Digunakan	13
2.5.1 Lampu Halogen	13
2.5.2 Kamera Inframerah.....	14
2.5.3 <i>Data Logger</i>	14
2.5.4 Termokopel.....	14
III. METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Lokasi Penelitian	15
3.2 Persiapan Alat dan Bahan	16
3.2.1 Alat	16
3.2.2 Bahan.....	18
3.3 Prosedur Pelaksanaan	18
3.3.1 Pemeriksaan Material	18

3.3.2	Perencanaan Campuran (<i>Mix Design</i>)	19
3.3.3	Pembuatan Sampel Benda Uji	19
3.3.4	Pengujian Termografi Aktif	20
3.3.5	Analisis Hasil Penelitian.....	23
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	24
4.1	Umum.....	24
4.2	Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisik Material	24
4.3	Kebutuhan Material Campuran Beton.....	25
4.4	Pembuatan Benda Uji.....	25
4.5	Pengujian Distribusi Suhu Ruangan.....	26
4.5.1	Pengambilan Data Distribusi Suhu Ruangan	26
4.5.2	Pengolahan Data Mentah Distribusi Suhu Ruangan	28
4.6	Pembuatan Kontur Distribusi Suhu Ruangan.....	30
4.7	Analisis Kontur Distribusi Suhu Ruangan	39
4.8	Pengujian Termografi Aktif	40
4.8.1	Pengambilan Data Suhu Permukaan Beton	41
4.8.2	Pencarian Nilai dan Letak T_{refl}	43
4.9	Pengujian Eksperimental	48
4.9.1	Pengambilan Data Pengujian Eksperimental.....	48
4.9.2	Suhu Permukaan Beton Sebelum dan Sesudah Dikoreksi (Analisis Dilakukan Tanpa Segmentasi).....	50
4.9.3	Suhu Permukaan Beton Sebelum dan Setelah Dikoreksi (Analisis Dilakukan Segmentasi).....	54
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1	Kesimpulan.....	58
5.2	Saran.....	59
	DAFTAR PUSTAKA	60
	LAMPIRAN.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Konduktivitas termal pada berbagai bahan.....	7
2. Karakteristik lampu halogen	13
3. Spesifikasi laptop	16
4. Spesifikasi kamera FLIR E8-Xt.....	16
5. Spesifikasi <i>data logger</i>	17
6. Kode pengujian distribusi suhu ruangan dengan	21
7. Kode pengujian sampel dengan parameter jarak objek	22
8. Hasil pengujian sifat-sifat fisik material	24
9. Kebutuhan material per 1 m ³ beton	25

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Proses terjadinya radiasi, konveksi, dan konduksi.....	7
2. Contoh pengujian termografi aktif menggunakan lampu halogen sebagai sumber panas.	10
3. Prinsip kamera inframerah ketika menerima radiasi.....	10
4. Instrumen yang digunakan (a) lampu halogen (b) kamera inframerah (c) <i>data logger</i> (d) termokopel	13
5. Denah ruang penelitian.	15
6. Papan <i>grid</i> ukuran 50cm x 70cm.	17
7. Letak termokopel pada sampel beton.....	19
8. Pengujian distribusi suhu ruangan dengan metode <i>grid</i>	20
9. Pengujian termografi aktif.	21
10. Pengujian ekseperimental.	22
11. Diagram alir analisis hasil penelitian.	23
12. Pemasangan termokopel pada beton bertulang (a) sebelum dicor beton (b) setelah dicor beton.....	26
13. Proses pengambilan data distribusi suhu ruangan (a) tampak belakang (b) tampak samping.....	26
14. Data suhu ruangan di <i>grid</i> C5 TG-5.	27
15. Proses seleksi data awal.	29
16. Proses pengolahan data.	29
17. Kontur suhu TG-5 (a) 0 menit (b) 10 menit.....	30
18. Kontur suhu TG-5 (a) 20 menit (b) 30 menit.....	31
19. Kontur suhu TG-5 (a) 40 menit (b) 50 menit (c) 60 menit.	31
20. Kontur suhu TG-10 (a) 0 menit (b) 10 menit.....	33
21. Kontur suhu TG-10 (a) 20 menit (b) 30 menit.....	33

22. Kontur suhu TG-10 (a) 40 menit (b) 50 menit (c) 60 menit.	34
23. Kontur suhu TG-15 (a) 0 menit (b) 10 menit.	34
24. Kontur suhu TG-15 (a) 20 menit (b) 30 menit.	35
25. Kontur suhu TG-15 (a) 40 menit (b) 50 menit (c) 60 menit.	36
26. Kontur suhu TG-20 (a) 0 menit (b) 10 menit.	36
27. Kontur suhu TG-20 (a) 20 menit (b) 30 menit.	37
28. Kontur suhu TG-20 (a) 40 menit (b) 50 menit (c) 60 menit.	37
29. Kontur suhu TG-25 (a) 0 menit (b) 10 menit.	38
30. Kontur suhu TG-25 (a) 20 menit (b) 30 menit.	38
31. Kontur suhu TG-25 (a) 40 menit (b) 50 menit (c) 60 menit.	39
32. Perpindahan panas dari radiasi matahari ke dinding.	40
33. Proses pengambilan data suhu permukaan beton.	41
34. Proses perekaman data pada <i>software FLIR tools+</i>	42
35. Hasil pengukuran suhu permukaan beton menggunakan termokopel.	42
36. Hasil pengukuran suhu permukaan beton menggunakan termografi aktif.	43
37. Hasil pengukuran suhu permukaan beton menggunakan termokopel pada fase pemanasan.	44
38. Hasil pengukuran suhu permukaan beton menggunakan termografi aktif pada fase pemanasan.	44
39. Perbandingan data hasil pengukuran termokopel dan termografi aktif (a) 1 meter (b) 2 meter (c) 3 meter.	46
40. Hasil analisis perhitungan <i>reflected temperature</i>	46
41. Letak <i>reflected temperature</i> pada detik ke-800.	47
42. Jarak <i>reflected temperature</i> dari atas papan <i>grid</i> selama fase pemanasan.	47
43. Proses pengambilan data pengujian eksperimental.	49
44. Data hasil pengukuran <i>reflected temperature</i> (a) 1 meter (b) 2 meter (c) 3 meter.	50
45. Suhu permukaan beton sebelum dan sesudah dikoreksi tanpa segmentasi (a) 1 meter (b) 2 meter (c) 3 meter.	51
46. Analisis kesalahan perhitungan (ΔT_{err}) tanpa segmentasi (a) 1 meter (b) 2 meter (c) 3 meter.	53

