

**IDENTIFIKASI *VOID* DAN RETAKAN PADA *RIGID PAVEMENT*
MENGUNAKAN TERMOGRAFI INFRAMERAH DENGAN METODE
*PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS***

(Skripsi)

Oleh:

**MUHAMMAD AKHDAN HAIKAL
2215011087**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

IDENTIFIKASI *VOID* DAN RETAKAN PADA *RIGID PAVEMENT* MENGUNAKAN TERMOGRAFI INFRAMERAH DENGAN METODE *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS*

Oleh

MUHAMMAD AKHDAN HAIKAL

Rigid pavement rentan terhadap kerusakan internal berupa *void* dan retakan yang dapat menurunkan kapasitas dukung dan memperpendek umur layan struktur. Metode inspeksi konvensional memiliki keterbatasan dalam mendeteksi kerusakan bawah permukaan, sehingga diperlukan pendekatan *Non-Destructive Test* (NDT) yang lebih efektif. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi *void* dan retakan pada rigid pavement menggunakan termografi inframerah pasif berbasis *Principal Component Analysis* (PCA) serta menganalisis faktor yang memengaruhi tingkat kejelasan deteksinya. Pengujian dilakukan pada tiga sampel pelat beton K-300 berukuran $100 \times 100 \times 22$ cm dengan *void* buatan berukuran 2–4 cm dan retakan buatan lebar 0,5–2 mm. Citra termal diambil menggunakan kamera FLIR E8-XT pada jarak 0,5–2,5 m dan diolah menggunakan *principal component analysis* (PCA). Hasil menunjukkan PCA mampu mendeteksi *void* dengan akurasi rata-rata di atas 90% pada jarak 0,5–1,5 m untuk sampel dengan kedalaman *void* 0,5 cm, namun tidak efektif pada jarak lebih jauh dan kedalaman *void* lebih besar. Deteksi retakan hanya berhasil pada kondisi lebar 2 mm kedalaman 3 cm di jarak 0,5 m, terbatas oleh resolusi spasial kamera. Tingkat kejelasan deteksi dipengaruhi oleh diameter, kedalaman *void*, ukuran retakan dan jarak kamera.

Kata kunci: *Rigid pavement, termografi inframerah, Non-Destructive Test (NDT), Principal Component Analysis (PCA), void, retakan*

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF VOIDS AND CRACKS IN RIGID PAVEMENT USING INFRARED THERMOGRAPHY WITH PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS METHOD

By

MUHAMMAD AKHDAN HAIKAL

Rigid pavement is prone to internal damage such as voids and cracks that can reduce its strength and shorten its service life. Common inspection methods are limited in detecting damage beneath the surface, so a more effective Non-Destructive Test (NDT) approach is needed. This study aims to identify voids and cracks in rigid pavement using passive infrared thermography combined with Principal Component Analysis (PCA), and to analyze factors that affect detection results. Tests were carried out on three concrete slab specimens (K-300, 100 × 100 × 22 cm) with artificial voids of 2–4 cm and artificial cracks of 0.5–2 mm width. Thermal images were taken using a FLIR E8-XT camera at distances of 0.5–2.5 m and processed using Empirical Orthogonal Functions (EOF). The results show that PCA was able to detect voids with an average accuracy above 90% at distances of 0.5–1.5 m for specimens with a void depth of 0.5 cm, but was less effective at greater distances and deeper voids. Crack detection was only successful for a 2 mm wide and 3 cm deep crack at 0.5 m distance, due to the camera's limited resolution. Detection clarity was affected by void size, void depth, size of the crack and camera distance.

Keywords: *Rigid pavement, infrared thermography, Non-Destructive Test (NDT), Principal Component Analysis (PCA), voids, cracks*

**IDENTIFIKASI *VOID* DAN RETAKAN PADA *RIGID PAVEMENT*
MENGUNAKAN TERMOGRAFI INFRAMERAH DENGAN
METODE *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS***

Oleh:

Muhammad Akhdan Haikal

Skripsi

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

JURUSAN TEKNIK SIPIL

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi : **IDENTIFIKASI VOID DAN RETAKAN
PADA RIGID PAVEMENT MENGGUNAKAN
TERMOGRAFI INFRAMERAH DENGAN
METODE *PRINCIPAL COMPONENT
ANALYSIS***

Nama Mahasiswa : **Muhammad Akhdan Haikal**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011087


Program Studi : SI Teknik Sipil

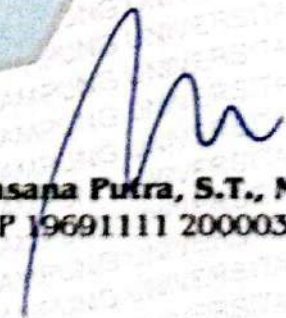
Jurusan : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik



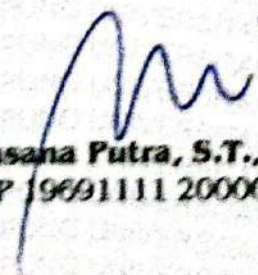
1. Komisi Pembimbing



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


Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil



Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002


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

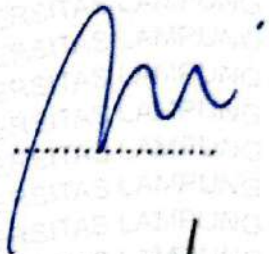
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

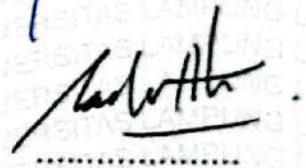
Ketua : **Dr. Suyadi, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Sasana Putra, S.T., M.T.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T.,
D.E.A., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **03 Juni 2026**

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Akhdan Haikal
Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011087
Judul Skripsi : Identifikasi *Void* dan Retakan pada *Rigid Pavement*
Menggunakan Termografi Inframerah dengan
Metode *Principal Component Analysis*
Jurusan : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, Juni 2026
Pembuat Pernyataan



Muhammad Akhdan Haikal

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung pada tanggal 24 Februari 2004. Penulis merupakan anak kedua dari Bapak Bosur Syafarudin dan Ibu Karlina. Penulis memiliki 1 saudara perempuan bernama Ermanda Saskia Merosiana.

Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Tamansiswa Teluk Betung, Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2010, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Dasar di SD Tamansiswa Teluk Betung, yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Pertama di SMP Negeri 9 Kota Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2019, dan dilanjutkan Pendidikan Menengah Atas di SMA Negeri 11 Kota Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2022. Kemudian, penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN pada tahun 2022. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung sebagai Anggota Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa pada periode 2023-2024 dan 2024-2025.

Selama menjadi mahasiswa, penulis sering mengikuti berbagai kegiatan seperti menjadi Koordinator acara Penanaman Mangrove *Civil For Society*. Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa Padang Ratu, Kecamatan Sungkai Utara, Kabupaten Lampung Utara, Lampung selama 30 hari, yaitu Januari – Februari 2025, Kemudian pada Mei – Juli 2025 penulis melaksanakan Kerja Praktik pada Proyek Duplikasi Jembatan Way Sekampung Kibang, di Kabupaten Lampung Timur, Lampung. Mulai pada tahun 2025 juga, penulis melakukan penelitian yang berjudul “Identifikasi *Void* dan Retakan pada *Rigid Pavement* Menggunakan Termografi Inframerah dengan Metode *Principal Component Analysis*” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin. Segala puji bagi Allah SWT.

Skripsi ini saya persembahkan kepada Mama, Ayah dan kakak tercinta.