47. Suhu permukaan beton sebelum dan sesudah dikoreksi dengan segmentasi
(a) 1 meter (b) 2 meter (c) 3 meter..... 55
48. Analisis kesalahan perhitungan (ΔT_{err}) dengan segmentasi (a) 1 meter
(b) 2 meter (c) 3 meter. 56

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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 bekerja dengan cara menangkap radiasi termal (inframerah) yang dipancarkan benda (Ari satmoko, 2008) Menurut (Ari Satmoko dan Abdul Hapid, 2007), sebuah benda yang bertemperatur di atas 0 K dapat memancarkan sinar inframerah. Besarnya Intensitas radiasi yang dipancarkan benda akan semakin besar jika suhu benda semakin tinggi. Pengujian ini dilakukan dengan bantuan lampu halogen untuk memancarkan intensitas radiasi. 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 di sini 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.

Penelitian di sini akan membahas penentuan letak pengukuran *reflected temperature* dengan menggunakan termokopel pada pengujian termografi aktif terhadap beton bertulang.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa besar perbedaan suhu permukaan beton hasil uji termografi dengan data ukur termokopel?
2. Berapa nilai T_{refl} yang digunakan sehingga nilai yang dihasilkan dari data ukur termokopel sama dengan hasil analisis perhitungan?
3. Di mana letak efektif pemasangan termokopel terhadap lampu halogen untuk mencari nilai T_{refl} ?
4. Bagaimana perbandingan nilai suhu permukaan beton sebelum dan sesudah dilakukan koreksi?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk menganalisis besar perbedaan suhu permukaan beton hasil uji termografi dengan data ukur termokopel.
2. Untuk menganalisis nilai T_{refl} yang digunakan sehingga nilai yang dihasilkan dari data ukur termokopel sama dengan hasil analisis perhitungan.
3. Untuk menganalisis letak efektif pemasangan termokopel terhadap lampu halogen untuk mencari nilai T_{refl} .
4. Untuk menganalisis perbandingan nilai suhu permukaan beton sebelum dan sesudah dikoreksi.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diperlukan batasan masalah agar penelitian yang dilakukan tidak meluas dan terarah dan menjadi jelas batasannya. Diantaranya sebagai berikut :

1. Sampel beton yang digunakan berukuran 10 cm x 10 cm x 15 cm dengan mutu 20 MPa sesuai dengan penelitian (Kartorono et al., 2022).
2. Lampu halogen digunakan sebagai perantara panas sebanyak 2 buah dengan masing-masing 500 watt.
3. Pengukuran dilakukan selama 3600 detik dengan tahap pemanasan dan pendinginan masing-masing selama 1800 detik untuk sekali pengukuran.
4. Variasi jarak beton ke kamera sejauh 1 meter, 2 meter, dan 3 meter dengan jarak lampu ke beton sebesar 30 cm.
5. *Noise* yang ditinjau berada di antara lampu halogen dan permukaan beton.
6. Termokopel pada beton digunakan untuk mengukur suhu permukaan beton.
7. Suhu ruangan tidak bisa dikontrol maka dari itu dilakukan kontrol suhu.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Diharapkan mampu memberikan kontribusi keilmuan bagi disiplin keilmuan di bidang teknik sipil khususnya tentang pengujian *non*-destruktif dengan metode termografi aktif.
2. Diharapkan menjadi referensi untuk penelitian termografi aktif selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dalam penulisan pada penelitian ini terdiri dari sebagai berikut:

- BAB I : PENDAHULUAN
Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
- BAB II : TINJAUAN PUSTAKA
Bab ini berisi tentang landasan teori fundamental sebagai penunjang penelitian yang akan dilakukan.
- BAB III : METODOLOGI PENELITIAN
Bab ini berisi uraian mengenai gambaran umum dan metode yang akan digunakan untuk memperoleh data – data yang dibutuhkan.
- BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN
Bab ini membahas tentang hasil pengumpulan data, pengolahan data, analisis serta pembahasan data berdasarkan teori yang ada.
- BAB V : PENUTUP
Bab ini berisi kesimpulan akhir yang merupakan hasil dari pembahasan yang didapat dari pengolahan data dan saran dari hasil tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kerusakan Pada Beton

Kerusakan beton terjadi pada struktur beton seperti kolom, balok, pelat dan dinding beton. Efek dari kerusakan ini dapat menyebabkan kerusakan struktural. penyebab kerusakan beton yaitu ketinggian jatuh pengecoran, kesalahan pada pelepasan bekisting, kesalahan pembesian, kesalahan penggunaan *vibrator*, *curing*, dilatasi pengecoran, kegagalan desain, dan beban tambahan(Saputra et al., 2014). Kerusakan yang terjadi pada beton umumnya dapat dikelompokkan dalam:

1. Retak (*Cracks*) adalah pecah pada beton dalam garis-garis yang relatif panjang dan sempit dan ditimbulkan oleh berbagai hal.
2. *Voids*/Segregasi adalah lubang-lubang yang relatif dalam dan lebar pada beton.
3. *Scaling/spalling* adalah pengelupasan dangkal pada permukaan,
4. *Deflection*/Defleksi terjadi pada peletakan, fondasi, kolom, *slab* dan dinding yang terlihat sebagai lengkungan, defleksi atau deformasi.
5. Noda yang timbul pada permukaan beton menandakan adanya masalah seperti korosi atau reaksi kimia.
6. Erosi Perubahan suhu pada permukaan beton akibat cuaca atau aksi mekanis dapat menyebabkan hilangnya lapisan permukaan beton akibat kembang susut berulang kali.
7. Korosi pada tulangan disebabkan karena tulangan yang terekspos karena *spalling*, erosi, atau retak. Oksidasi baja karena oleh kelembapan. Lingkungan yang agresif seperti air laut memperburuk kerusakan akibat korosi. Hilangnya lekat antara baja dan beton akibat korosi menyebabkan turunnya kekuatan beton.