Terimakasih atas doa, kasih sayang, dan perjuangan yang tidak pernah berhenti untuk saya. Terimakasih karena selalu mendukung, menguatkan, dan memastikan penulis tidak pernah merasa kekurangan, baik dalam perhatian, semangat, maupun dukungan. Mama, Ayah dan kakak adalah alasan terbesar saya mampu bertahan dalam setiap proses dan kesulitan hingga berada di titik ini.

Terimakasih juga untuk diriku sendiri Muhammad Akhdan Haikal, telah bertahan sejauh ini dan tidak memilih menyerah di tengah proses yang berat dan melelahkan.

MOTTO

“Allah SWT tidak mengatakan hidup ini mudah. Tetapi Allah SWT berjanji bahwa sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(Q.S. Al-Insyirah : 5-6)

“Hidup bukan saling mendahului, bermimpilah sendiri-sendiri.”

(Baskara Putra)

“Jangan takut gagal, karena yang tidak pernah gagal hanyalah orang-orang yang tidak pernah melangkah.”

(Buya Hamka)

“Pada akhirnya, ini semua hanya permulaan”

SANWACANA

Atas berkat Rahmat hidayat Allah S.W.T. dengan mengucapkan puji Syukur Alhamdulillah, penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Lama Waktu *Steam Curing* Pada Beton Menggunakan Agregat Kasar Batu Putih yang Ditambah Abu Ketel dan *Silica Fume*” sebagai salah satu syarat dalam mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung. Pada penyusunan laporan ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM, ASEAN, Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung sekaligus Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, masukan, serta bimbingan dengan penuh kesabaran selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas ilmu dan motivasi yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
4. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Lampung sekaligus Dosen Pembimbing Utama yang telah dengan tulus membimbing, mengarahkan, dan mendampingi penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran, perhatian, ilmu, serta motivasi yang selalu diberikan di tengah setiap kesulitan yang penulis hadapi. Setiap saran dan masukan yang diberikan menjadi pelajaran berharga yang tidak hanya membantu dalam penyelesaian skripsi ini, tetapi juga menjadi bekal bagi penulis untuk terus berkembang di masa depan.

5. Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, serta masukan yang membangun kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas perhatian, ilmu, dan evaluasi yang diberikan sehingga penulis dapat memperbaiki dan menyempurnakan skripsi ini menjadi lebih baik.
6. Ibu Dr. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Akademik atas bimbingan dan pengarahan selama masa perkuliahan.
7. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang sudah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat dalam proses pembelajaran agar lebih baik kedepannya.
8. Mama Karlina tercinta, perempuan hebat yang selalu menjadi rumah paling nyaman bagi penulis. Terima kasih atas setiap doa yang tidak pernah putus, kasih sayang yang tulus, serta perjuangan yang tidak akan pernah mampu terbalaskan. Terima kasih karena selalu menguatkan penulis di setiap keadaan, menemani dalam setiap proses, dan menjadi alasan terbesar penulis untuk terus bertahan dan menyelesaikan skripsi ini. Semoga segala pengorbanan, ketulusan, dan cinta yang Mama berikan selalu dibalas dengan kebahagiaan dan kesehatan oleh Allah SWT.
9. Ayah Bosur tercinta, sosok yang selalu menjadi kekuatan dan panutan bagi penulis. Terima kasih atas setiap perjuangan, kerja keras, pengorbanan, dan doa yang selalu diberikan tanpa mengenal lelah. Terima kasih karena selalu berusaha memberikan yang terbaik dan memastikan penulis dapat terus melangkah hingga berada di titik ini. Semoga segala kebaikan, ketulusan, dan kasih sayang yang Ayah berikan selalu dibalas dengan kesehatan, kebahagiaan, dan keberkahan oleh Allah SWT.
10. Kakakku tersayang, terima kasih karena selalu hadir memberi dukungan, perhatian, dan semangat dalam setiap proses yang penulis jalani. Terima kasih karena selalu memastikan adikmu ini tidak pernah merasa kekurangan, baik dalam kasih sayang, bantuan, maupun dukungan di saat keadaan sulit. Kehadiran dan kepedulianmu menjadi salah satu alasan penulis mampu bertahan dan menyelesaikan perjalanan ini hingga akhir.

11. Seluruh Staff dari Laboratorium Bahan dan Kontruksi (Pak Jali, Mas Tyo, dan Mba Elfa) yang sudah memberikan fasilitas sarana prasarana dalam menunjang penelitian serta memberikan saran, dan dukungan serta bimbingan selama kami melakukan penelitian.
12. Seluruh Staff Administrasi Jurusan Teknik Sipil yang selalu membantu dalam administrasi selama perkuliahan penulis.
13. Teman-teman TOUR LAMBAR (Aldi, Faalih, Ridho, Irsyad, Bapet, Noy, Kobul, Zaki, Kul, Wais, Zikri, Abay, Ikker, Vetto, Yanzil), terima kasih karena telah menjadi warna, cerita, dan bagian berharga dalam perjalanan perkuliahan penulis. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, canda, serta kenangan yang telah dilewati bersama, baik di masa sulit maupun bahagia. Kehadiran kalian membuat setiap proses selama perkuliahan terasa lebih ringan dan penuh makna.
14. Teman-teman APAKEK (Lala, Sesa, Syifa, Amel, Dirok, Farah, Moza, Dindam, Keisya, Daiva, Akbar, Wildan, Denny, El, Vetto), yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan perkuliahan penulis. Terima kasih karena telah menjadi tempat berbagi, penguat di saat lelah, serta salah satu alasan penulis mampu bertahan dan menyelesaikan masa perkuliahan ini.
15. Kepada seseorang yang kehadirannya tidak kalah berarti, Farah Ispi Nadia. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup yang sesungguhnya baru saja dimulai ini. Telah menjadi tempat berbagi cerita, pendamping yang senantiasa menemani, mendukung, dan menghibur di kala duka. Semoga Allah senantiasa melimpahkan keberkahan dalam setiap langkah yang dilalui.
16. Kepada orang-orang terdekat yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, terima kasih atas setiap doa, dukungan, bantuan, perhatian, dan kebaikan yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Kehadiran kalian menjadi bagian penting yang membantu penulis tetap kuat dan mampu menyelesaikan perjalanan ini hingga akhir.
17. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2022 (TEGAS) yang menemani penulis berjuang dari awal perkuliahan, memberikan semangat dan dukungan sampai penulis bisa menyelesaikan penulisan ini. terimakasih kita sudah bertahan dan menjalani kehidupan skripsi yang menyenangkan ini.