2.2 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).

2.3 *Thermal Transfer*

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).

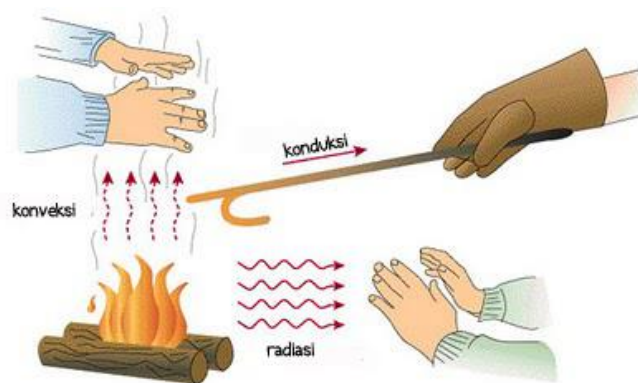
$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{E}{A \cdot t} \quad (1)$$

Tabel 1. Konduktivitas termal pada berbagai bahan

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

(Sumber : Kothandaraman, 2006)

Perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu dapat dibedakan melalui 3 cara, yaitu: radiasi, konveksi, dan konduksi seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses terjadinya radiasi, konveksi, dan konduksi.
(Sumber : <https://eandroidfisika.wordpress.com>)

2.3.1 Radiasi

Radiasi merupakan proses perpindahan kalor dari suatu benda berdasarkan suhunya, tanpa bantuan media apa pun secara langsung di dalam medium terpisah atau medium tembus cahaya, energi kalor akan berpindah dalam bentuk gelombang elektromagnetik (Kothandaraman, 2006).

$$\frac{Q}{t} = e\sigma AT^4 \quad (2)$$

2.3.2 Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas antara permukaan dan fluida yang mengalir dalam kontak dengannya. Pergerakan fluida terjadi karena perbedaan densitas. Jika fluida disebabkan oleh perangkat eksternal seperti pompa atau peniup, ini disebut konveksi paksa. Jika fluida disebabkan oleh gaya apung yang dihasilkan oleh pemanasan atau pendinginan fluida, prosesnya disebut konveksi alami atau bebas (Kothandaraman, 2006).

$$H = \frac{Q}{t} = h \cdot A \cdot \Delta T^4 \quad (3)$$

2.3.3 Konduksi

Konduksi adalah mode transfer panas karena perbedaan suhu dalam padatan atau fase material apa pun di mana massa bersebelahan dan dalam kontak termal. Secara mikroskopis mode transfer energi ini dikaitkan dengan aliran elektron bebas dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah, Transfer ini tidak diikuti oleh transfer antar partikel (tidak ada gerakan massa makroskopis) (Kothandaraman, 2006).

$$H = \frac{Q}{t} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \quad (4)$$

2.4 Termografi

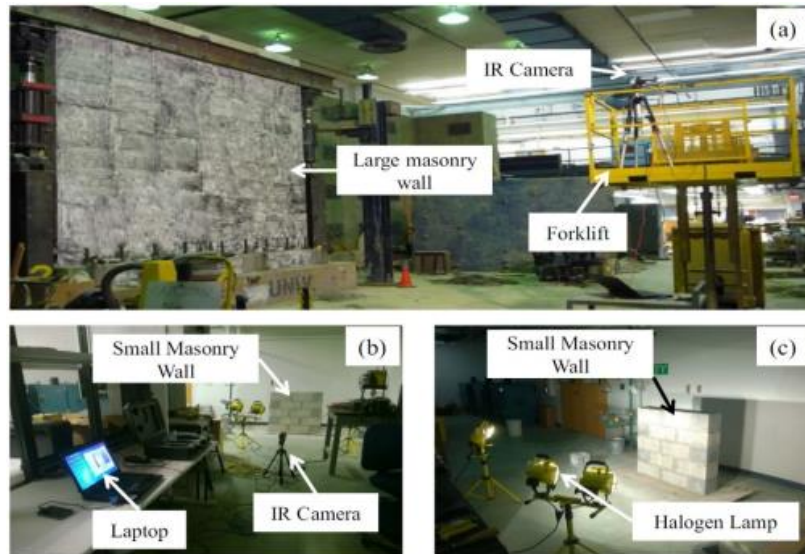
Infrared Thermography adalah suatu sistem pemeriksaan NDT (*Non Destructive Test*) dengan menggunakan Kamera Inframerah untuk memeriksa peralatan listrik (*Electrical*), dan mekanik (*Mechanical*) pada pabrik-pabrik, industri pertambangan, gedung bertingkat, supermall, rumah sakit, bandara, pelabuhan, dan fasilitas umum lainnya (Kusmantoro & Sukamta, 2013). *Infrared Thermography* bekerja dengan cara menangkap radiasi termal (inframerah) yang dipancarkan benda (Ari satmoko, 2008). Menurut (Ari Satmoko dan Abdul Hapid, 2007), sebuah benda yang bertemperatur di atas 0 K dapat memancarkan sinar inframerah. Besarnya Intensitas radiasi yang dipancarkan benda akan semakin besar jika suhu benda semakin tinggi.

2.4.1 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).