18. Terakhir, Terimakasih untuk diri sendiri, Muhammad Akhdan Haikal. Terima kasih karena telah mampu bertahan sejauh ini dan tidak menyerah di tengah banyaknya tekanan, rasa lelah, serta proses yang tidak mudah. Terima kasih karena tetap berusaha kuat, tetap bangkit setelah jatuh, dan tetap melangkah meski terkadang harus berjalan sendirian. Skripsi ini menjadi bukti bahwa setiap perjuangan, air mata, dan pengorbanan yang telah dilalui tidak pernah sia-sia. Semoga langkah kecil ini menjadi awal dari perjalanan yang lebih baik di masa depan.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga saran dan masukan membangun diperlukan oleh penulis dikemudian hari. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna,

Bandar Lampung, Juni 2026
Penulis,

Muhammad Akhdan Haikal

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian	5
1.6. Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Beton	7
2.1.1. <i>Thermal Properties</i> pada Beton.....	7
2.1.2. Karakteristik Beton.....	9
2.1.3. Kerusakan pada Beton	10
2.2. <i>Rigid pavement</i>	11
2.3. <i>Non-Destructive Test</i>	12
2.4. Termografi Inframerah	13
2.4.1. Termografi Aktif	14
2.4.2. Termografi Pasif	15
2.5. <i>Principal Component Analysis (PCA)</i>	16
2.6. <i>Thermal Contrast</i>	18
2.7. Alat yang digunakan	19

III. METODOLOGI PENELITIAN.....	20
3.1. Umum.....	20
3.2. Lokasi Penelitian.....	21
3.3. Peralatan dan Bahan Penelitian.....	21
3.3.1. Peralatan Pengujian Material.....	21
3.3.2. Peralatan pengujian Termografi Inframerah.....	21
3.3.3. Bahan yang digunakan.....	22
3.4. Pemeriksaan Material.....	22
3.5. Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>).....	23
3.6. Pembuatan Sampel Benda Uji.....	24
3.7. Pengujian Benda Uji	28
3.7.1. Pengujian Kuat Tekan.....	28
3.7.2. Pengujian Termografi Inframerah.....	29
3.8. Pengolahan Data berdasarkan <i>Principal Component Analysis</i> (PCA)..	30
3.8.1. Akuisisi dan Pra-Pengolahan Data Termal	30
3.8.2. Penyusunan Matriks Data Termal.....	31
3.8.3. Dekomposisi Matriks.....	31
3.8.4. Ekstraksi <i>Empirical Orthogonal Function</i> (EOF).....	32
3.8.5. Analisis Hasil PCA	33
3.9. Diagram Alir Penelitian.....	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1. Hasil Pengujian Material.....	36
4.1.1. Pengujian Material Agregat Halus.....	36
4.1.2. Pengujian Material Agregat Kasar.....	41
4.1.3. Pengujian Material Semen.....	47
4.2. Hasil Pengujian <i>Mix Design</i> dan Kuat Tekan.....	48
4.2.1. Perencanaan Beton 25 MPa.....	48
4.2.2. Pengujian Kuat Tekan.....	54
4.3. Hasil Pengujian Termografi Pasif	55
4.3.1. Pengujian Termografi Pasif	56
4.3.2. Pengolahan Data Menggunakan Software FLIR TOOLS	62
4.3.3. Analisis Data Menggunakan MATLAB	63

4.4. Hasil Pengukuran <i>Artificial Void</i> (<i>Void</i> Buatan).....	76
4.5. Hasil Perbandingan posisi <i>Void</i> Rencana dan Kondisi Aktual	92
4.6. Hasil Pengukuran <i>Artificial Crack</i>	94
V. KESIMPULAN DAN SARAN	104
5.1. Kesimpulan	104
5.2. Saran.....	105
DAFTAR PUSTAKA	106

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Retak.....	10
Gambar 2. <i>Voids</i>	11
Gambar 3. <i>Scalling</i>	11
Gambar 4. Struktur Perkerasan Kaku.....	12
Gambar 5. Contoh pengujian termografi aktif.	14
Gambar 6. Contoh pengujian termografi pasif.....	15
Gambar 7. Kamera Inframerah (FLIR E8-XT).....	19
Gambar 8. Letak <i>void</i> dan retakan buatan.....	26
Gambar 9. Potongan A-A benda uji beton27	27
Gambar 10. Diagram alir penelitian.....	34
Gambar 11. Diagram alir penelitian. (Lanjutan).....	35
Gambar 12. Pengujian kadar air agregat halus.....	37
Gambar 13. Pengujian kadar lumpur agregat halus.	37
Gambar 14. Pengujian berat volume agregat halus.....	38
Gambar 15. Pengujian berat jenis agregat halus.	39
Gambar 16. Pengujian gradasi agregat halus.	41
Gambar 17. Pengujian kadar air agregat kasar.....	42
Gambar 18. Pengujian kadar lumpur agregat kasar.	42
Gambar 19. Pengujian berat volume agregat kasar.....	43
Gambar 20. Pengujian berat jenis agregat kasar.	44
Gambar 21. Pengujian berat jenis agregat kasar.	46
Gambar 22. Pengujian berat jenis semen.	47
Gambar 23. Pengujian mix design dan curing.	54
Gambar 24. Pengujian kuat tekan.	55

Gambar 25. Peletakan benda uji (a) IRT-1 (b) IRT-2 (c) IRT-3.	57
Gambar 26. Pengambilan citra termal pengujian termografi	57
Gambar 27. Hasil pengambilan citra termal dengan jarak 0,5 m.....	58
Gambar 28. Hasil pengambilan citra termal dengan jarak 1 m.....	59
Gambar 29. Hasil pengambilan citra termal dengan jarak 1,5 m.....	60
Gambar 30. Hasil pengambilan citra termal dengan jarak 2 m.....	61
Gambar 31. Hasil pengambilan citra termal dengan jarak 2,5 m.....	61
Gambar 32. Pengolahan data menggunakan software FLIR TOOLS.....	63
Gambar 33. Hasil pengolahan data bentuk <i>Comma Separated Values</i>	63
Gambar 34. Tahapan PCA.....	64
Gambar 35. Proses PCA.....	66
Gambar 36. Hasil Visualisasi PCA dengan jarak pengambilan 0,5 m	68
Gambar 37. Hasil Visualisasi PCA dengan jarak pengambilan 1 m	70
Gambar 38. Hasil Visualisasi PCA dengan jarak pengambilan 1,5 m	72
Gambar 39. Hasil Visualisasi PCA dengan jarak pengambilan 2 m	74
Gambar 40. Hasil Visualisasi PCA dengan jarak pengambilan 2,5 m	76
Gambar 41. Pengambilan data hasil PCA.	78
Gambar 42. Memindahkan data hasil PCA ke excel.....	78
Gambar 43. Input data ke Surfer.	79
Gambar 44. Membuat lingkaran sebagai acuan.	79
Gambar 45. Mengidentifikasi kontur yang mendekati lingkaran.....	80
Gambar 46. Export kontur ke AutoCad.....	80
Gambar 47. Melakukan interpolasi dan mengecek kembali luasan.	81
Gambar 48. Pemotongan sampel beton dengan alat core drill.....	93
Gambar 49. Pengukuran (a) diameter void (b) kedalaman void.	93
Gambar 50. Mengukur Garis Referensi.	94
Gambar 51. Menetapkan skala gambar (<i>set scale</i>).....	95
Gambar 52. Mengukur retakan dengan skala yang terkalibrasi.	95

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Spesifikasi kamera FLIR E8-XT.....	22
Tabel 2. Kode dan jumlah benda uji.....	24
Tabel 3. Variasi ukuran <i>void</i>	25
Tabel 4. Diameter ruji (dowel).....	25
Tabel 5. Rincian data retakan pada benda uji beton.....	28
Tabel 6. Hasil pengujian gradasi agregat halus.....	40
Tabel 7. Hasil perhitungan gradasi agregat halus.....	41
Tabel 8. Hasil pengujian gradasi agregat kasar.....	45
Tabel 9. Hasil perhitungan gradasi agregat kasar.....	46
Tabel 10. Kesimpulan hasil pengujian material.....	48
Tabel 11. Nilai faktor air semen sesuai SNI 7656-2012.....	49
Tabel 12. Volume agregat kasar per satuan volume beton.....	50
Tabel 13. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton.....	54
Tabel 14. Waktu Pelaksanaan pengujian Termografi Inframerah.....	57
Tabel 15. Ukuran Matriks pada tiap jarak.....	62
Tabel 16. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen vector</i> pada Jarak 0,5 m.....	83
Tabel 17. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen vector</i> pada Jarak 1 m.....	83
Tabel 18. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen vector</i> pada Jarak 1,5 m.....	84
Tabel 19. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen vector</i> pada Jarak 2 - 2,5 m.....	84
Tabel 20. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 0,5 m.....	86
Tabel 21. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 1 m.....	87
Tabel 22. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 1,5 m.....	88
Tabel 23. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 2 - 2,5 m.....	89
Tabel 24. Perbandingan <i>void</i> Rencana dan Aktual.....	92