2.4.2 Termografi Aktif

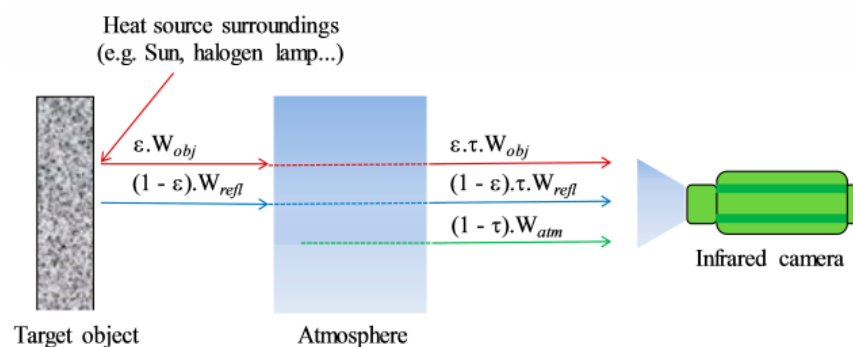
Berbeda dengan termografi pasif pengujian termografi aktif memerlukan sumber energi eksternal untuk menginduksi perbedaan suhu antara area yang rusak dan tidak rusak pada spesimen yang diperiksa (Ibarra-Castanedo et al., 2009). Termografi aktif juga mengacu pada kontrol energi, seperti waktu mulai, durasi, jumlah energi, dan frekuensi. Contoh sumber panas pada termografi aktif adalah *flash lamp*, *quartz lamp*, *eddy current*, *microwave*, dan *ultrasound* (Zalameda & Winfree, 2018). Contoh dari pengujian termografi aktif dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Contoh pengujian termografi aktif menggunakan lampu halogen sebagai sumber panas.

(Sumber : Khan et al., 2015)

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 3 hasil dari kamera inframerah akan mengandung radiasi dari sumber lain (Tran et al., 2017).



Gambar 3. Prinsip kamera inframerah ketika menerima radiasi.

(Sumber : 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 h_c tergantung pada kecepatan angin (v) dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$h_c = 6.22 + 8.73v^{0.652} \quad (5)$$

Ketika di dalam ruangan angin dapat diabaikan sehingga $v = 0$, maka $h_c = 6,22 (W/m^2K)$. 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 6 (Tran et al., 2017).

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 + (1 - \tau) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 \quad (6)$$

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.

$$T_{refl} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - \varepsilon_{obj} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4}{(1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \sigma}} \quad (7)$$

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

$$T_{refl} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{obj} \cdot (T_{tot})^4 - \varepsilon_{obj} \cdot (T_{obj})^4}{(1 - \varepsilon_{obj})}} \quad (8)$$

Lalu untuk mencari nilai T_{obj} dituliskan

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{obj} \cdot (T_{tot})^4 - (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot (T_{refl})^4}{\varepsilon_{obj}}} \quad (9)$$

Keterangan

T_{refl} : *Reflected temperature* (°C)

W_{tot} : Total energi radiasi (J)

ε_{obj} : Emisivitas objek

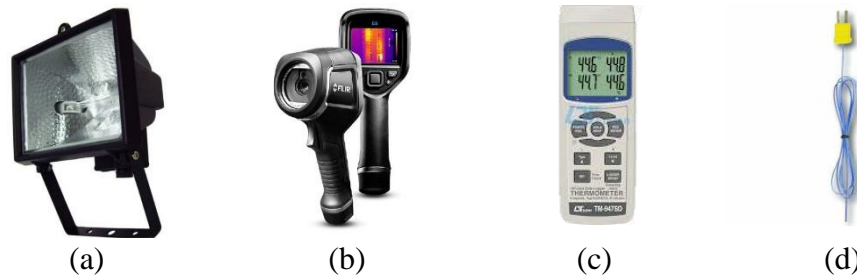
σ : Konstanta stefan-boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T_{obj} : Suhu permukaan objek (°C)

T_{tot} : Suhu total (°C)

2.5 Instrumen yang Digunakan

Pada penelitian termografi aktif terdapat beberapa instrumen yang akan seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Instrumen yang digunakan (a) lampu halogen (b) kamera inframerah (c) data logger (d) termokopel.

(Sumber :a. <https://www.s-gala.com>, b. <https://www.flir.asia.com>, c. <https://www.lutroninstruments.eu>, d. <https://www.adminstrumentengineering.com.au>)

2.5.1 Lampu Halogen

Cahaya lampu halogen berasal dari gulungan filamen yang terbuat dari tungsten. Dan bola lampu mengandung gas *inert*. Yodium dan brom digunakan sebagai gas halogen. Berbeda dengan lampu pijar, lampu halogen cenderung bekerja pada suhu tinggi dan membentuk bola lampu yang lebih kecil. Intensitas cahaya yang dihasilkan lebih besar, secara signifikan meningkatkan efisiensi konsumsi listrik. Pada penelitian ini akan digunakan lampu halogen 500 watt penggunaan lampu halogen 500 watt sendiri lebih baik daripada lampu halogen 1000 watt karena dinilai tidak berlebihan dan memiliki biaya yang lebih rendah.

Tabel 2. Karakteristik lampu halogen

Jenis lampu	Halogen 500 watt	Halogen 1000 watt
Konsumsi daya	Sedang	Tinggi
Kekuatan radiasi	Tinggi	Terlalu tinggi
Disipasi panas	Sedang	Terlalu tinggi
Biaya satuan	Rendah	Sedang

(Sumber : Moria, 2017)

Moria dalam penelitiannya menjelaskan penggunaan lampu halogen 500 W diperoleh radiasi berkisar antara 400W/m^2 hingga 1100W/m^2 dengan radiasi optimum pada jarak 10 cm.

2.5.2 Kamera Inframerah

Teknologi termografi merupakan salah satu peralatan teknologi *non destructive testing non-contact* atau *NDT of materials evaluation*. Seperti halnya termometer, Kamera inframerah berfungsi untuk mengukur suhu suatu benda (peralatan listrik) tanpa menyentuh benda tersebut. Hal tersebut dapat terjadi karena alat tersebut memancarkan sinar inframerah kemudian menangkap kembali radiasi dari objek yang diukur.

2.5.3 Data Logger

Data logger adalah sebuah alat elektronik yang mencatat data dari waktu ke waktu baik yang terintegrasi dengan sensor dan instrumen. Atau secara singkat *data logger* adalah alat untuk melakukan *data logging*. Secara fisik *data logger* berukuran kecil. Perangkat dilengkapi dengan mikroprosesor dan memori internal yang digunakan untuk mencatat dan merekam data dan sensor.

2.5.4 Termokopel

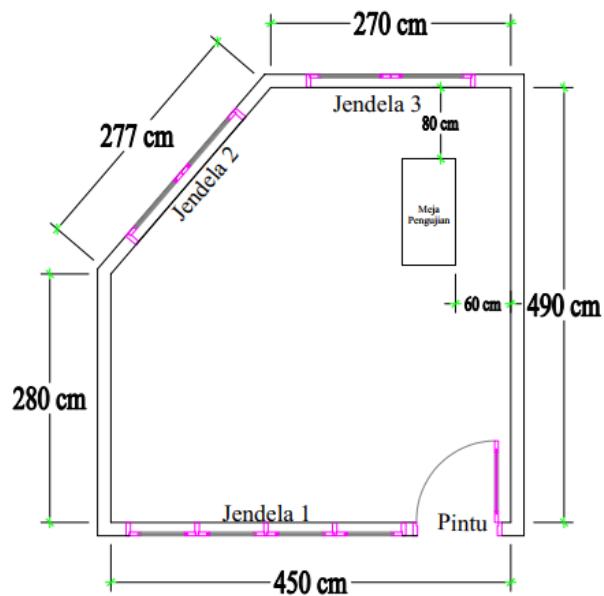
Termokopel (*Thermocouple*) adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur suhu melalui dua jenis logam konduktor berbeda yang digabung pada ujungnya sehingga menimbulkan efek "*thermo-electric*".

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental yang dilakukan untuk mendapatkan data-data hasil penelitian pada pemanasan permukaan beton dengan bantuan kamera inframerah, termokopel, *data logger*. Pada penelitian ini digunakan variasi jarak kamera terhadap sampel beton sejauh 1 meter, 2 meter, dan 3 meter. Setelah data didapatkan selanjutnya data akan dianalisis dan dibandingkan dengan data dari pengujian eksperimental.

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan eksperimen penentuan letak pengukuran *reflected temperature* dengan menggunakan termokopel pada pengujian termografi aktif terhadap beton bertulang dilaksanakan di salah satu ruangan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Denah ruang penelitian.

3.2 Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum memulai penelitian sebaiknya kita mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan. Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini :

3.2.1 Alat

1) Laptop

Laptop digunakan untuk menginstal *software* yang diperlukan untuk menganalisis data yang sudah diperoleh dalam penelitian sehingga didapat informasi yang dibutuhkan. Laptop yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut

Tabel 3. Spesifikasi laptop

<i>Operating system</i>	Windows 11 Home Single Language
<i>Processor</i>	Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz

2) Kamera termal/Kamera inframerah

Kamera inframerah yang digunakan adalah FLIR E8-XT dengan resolusi 240x360 piksel. Akuisisi termal menggunakan metode *sequence recording* pada kecepatan 15 *fps* dengan spesifikasi lengkap sebagai berikut :

Tabel 4. Spesifikasi kamera FLIR E8-Xt

<i>Temperature range</i>	-4 to 1022°F (-20 to 550°C)
<i>Accuracy</i>	±3,6°F(2°C)
<i>Thermal sensitivity/NETD</i>	<0,09°F(0,05°C)
<i>Spatial resolution (IFOV)</i>	2,6 mrad
<i>Field of fiew (FOV)</i>	45° x 34°

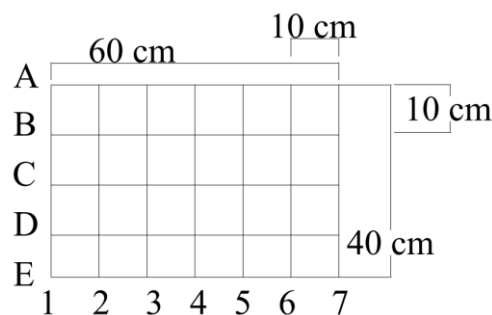
(Sumber : <https://www.flir.asia.com>)

3) Lampu halogen

Lampu halogen digunakan sebanyak 2 buah dengan masing-masing daya 500 watt.

4) Papan *grid*

Papan *grid* digunakan untuk mengukur suhu ruangan dibuat dari besi siku lubang dengan ukuran 50 cm x 70 cm dengan *grid* berukuran 10 cm x 10 cm, *grid*-nya sendiri dibuat dari benang *nylon* untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Papan *grid* ukuran 50cm x 70cm.

5) Data logger

Data logger yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 5. Spesifikasi *data logger*

Sensor type	Type K thermocouple probe Type J/T/E/R/S thermocouple probe
Resolution	0,1°C/1°C 0,1°F/1°F
Data logger sampling time	Auto 1 detik-3600 detik
Operating temperature	0 sampai 50°C
Operating humidity	Kurang dari 85%

(Sumber : <https://www.lutroninstruments.eu>)

6) Termokopel

Termokopel yang digunakan adalah termokopel lutron TP-01 *type K* termokopel *probe*, dengan spesifikasi maksimum suhu pengujian 300°C / 572°F dengan akurasi $\pm 0,4\%$.