Tabel 25. Hasil pengukuran <i>Artificial Crack</i> pada termogram mentah.	95
Tabel 26. Hasil Pengukuran <i>Artificial Crack</i>	98

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Konstruksi perkerasan jalan memiliki peran penting dalam menunjang transportasi dan pertumbuhan ekonomi. Salah satu jenis yang banyak digunakan di Indonesia adalah *rigid pavement*, yaitu perkerasan kaku berbahan dasar beton semen Portland dengan kekakuan tinggi, stabilitas dimensi baik, serta daya tahan terhadap beban berat. (Sukirman, 2010). Dibandingkan dengan *flexible pavement*, *rigid pavement* memiliki umur layanan yang lebih panjang. Namun demikian, struktur ini juga rentan terhadap kerusakan internal seperti *void* (rongga) dan retakan (*cracks*) yang dapat menurunkan kekuatan serta durabilitas perkerasan.

Retakan pada *rigid pavement* dapat terjadi akibat beban berlebih, penyusutan akibat perubahan suhu, kesalahan pelaksanaan, maupun pergerakan tanah dasar. Sedangkan *void* terbentuk akibat pemadatan yang tidak sempurna atau campuran beton yang kurang homogen (Alfredo et al., 2015). Keberadaan kedua cacat tersebut dapat menyebabkan penurunan kapasitas dukung, memicu kerusakan lanjutan seperti spalling dan pumping, serta memperpendek umur layanan struktur jalan. Oleh karena itu, diperlukan metode deteksi dini yang efektif untuk mengidentifikasi kerusakan sejak tahap awal tanpa merusak struktur beton.

Metode inspeksi konvensional seperti pengamatan visual, uji palu pantul (*rebound hammer*), dan *ultrasonic pulse velocity* (UPV) sering digunakan untuk menilai kondisi beton. Namun, metode-metode tersebut memiliki

keterbatasan, seperti hanya mendeteksi kerusakan pada permukaan atau memerlukan kontak langsung dengan benda uji, sehingga kurang efisien untuk area yang luas (Dorafshan et al., 2018). Kondisi ini mendorong pemanfaatan metode *Non-Destructive Test* (NDT) yang lebih cepat, akurat, dan tidak merusak struktur.

Salah satu metode *Non-Destructive Test* (NDT) yang potensial adalah termografi inframerah (*Infrared Thermography*/IRT), yaitu teknik yang memanfaatkan radiasi inframerah dari permukaan beton untuk mendeteksi perbedaan distribusi suhu akibat adanya cacat internal seperti *void* atau retakan (Usamentiaga et al., 2014). Berdasarkan prinsipnya, area cacat menunjukkan kontras suhu berbeda dari beton padat. Termografi terbagi menjadi aktif dan pasif. Metode aktif memerlukan sumber panas eksternal, sementara pasif mengandalkan radiasi alami seperti sinar matahari (Rajic, 2002). Namun, termografi pasif memiliki keterbatasan pada kontras termal rendah dan sensitivitas terhadap kondisi lingkungan (Yang et al., 2025)

Peningkatan kualitas citra hasil termografi pasif dapat dilakukan menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA). PCA merupakan teknik statistik multivariat yang bertujuan untuk mengekstraksi komponen utama dari data berdimensi besar guna menonjolkan pola dominan serta mengurangi *noise* (Jolliffe & Cadima, 2016). Ketika diterapkan pada citra termal, PCA dikenal sebagai *Principal Component Thermography* (PCT), yang berfungsi memperjelas distribusi suhu dan memperkuat perbedaan antara area cacat dan area utuh (Rajic, 2002).

Penelitian sebelumnya menunjukkan efektivitas penggunaan IRT untuk mendeteksi retakan pada beton. Naufal Hakim (2025) menggunakan termografi pasif berbasis *thermal contrast* terbesar dan menemukan bahwa retakan dapat teridentifikasi, meski akurasinya dipengaruhi jarak kamera dan arah matahari. Sementara itu, Az-Zahra (2025) mengembangkan metode dengan menerapkan *Principal Component Analysis* (PCA) pada data

termografi pasif. Hasilnya menunjukkan bahwa PCA mampu meningkatkan kontras citra termal melalui ekstraksi *Empirical Orthogonal Functions* (EOF), sehingga retakan dapat divisualisasikan lebih jelas dibandingkan dengan metode konvensional. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Milovanović et al. (2020) yang menunjukkan bahwa *Principal Component Thermography* (PCT) berbasis PCA meningkatkan sensitivitas deteksi cacat pada beton, terutama saat kontras termal rendah. Kombinasi termografi pasif dan PCA dinilai berpotensi besar untuk metode inspeksi beton yang lebih andal, cepat, dan efisien.

Pengujian dilakukan pada benda uji berupa pelat beton berukuran $100 \times 100 \times 22$ cm yang menyerupai struktur *rigid pavement*. Pada pelat tersebut dibuat kondisi mengandung *void* dan retakan buatan untuk mensimulasikan kerusakan yang sering dijumpai pada perkerasan beton. Pengambilan citra dilakukan menggunakan termografi pasif dengan memanfaatkan panas alami dari lingkungan, kemudian hasilnya diolah dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA) untuk meningkatkan kontras termal serta mengidentifikasi lokasi cacat secara visual.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada identifikasi *void* dan retakan pada *rigid pavement* menggunakan uji termografi dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA). Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode deteksi non-destruktif, khususnya dalam meningkatkan efektivitas identifikasi kerusakan pada struktur beton baik di permukaan maupun bagian dalam.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana hasil identifikasi *void* dan retakan pada *rigid pavement* menggunakan termografi inframerah berdasarkan *Principal Component Analysis*?
2. Apa penyebab perbedaan tingkat kejelasan deteksi *void* dan retakan pada hasil citra termal berbasis *Principal Component Analysis* (PCA)?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengidentifikasi *void* dan retakan pada *rigid pavement* menggunakan termografi inframerah berbasis *Principal Component Analysis*.
2. Untuk menganalisis penyebab perbedaan tingkat kejelasan deteksi *void* dan retakan pada hasil citra termal berbasis *Principal Component Analysis* (PCA).

1.4. Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah dalam penelitian ini:

1. Pengujian material serta pembuatan benda uji beton akan dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Universitas Lampung
2. Pada penelitian ini digunakan 3 buah sampel beton mutu K-300 dengan ukuran 100 x 100 x 22 cm dengan tulangan $\emptyset 32$ dan $\emptyset 12$.
3. Setiap sampel memiliki retak buatan (*artificial cracks*) dengan variasi lebar retak $w_{cr1} = 2$ mm, $w_{cr2} = 1$ mm, dan $w_{cr3} = 0,5$ mm, kedalaman retakan $d_{cr1} = 1$ cm, $d_{cr2} = 2$ cm, dan $d_{cr3} = 3$ cm. Serta *void* buatan dengan variasi ukuran $V1 = 4$ cm, $V2 = 2,5$ cm dan $V3 = 2$ cm.