- 7) Timbangan
- 8) Pan alumunium
- 9) *Pycnometer*
- 10) Saringan
- 11) Oven
- 12) *Concrete mixer*
- 13) Cetakan benda uji

3.2.2 Bahan

- 1) Air
- 2) Semen portland
- 3) Agregat kasar
- 4) gregat halus
- 5) Baja tulangan

3.3 Prosedur Pelaksanaan

Pada tahap ini dibagi dalam beberapa bagian, yaitu pemeriksaan material, perencanaan *Trial Mix* dan *Mix Design*, pembuatan sampel benda uji, pengujian termografi aktif.

3.3.1 Pemeriksaan Material

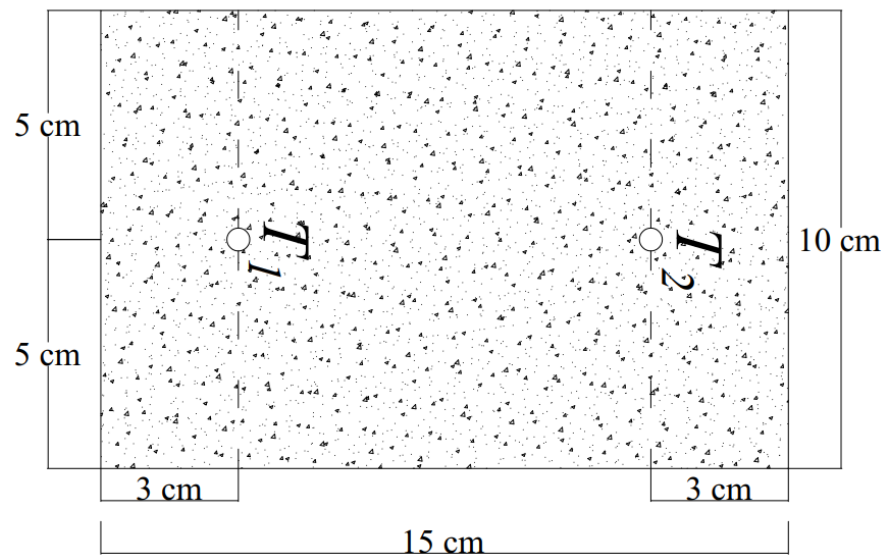
Pada penelitian ini dilakukan pemeriksaan material pada agregat kasar dan agregat halus. Data-data yang didapat kemudian disesuaikan dengan syarat ASTM yang ada.

3.3.2 Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Pada perancangan campuran beton ini dilakukan dengan menggunakan metode ACI (*American Concrete Institute*)-ACI 211.1-91 yang kemudian komposisinya disesuaikan dengan syarat yang sesuai dengan metode ACI.

3.3.3 Pembuatan Sampel Benda Uji

Sampel benda uji dibuat sebanyak 1 buah sampel benda uji balok berukuran lebar 100 mm, tinggi 100 mm dan panjang 150 mm dengan mutu 20 MPa. Dan di dalam sampel tersebut ditanam dua buah termokopel dan dikaitkan dengan baja tulangan yang tertanam pada beton. Dengan letak termokopel seperti Gambar 7. Peletakkan termokopel harus diperhatikan sehingga ketika beton mengeras ujung termokopel rata dan menyentuh permukaan beton.



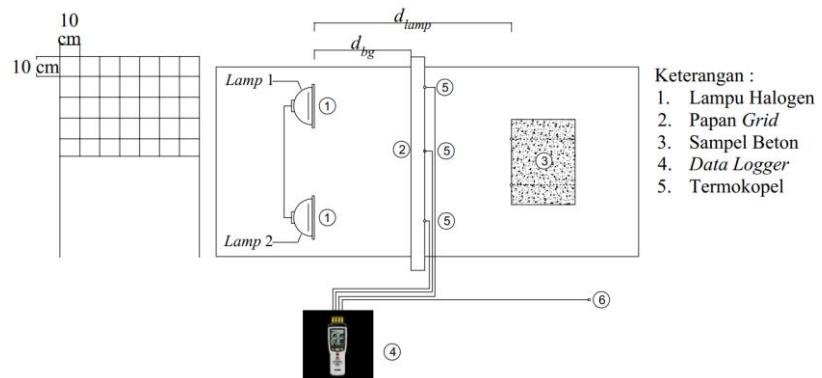
Gambar 7. Letak termokopel pada sampel beton.

3.3.4 Pengujian Termografi Aktif

Pada penelitian kali ini masih berdasarkan penelitian (Kartorono et al., 2022), pada sampel benda uji akan dilakukan pengujian termografi aktif.

3.3.4.1 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 60x40 cm dan dilakukan pada tahap pemanasan dan tahap pendinginan masing-masing selama 1800 detik untuk lampu halogen diletakkan sejajar satu sama lain. Pengujian dilakukan di dalam ruangan untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 8.



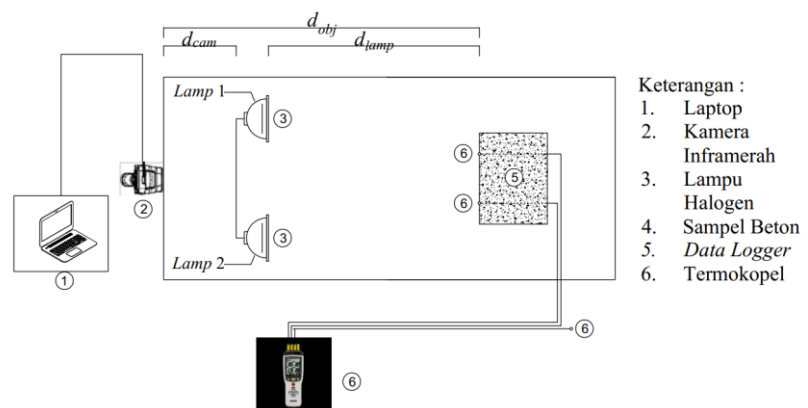
Gambar 8. Pengujian distribusi suhu ruangan dengan metode *grid*.

Tabel 6. Kode pengujian distribusi suhu ruangan dengan metode *grid*

Kode Pengujian	d_{lamp} (cm)	d_{bg} (cm)
TG-5	30	5
TG-10	30	10
TG-15	30	15
TG-20	30	20
TG-25	30	25

3.3.4.2 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, 2 m, dan 3 m dari kamera inframerah seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Pengujian termografi aktif.

Parameter pengujian dalam penelitian ini dapat dilihat ada Tabel 7. Pengujian ini dilakukan pada tahap pemanasan dan tahap pendinginan masing-masing selama 1800 detik.

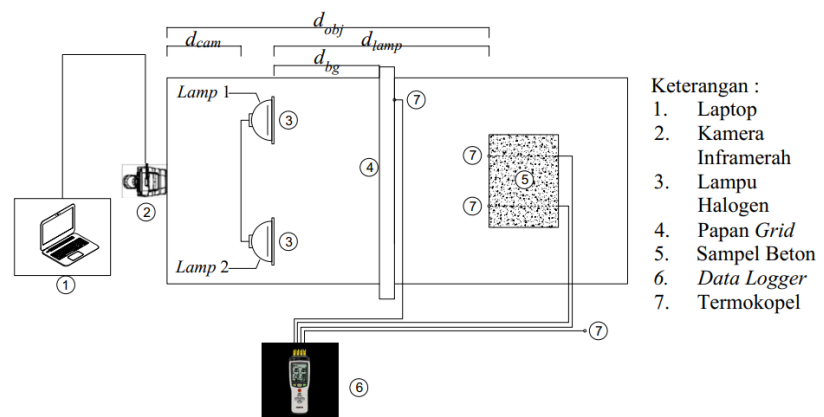
Pengukuran dilakukan di 2 (dua) termokopel yang dipasang pada permukaan beton.

Tabel 7. Kode pengujian sampel dengan parameter jarak objek

Kode Pengujian	d_{cam} (cm)	d_{obj} (cm)	d_{lamp} (cm)
T100	100	30	70
T200	200	30	170
T300	300	30	270

3.3.4.3 Pengujian Eksperimental

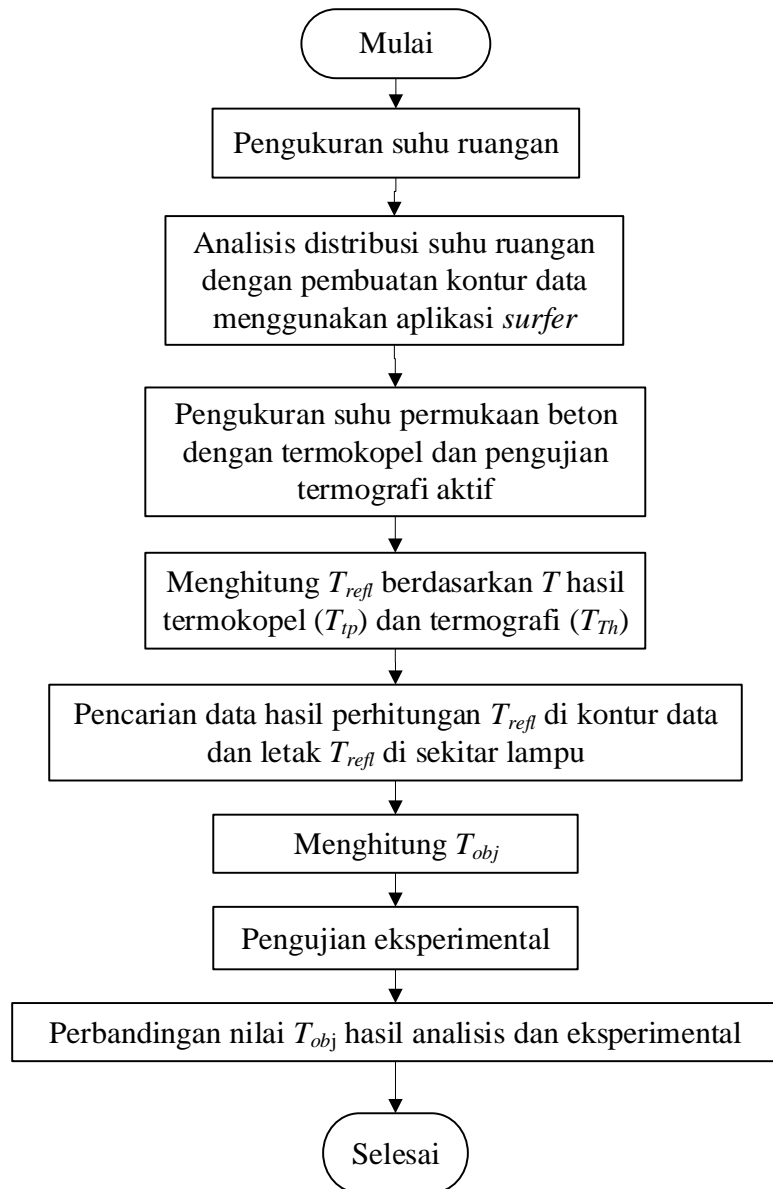
Pelaksanaan pengujian eksperimental masih sama seperti pengujian termografi aktif, namun perbedaannya setelah lokasi dari T_{refl} ditentukan berdasarkan kontur distribusi suhu. Selanjutnya dilakukan pengujian eksperimental sebagai koreksi kebenaran dari data yang dianalisis, dengan termokopel diletakkan di papan *grid* sesuai hasil analisis perhitungan T_{refl} seperti terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengujian ekseperimental.