4. Pengujian termografi inframerah menggunakan kamera IR tipe FLIR E8-XT dengan resolusi 240 x 320 piksel.
5. variasi jarak kamera terhadap beton $d_{cam1} = 0,5$ m, $d_{cam2} = 1$ m, $d_{cam3} = 1,5$ m, $d_{cam4} = 2$ m, dan $d_{cam5} = 2,5$ m dengan masing masing jarak diambil 40 gambar.
6. Jenis *defect* yang ditinjau pada penelitian ini hanya *crack* (retakan) dan *void* (rongga)
7. Analisis data hasil uji termografi menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA)

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diharapkan dapat mendukung pengembangan metode inspeksi perkerasan secara kuantitatif, yaitu melalui analisis data suhu dan kontras termal yang dihasilkan dari citra inframerah, sehingga hasil deteksi tidak hanya bersifat visual tetapi juga dapat diukur secara numerik.
2. Menjadi acuan bagi praktisi atau instansi terkait dalam melakukan inspeksi kondisi perkerasan beton secara cepat dan efisien tanpa merusak struktur.
3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan bagi studi-studi lanjutan yang berkaitan dengan aplikasi termografi inframerah pada *assesment* bangunan.

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, Batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menguraikan teori-teori yang berkaitan dengan penelitian sebagai acuan dalam melaksanakan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, termasuk jenis penelitian, alat dan bahan, serta prosedur pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menampilkan hasil penelitian serta analisis terhadap data yang diperoleh

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan dari penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton

Beton adalah bahan komposit yang terbuat dari beberapa material yang menggunakan bahan utama yaitu semen, agregat halus, agregat kasar, air dan material tambahan jika dibutuhkan dengan komposisi tertentu (Hamdi et al., 2022).

2.1.1. *Thermal Properties* pada Beton

Beton merupakan material komposit yang memiliki karakteristik termal tertentu, yang dipengaruhi oleh densitas, kadar air, porositas, komposisi agregat, dan rasio semen-air. Sifat termal utama beton meliputi konduktivitas termal (*thermal conductivity*), kapasitas panas spesifik (*specific heat capacity*), dan difusivitas termal (*thermal diffusivity*). Ketiga parameter ini menentukan bagaimana panas dialirkan, disimpan, dan didistribusikan di dalam struktur beton (Usamentiaga et al., 2014).

a. Konduktivitas Termal (k)

Konduktivitas termal menggambarkan kemampuan beton dalam menghantarkan panas. Secara umum, nilai konduktivitas termal beton normal bervariasi cukup luas, berkisar antara 1.0 hingga 3.6 W/mK (Neville, 2011), bergantung pada jenis agregat, tingkat saturasi air, dan densitasnya. Beton padat tanpa cacat memiliki nilai konduktivitas termal yang relatif tinggi, sedangkan area yang mengandung rongga udara atau retakan memiliki nilai

konduktivitas lebih rendah. Hal ini terjadi karena udara adalah isolator panas sehingga menghambat aliran panas di dalam material. Perbedaan kemampuan penghantaran panas ini menyebabkan terbentuknya perbedaan suhu antara area sehat dan area cacat pada beton (Sirca Jr & Adeli, 2018)

b. Kapasitas Panas Spesifik (Specific Heat Capacity, C_p)

Kapasitas panas spesifik adalah kemampuan beton dalam menyerap panas sebelum terjadi kenaikan suhu. Beton dengan porositas tinggi atau mengandung *void* memiliki kapasitas panas yang lebih kecil dibanding beton padat, sehingga menyebabkan perubahan suhu lebih cepat saat terjadi pemanasan ataupun pendinginan (Tomita & Chew, 2022)

c. Difusivitas Termal (α)

Difusivitas termal adalah kemampuan panas merambat melalui beton. Difusivitas berkaitan langsung dengan tingkat penyebaran panas dari permukaan ke bagian dalam. Adanya retakan dan *void* menghambat propagasi panas, sehingga area cacat akan menunjukkan pola distribusi suhu yang berbeda pada citra termal (Pedram et al., 2022)

Termografi inframerah memanfaatkan karakteristik termal beton untuk mengidentifikasi kerusakan internal seperti retakan dan *void*. Pada material yang homogen dan padat, distribusi suhu pada permukaan beton relatif seragam. Namun, ketika terdapat cacat internal, perbedaan konduktivitas, kapasitas panas, dan difusivitas menyebabkan terbentuknya *thermal contrast* yaitu perbedaan suhu antara area cacat dan area sehat.

Area cacat seperti *void* atau retakan mengalami perubahan suhu lebih cepat karena udara yang terperangkap di dalamnya memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah sehingga menghambat aliran panas. Sebaliknya, beton yang padat dan sehat mampu menghantarkan

serta menyimpan panas dengan lebih stabil dan lambat. Perbedaan respons termal tersebut menghasilkan kontras suhu pada permukaan beton, sehingga pada citra termal area cacat dapat terlihat lebih panas (*hot spot*) atau lebih dingin (*cold spot*) dibandingkan dengan area sekitarnya.

Konsep ini menjadi dasar penggunaan termografi pasif dan aktif dalam mendeteksi kerusakan internal beton. Selain itu, pada termografi pasif, proses pemanasan oleh matahari menghasilkan distribusi panas alami. Ketika gradien suhu mencapai puncak, kontras termal maksimum muncul dan kerusakan internal lebih mudah terlihat. Nilai kontras termal ini kemudian dapat diperkuat menggunakan teknik PCA, sehingga pola anomali suhu akibat cacat dapat divisualisasikan dengan lebih jelas (Milovanović et al., 2020).

2.1.2. Karakteristik Beton

Untuk menghasilkan beton yang berkualitas, perlu diperhatikan dengan cermat proses pembuatan adukan beton segar agar beton yang mengeras memiliki kekuatan, daya tahan, dan kedap air yang baik. Kualitas beton dipengaruhi oleh komposisi bahan, sifat material, cara pengadukan, penguangan, pemadatan, dan perawatan selama pengerasan.

Adapun karakteristik beton yang baik meliputi (Septiani et al., 2024):

- a. Kepadatan yaitu memiliki struktur yang baik juga memiliki kepadatan yang baik sehingga mampu menopang beban bangunan konstruksi agar tidak mudah retak.
- b. Kekuatan adalah salah satu standarisasi yang harus dipenuhi pada penggunaan untuk bangunan-bangunan konstruksi.
- c. Tekstur yang dimiliki juga menentukan kualitasnya.
- d. Parameter adalah salah satu hal yang perlu diperhatikan yang juga dapat mempengaruhi kualitas beton.

2.1.3. Kerusakan pada Beton

Menurut Isneini (2009), kerusakan yang dapat terjadi pada beton umumnya dapat dikelompokkan menjadi 3 kategori yaitu:

- a. Retak (*crack*) adalah pecah pada beton dalam garis-garis yang relatif panjang dan sempit (Isneini, 2009). Keretakan ini bisa disebabkan oleh berbagai hal seperti kesalahan dalam proses curing, kelebihan beban, kehilangan air dan faktor cuaca (Alfredo et al., 2015). Retak pada beton dapat diidentifikasi melalui tiga parameter utama, yaitu lebar, panjang, dan pola umumnya. Pengukuran lebar retak sering kali sulit dilakukan karena bentuk retak yang tidak beraturan (*irregular shape*). Selain itu, pada tahap pengerasan beton biasanya muncul retak mikro yang sangat kecil sehingga sulit untuk dideteksi (Ghafur, 2009).

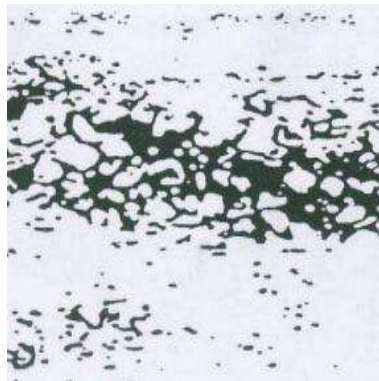


Gambar 1. Retak.

(Sumber : Isneini, 2009)

- b. *Void* adalah lubang-lubang yang relatif dalam dan lebar pada beton. *Void* pada beton dapat ditimbulkan oleh berbagai sebab: diantaranya :Pemadatan yang dilakukan dengan vibrator kurang baik, karena jarak antar bekisting dengan tulangan atau jarak antar tulangan terlalu sempit sehingga bagian mortar tidak dapat mengisi rongga antara agregat kasar dengan baik (Isneini, 2009). Kerusakan *Void*s yang disebabkan faktor nonstruktural lebih

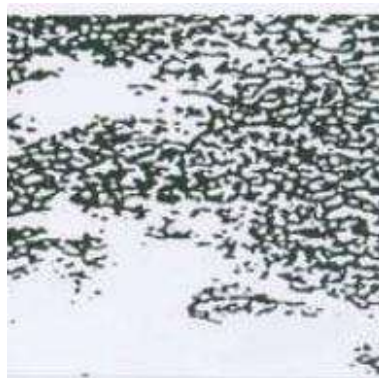
banyak terjadi pada elemen struktur yang tinggi/panjang (Alfredo et al., 2015).



Gambar 2. *Voids*.

(Sumber : Isneini, 2009)

- c. *Scalling* adalah keadaan dimana adanya kelupasan dangkal pada permukaan beton yang disebabkan oleh berbagai faktor, salah satunya adalah paparan berulang terhadap proses pembekuan dan pencairan yang menyebabkan permukaan beton terlepas atau mengelupas (Isneini, 2009).



Gambar 3. *Scalling*.

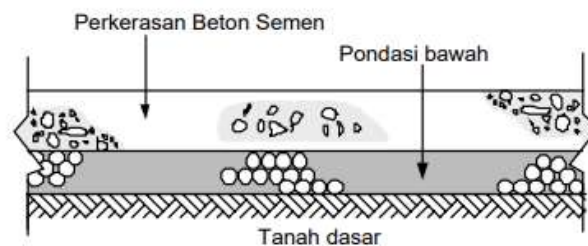
(Sumber : Isneini, 2009)

2.2. *Rigid pavement*

Rigid pavement (perkerasan kaku) adalah tipe perkerasan jalan yang menggunakan beton semen sebagai lapis pengikat utama sehingga membentuk pelat beton yang mentransfer beban melalui aksi lekukan (*slab*

action) ke tanah dasar dan lapis pondasi. konstruksi ini umumnya memiliki kekakuan tinggi, umur rencana yang lebih panjang, dan kebutuhan pemeliharaan yang berbeda dibanding perkerasan lentur (Sidabutar et al., 2021).

Perkerasan kaku memiliki fleksibilitas besar yang berperan menuangkan bobot ke tanah bawah dengan area yang lumayan besar. Tipikal struktur perkerasan kaku dapat diamati pada gambar 4.



Gambar 4. Struktur Perkerasan Kaku.

(sumber : Bina marga, 2003)

2.3. *Non-Destructive Test*

Non-Destructive Test (NDT) ialah suatu metode pengujian fisik terhadap material atau benda uji yang bertujuan mendeteksi cacat atau karakteristik struktur tanpa harus merusak atau menghancurkan benda tersebut (misalnya retak dan *void*). Dalam konteks beton, NDT banyak dimanfaatkan untuk mengevaluasi mutu, homogenitas, dan kondisi lapangan beton yang sudah dipasang (J. Helal et al., 2015)

Berikut beberapa metode NDT yang umum digunakan untuk beton:

1. *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Metode ini menggunakan gelombang ultrasonik yang dikirim ke dalam material beton, dipantulkan atau diteruskan melewati material dan kemudian dianalisis berdasarkan kecepatan gelombang atau waktu tempuh. Gelombang yang melalui beton akan merambat lebih lambat jika terdapat retak, *void*, atau kualitas beton rendah.

2. Radiografi (*X-ray / Gamma Radiography*)

Dalam metode ini, sinar-X atau sinar gamma ditembakkan melalui elemen beton dan ditangkap di film atau detektor di sisi berlawanan. Cacat internal seperti inklusi, rongga, atau retak akan memengaruhi intensitas sinar yang melewati beton, sehingga tercipta citra cacat pada film atau detektor.

3. Termografi Inframerah (*Infrared Thermography*)

Prinsip kerjanya adalah dengan menggunakan kamera inframerah untuk mengamati distribusi suhu permukaan beton. Cacat internal seperti *void* (rongga) atau retak dapat menyebabkan perubahan pola panas karena konduktivitas termal yang berbeda. Menurut tinjauan oleh Tomita & Chew (2022), metode termografi inframerah terbukti efektif untuk memetakan cacat dangkal seperti delaminasi pada struktur beton serta sangat berguna sebagai teknik skrining awal karena sifatnya yang non-kontak.

4. *Hammer Test (Rebound Hammer)*

Metode ini menggunakan sebuah alat palu pantul (*rebound hammer*) untuk memberikan tumbukan ringan ke permukaan beton, kemudian mengukur pantulan (*rebound*) massa pada alat tersebut. Nilai pantulan ini berkaitan dengan kekerasan permukaan beton dan bisa digunakan sebagai indikasi kuat tekan beton atau konsistensi permukaan.

2.4. Termografi Inframerah

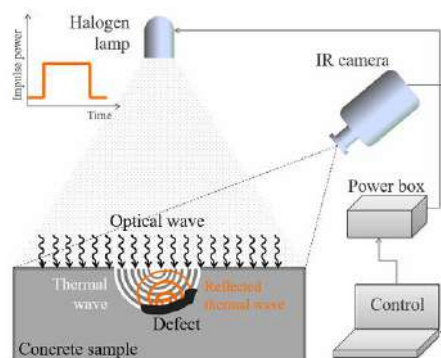
Termografi inframerah (*Infrared Thermography*, IRT) merupakan salah satu teknik pengujian nondestruktif (NDT) yang memanfaatkan pancaran radiasi inframerah dari permukaan material untuk mendeteksi anomali termal akibat kerusakan internal maupun eksternal pada elemen beton atau struktur lainnya. Teknik ini memungkinkan identifikasi cacat seperti delaminasi, rongga, retak atau korosi tulangan tanpa kontak langsung dengan komponen struktur, sehingga cocok untuk inspeksi area luas atau struktur yang sulit dijangkau (Tomita & Chew, 2022). Dalam konteks struktur beton, metode ini cocok untuk area yang luas (misalnya pelat jembatan, dinding besar dan *rigid pavement*) yang sulit dijangkau secara konvensional.