3.3.5 Analisis Hasil Penelitian

Ketika proses pengujian selesai selanjutnya kita akan melakukan analisis terhadap data yang sudah kita peroleh, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram alir analisis hasil penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Berdasarkan data hasil pengukuran termografi memiliki nilai yang lebih besar daripada data hasil pengukuran termokopel, dengan rata-rata selisih pada pengujian 1 meter, 2 meter, dan 3 meter sebesar 2,3499 °C; 3,0246 °C; dan 3,0946 °C.
2. Rata-rata nilai *reflected temperature* yang didapatkan dari pengujian jarak 1 meter, 2 meter, 3 meter sebesar 51,6496°C; 57,9544°C; dan 59,7707°C.
3. Letak pemasangan termokopel terhadap lampu halogen untuk mencari nilai T_{refl} pada pengujian eksperimental terletak 5 cm di depan lampu halogen dan jarak rata-rata yang didapatkan *reflected temperature* dari atas papan *grid* berturut-turut pada jarak kamera inframerah 1 meter, 2 meter, dan 3 meter sebesar 13 cm, 18 cm, dan 19 cm.
4. Suhu permukaan beton sebelum dikoreksi memiliki nilai yang lebih tinggi karena memiliki noise yang belum direduksi dengan selisih rata-rata antara data sebelum dikoreksi dan data hasil pengukuran berturut-turut 1 meter, 2 meter, 3 meter sebesar 2,7385°C; 3,3749°C; dan 3,4818°C, lalu setelah dilakukan analisis perhitungan selisih suhu dengan hasil pengukuran mengalami penurunan yaitu berturut-turut 1 meter, 2 meter, 3 meter sebesar 0,4634°C; 1,4829°C; dan 0,4666°C dengan rata-rata hasil analisis kesalahan (ΔT_{err}) tanpa adanya segmentasi berturut-turut pada jarak 1 meter, 2 meter, dan 3 meter didapatkan (ΔT_{err}) 1,4479%; 4,3587%; dan 1,3187%. jika dibandingkan dengan nilai *reflected temperature* yang disegmentasi rata-

rata hasil analisis kesalahan (ΔT_{err}) berturut-turut pada jarak 1 meter, 2 meter, dan 3 meter didapatkan 1,6463%; 4,5976%; dan 2,4745%. Oleh karena itu untuk penelitian ini tidak bisa dilakukan secara deterministik.

5.2 Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini, maka perlu diadakan penelitian yang lebih lanjut untuk melengkapi dan mengembangkan tema penelitian ini. Saran yang dapat penulis berikan adalah:

1. Pada saat pengujian usahakan ruangan tertutup dari angin dan tidak terpapar sinar matahari.
2. Peletakkan meja pengujian disarankan terletak di tengah ruangan, agar data yang diambil tidak terpengaruh panas yang dipantulkan oleh tembok .
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan sampel yang digunakan lebih dari 1 untuk meminimalisir rusaknya benda uji ketika pengujian.
4. Pada saat pengujian usahakan selalu memiliki cadangan lampu halogen untuk berjaga- jaga ketika lampu halogen mati, karena pada penelitian ini lampu halogen cepat rusak.

DAFTAR PUSTAKA

- ADM Instrument Engineering (n.d.). *Lutron TP-01*. Diakses pada 20 Februari 2023, dari <https://www.adminstrumentengineering.com.au/environmental-water-quality-monitoring/lutron-tp-01>
- 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/>
- Eandroidfisika (2016). *Perpindahan kalor*. Diakses pada 21 Februari 2023, dari <https://eandroidfisika.wordpress.com/perpindahan-kalor/>
- FLIR Systems. (2012). *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals: The ultimate resource guide for using infrared in the research and Development Industry*.
- 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*, 8-9 Maret, 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.
- Khan, F., Bolhassani, M., Kotsos, A., Hamid, A., & Bartoli, I. (2015). Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures. *Infrared Physics & Technology*, 69, 228-237.

- Kreider, J. F., Curtiss, P. S., & Rabl, A. (2009). *Heating and cooling of buildings: design for efficiency*. CRC Press.
- Kusmanto, A., & Sukamta, S. (2013). Pemeriksaan kondisi peralatan mekanikal dan elektrik gedung menggunakan metode infrared thermography. *Jurnal Teknik Elektro*, 5(1), 6-11. <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jte/article/download/3546/3368>
- Lutron Instruments (n.d.). *Thermometer Lutron TM-947SD*. Diakses pada 20 Februari 2023, dari <https://www.lutroninstruments.eu/with-datalogger/thermometer-lutron-tm-947sd/>
- Moria, H., Mohamad, T. I., & Aldawi, F. (2016). Radiation distribution uniformization by optimized halogen lamps arrangement for a solar simulator. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(6), 29-34. <http://ieomsociety.org/ieom2017/papers/397.pdf>
- Rinaldi, M. (2016). *Rancang Bangun Alat Uji Konduktivitas Thermal Material* (Skripsi Sarjana, Universitas Medan Area).
- Saputra, A. G., Taran, R., Sudjarwo, P., & Buntoro, J. (2014). Identifikasi Penyebab Kerusakan pada Beton dan Pencegahannya. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 3(2), 1-7. <https://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-sipil/article/view/2592>
- Satmoko, A. (2008). Analisis Kualitatif Teknik Thermography Infra Merah dalam Rangka Pemeliharaan Secara Prediktif pada Pompa. *Prosiding Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir*, 25-26 Agustus, 2008, 1-8.
- Satmoko, A., & Hafid, A. (2007, November). Pemeliharaan Prediktif Pada Jaringan Listrik Dengan Thermography Infra Merah. *Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta*, 16 Desember, 2007, 21-22
- S-gala.com. (2022). *Informasi Seputar Lampu Sorot halogen Untuk Kendaraan Bermotor*. Diakses pada 20 Februari 2023, dari <https://www.s-gala.com/blog-post/lampu-sorot-halogen>
- Smith, J. O. (2010). *Determination of the convective heat transfer coefficients from the surfaces of buildings within urban street canyons*. (Disertasi Doktoral, University of Bath).
- Teledyne FLIR (n.d.). *FLIR E8-XT Infrared Camera with Extended Temperature Range*. Diakses pada 20 Februari 2023, dari <https://www.flir.asia/products/e8-xt/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>
- 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>

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>