2.4.1. Termografi Aktif

Termografi aktif adalah teknik IRT yang memerlukan sumber energi eksternal untuk menciptakan gradien suhu antara bagian yang rusak dan bagian yang baik dari sampel yang diperiksa. Misalnya, sumber panas seperti lampu halogen, lampu xenon, gelombang mikro, atau *ultrasound* dapat digunakan untuk memanaskan atau mendinginkan permukaan beton

Prinsipnya adalah setelah pemanasan, material yang memiliki cacat (rongga, retak) akan merespons secara berbeda terhadap aliran panas dibanding material yang baik ini memunculkan pola suhu permukaan yang dapat direkam oleh kamera inframerah.

Keunggulan termografi aktif antara lain yaitu deteksi yang lebih terkontrol karena sumber panas bisa disetel, mampu mendeteksi cacat dekat permukaan dengan lebih baik. Namun, terdapat juga keterbatasan diantaranya perlu sumber pemanasan/penyinaran yang cukup, kontrol kondisi pemanasan yang uniform, pengaruh panas lingkungan, serta hubungan deteksi dengan kedalaman dan ukuran cacat yang kompleks (Milovanović & Banjad Pečur, 2016).



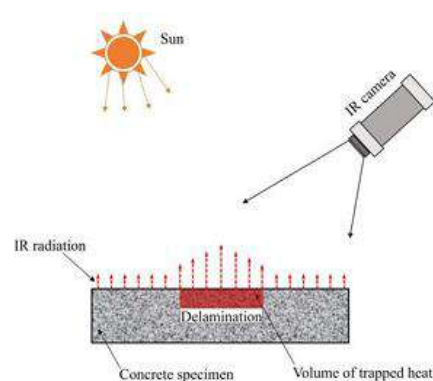
Gambar 5. Contoh pengujian termografi aktif.

(sumber : Milovanović et al., 2020)

2.4.2. Termografi Pasif

Berbeda dari metode aktif, termografi pasif memanfaatkan radiasi panas alami dari lingkungan seperti sinar matahari, udara panas, atau penguapan kelembaban tanpa sumber energi eksternal tambahan. Teknik ini mendeteksi perbedaan suhu alami pada permukaan beton untuk mengidentifikasi anomali termal seperti delaminasi, retakan, rongga, dan infiltrasi kelembaban. Menurut penelitian Nair et al. (2023), termografi pasif mampu mendeteksi cacat seperti *honeycomb* dan delaminasi dengan menganalisis variasi suhu pada citra termal yang dihasilkan oleh kamera inframerah, meskipun akurasi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan saat pengujian.

Keunggulan dari metode ini yaitu tidak perlu sistem pemanasan khusus, lebih sederhana secara operasional. Namun, kelemahannya cukup signifikan yaitu sangat tergantung kondisi lingkungan (matahari, angin, emisi langit), sulit mengendalikan gradien panas, dan deteksi kedalaman cacat serta ukuran cacat menjadi terbatas. Misalnya, Milovanović & Banjad Pečur mengemukakan bahwa termografi pasif terbatas untuk elevasi tertentu dan bergantung kuat pada kondisi lingkungan.



Gambar 6. Contoh pengujian termografi pasif.

(sumber : Mac et al., 2019)

2.5. *Principal Component Analysis (PCA)*

Principal Component Analysis (PCA) merupakan metode analisis statistik multivariat yang digunakan untuk mereduksi dimensi data dengan mempertahankan sebanyak mungkin informasi dari variansi aslinya. PCA bekerja dengan mentransformasikan sekumpulan variabel saling berkorelasi menjadi sekumpulan variabel baru yang tidak berkorelasi satu sama lain, yang disebut komponen utama (*principal components*) (Jolliffe & Cadima, 2016)

Dalam konteks termografi inframerah, PCA digunakan untuk mengolah urutan frame termal sehingga pola perubahan suhu yang signifikan akibat adanya cacat seperti retakan atau *void* dapat diidentifikasi dengan lebih jelas dan objektif (An et al., 2015).

PCA dalam aplikasi termografi sering disebut *Principal Component Thermography (PCT)*. Dalam pendekatan ini, kumpulan gambar termal (termogram) diproses menjadi serangkaian *Empirical Orthogonal Functions (EOF)* yang mewakili mode statistik ortogonal. EOF ini berfungsi menonjolkan anomali suhu yang berkaitan dengan cacat di dalam material. Mode awal (EOF1, EOF2, dan EOF3) biasanya mengandung informasi termal utama, sedangkan mode yang lebih tinggi umumnya diasosiasikan dengan noise (Parvatani, 2009; Raja et al., 2021).

Menurut Zhang et al. (2010), keunggulan PCA dalam pengolahan citra adalah kemampuannya untuk melakukan denoising dengan efektif. PCA dapat memisahkan informasi utama dari komponen gangguan latar belakang, sehingga kontras termal pada area cacat menjadi lebih jelas. Pendekatan ini sangat berguna pada termografi pasif, di mana perbedaan suhu alami antar area cacat dan sehat cenderung kecil sehingga sulit diidentifikasi secara visual (Scott et al., 2012).

Selain itu, PCA juga mendukung proses reduksi dimensi data termal. Serangkaian gambar termal yang biasanya terdiri dari puluhan hingga ratusan frame dapat direduksi menjadi beberapa komponen utama yang mewakili keseluruhan informasi penting (An et al., 2015). Hal ini tidak hanya mempercepat analisis, tetapi juga memudahkan interpretasi hasil pengujian tanpa mengurangi akurasi deteksi (Milovanović et al., 2020).

Secara matematis, PCA didasarkan pada dekomposisi nilai singular (*Singular Value Decomposition/SVD*) dari matriks data termal X berukuran $m \times n$, di mana m adalah jumlah piksel dan n adalah jumlah frame. Hasil dekomposisi dinyatakan sebagai:

$$T = U\Sigma V^T \quad (1)$$

dengan:

U = matriks vektor eigen (*principal component vectors*),

Σ = matriks diagonal yang berisi nilai singular (besarnya variansi tiap komponen)

V^T = proyeksi termal dari tiap frame terhadap EOF (*Principal Component* atau PC)

Komponen utama dengan nilai singular terbesar menunjukkan kontribusi variansi terbesar dalam data, sehingga paling representatif untuk mendeteksi pola termal akibat kerusakan beton.

Dalam praktiknya, software seperti MATLAB, Python, dan R banyak digunakan untuk implementasi PCA pada pengolahan citra termal (Milovanović et al., 2020). MATLAB khususnya memudahkan visualisasi EOF dan PC untuk menginterpretasi hasil termografi.

Penerapan PCA dalam deteksi kerusakan beton telah terbukti efektif. Penelitian Rajic (2002) menunjukkan bahwa PCA dapat meningkatkan kontras area cacat hingga 30% dibandingkan analisis termogram mentah. Sementara itu, (Milovanović & Banjad Pečur, 2016) melaporkan bahwa metode ini mampu memperjelas batas cacat dangkal pada permukaan beton

hingga kedalaman beberapa milimeter dengan efisiensi tinggi. Dengan demikian, PCA tidak hanya berfungsi sebagai alat statistik, tetapi juga sebagai metode analisis citra cerdas untuk mendeteksi kerusakan internal secara non-destruktif, cepat, dan presisi. Kartorono et al. (2023) menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dan *noise* atmosfer menyebabkan perbedaan antara hasil termografi dan pengukuran termokopel. Kondisi ini mendukung penggunaan PCA, karena PCA mampu memisahkan sinyal utama dari komponen gangguan sehingga pola kerusakan seperti *void* dan retak dapat terlihat lebih jelas.

2.6. *Thermal Contrast*

Thermal contrast adalah perbedaan suhu antara area cacat dan area sehat pada suatu material yang terdeteksi melalui citra termal. Dalam konteks pengujian beton, *thermal contrast* menggambarkan sejauh mana perbedaan suhu akibat variasi sifat termal material seperti konduktivitas panas, densitas, dan kapasitas panas spesifik (Benítez et al., 2008).

Nilai *thermal contrast* yang tinggi menunjukkan bahwa area cacat (misalnya *void* atau retakan) memiliki kemampuan penghantaran panas yang berbeda dibandingkan area normal di sekitarnya. Konsep ini menjadi dasar utama dalam interpretasi hasil termografi inframerah.

Secara matematis, kontras termal pada waktu t dapat dinyatakan dengan persamaan (Halloua et al., 2016).

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_s(t) \quad (2)$$

Keterangan:

$T_d(t)$ = suhu rata-rata pada area cacat (*defect area*).

$T_s(t)$ = suhu rata-rata pada area sehat (*sound area*).

Perbedaan suhu ini (ΔT) menjadi indikator utama keberadaan cacat seperti retakan, delaminasi, atau *void* di dalam struktur beton. Pada metode termografi pasif, nilai *thermal contrast* sangat dipengaruhi oleh beberapa

faktor lingkungan, antara lain waktu pengambilan data, intensitas dan arah datangnya radiasi matahari, serta sifat optik dan sifat pancaran panas permukaan beton (Sirca Jr & Adeli, 2018)

Menurut Pedram et al. (2022), *thermal contrast* maksimum umumnya terjadi pada saat gradien suhu antara permukaan beton dan udara sekitar mencapai puncaknya, biasanya pada pagi atau sore hari. Oleh karena itu, penentuan waktu pengujian yang tepat sangat penting agar kontras termal yang dihasilkan optimal dan hasil termogram lebih mudah dianalisis.

Dalam praktik penelitian, nilai *thermal contrast* juga digunakan untuk menentukan waktu optimal penerapan PCA. Dengan memilih gambar termal yang diambil pada saat perbedaan suhu paling signifikan, proses ekstraksi komponen utama oleh PCA akan menghasilkan visualisasi cacat yang lebih jelas (Benítez et al., 2008; Milovanović & Banjad Pečur, 2016).

2.7. Alat yang digunakan

Pada penelitian termografi inframerah terdapat instrumen yang akan digunakan seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kamera Inframerah (FLIR E8-XT)

(sumber : <https://mouser.co.id>)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium dengan pendekatan *Non-Destructive Test* (NDT). Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi *void* dan retakan pada struktur beton jenis *rigid pavement* menggunakan termografi inframerah pasif dan menganalisis hasilnya dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA).

Penelitian ini menggunakan objek berupa benda uji beton berbentuk pelat berukuran 100 x 100 x 22 cm sebanyak 3 buah. Benda uji memiliki kuat tekan rencana K-300 dan masing-masing diantaranya memiliki lebar retakan dengan variasi $w_{cr1} = 2$ mm, $w_{cr2} = 1$ mm, dan $w_{cr3} = 0,5$ mm dan variasi kedalaman retakan $d_{cr1} = 1$ cm, $d_{cr2} = 2$ cm, dan $d_{cr3} = 3$ cm. Retakan buatan ini dibuat dengan menggunakan plastik mika, yang dipilih karena memiliki konduktivitas termal rendah dan sifat termal yang mendekati udara, sehingga mampu merepresentasikan kondisi retakan aktual yang berisi rongga udara dan menghambat perpindahan panas. Serta memiliki *void* buatan yang terletak pada permukaan beton, serta 3 dan 5 cm di bawah permukaan beton. Kemudian benda uji beton dan kolom ini akan diuji menggunakan kamera inframerah dengan variasi jarak kamera terhadap sampel beton yaitu $d_{cam1} = 0,5$ m, $d_{cam2} = 1$ m, $d_{cam3} = 1,5$ m, $d_{cam4} = 2$ m, dan $d_{cam5} = 2,5$ m. Data citra termal yang diperoleh selanjutnya diolah menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) untuk menghasilkan *Empirical Orthogonal Functions* (EOF) sebagai representasi pola dominan perubahan suhu. Hasil ini memperjelas kontras termal antara area cacat dan area sehat, sehingga *void* dan retakan dapat teridentifikasi dengan lebih jelas.

3.2. Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung untuk melakukan pemeriksaan karakteristik material penyusun beton dan pembuatan benda uji beton. Pengujian termografi inframerah dilakukan di depan Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Lampung.

3.3. Peralatan dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1. Peralatan Pengujian Material

Peralatan penelitian material dan mix design digunakan sebagai alat bantu dalam proses pengujian dan pembuatan benda uji beton, seperti:

- a. Oven
- b. Mesin pengaduk beton (molen)
- c. Satu set alat uji *slump*
- d. Bejana silinder untuk uji berat jenis semen
- e. Botol *Le Chatelier*
- f. Tabung Piknometer
- g. Satu set saringan agregat
- h. Bekisting untuk benda uji
- i. Cetakan kerucut pasir
- j. *Compression Testing Machine (CTM)*

3.3.2. Peralatan pengujian Termografi Inframerah

- a. Kamera inframerah

Kamera inframerah yang digunakan adalah tipe FLIR E8-XT dengan resolusi 240 x 360 piksel. Akuisisi citra termal dilakukan secara manual melalui pengambilan gambar (*image capturing*)

sebanyak 40 kali untuk setiap variasi jarak pengambilan gambar, dengan interval waktu 10 detik antar pengambilan gambar. Spesifikasi kamera seperti pada Tabel 1:

Tabel 1. Spesifikasi kamera FLIR E8-XT

<i>Object temperature range</i>	-20°C to 550°C (-4°F to 1022°F) <i>in two ranges</i>
<i>Accuracy</i>	$\pm 3,6^{\circ}\text{F}$ (2°C)
<i>Thermal Sensitivity/NETD</i>	$<0.05^{\circ}\text{C}$ (0.09°F) / <50 mK
<i>Field of View (FOV)</i>	$45^{\circ} \times 34^{\circ}$
<i>Image modes</i>	<i>Thermal MSX, Thermal, Picture-in-Picture, Thermal blending, Digital camera.</i>

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

3.3.3. Bahan yang digunakan

Berikut merupakan bahan yang akan digunakan pada pembuatan benda uji beton:

- a. *Portland Composite Cement*
- b. Agregat kasar
- c. Agregat halus
- d. Air
- e. Oli
- f. Bola pingpong dan bola plastik (*void* buatan)
- g. Plastik mika (retak buatan)

3.4. Pemeriksaan Material

Tahap awal penelitian ini diawali dengan pengujian terhadap material penyusun beton yang terdiri atas agregat kasar, agregat halus, dan semen. Seluruh hasil pengujian dievaluasi berdasarkan standar yang telah ditetapkan

oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Hanya data material yang memenuhi kriteria sesuai standar tersebut yang digunakan sebagai dasar dalam perhitungan proporsi campuran beton normal.

Pengujian terhadap agregat halus meliputi beberapa parameter sebagai berikut:

- a. Penentuan kadar air agregat halus sesuai dengan ASTM C 566-78.
- b. Pengujian berat jenis dan daya serap agregat halus berdasarkan ASTM C 128-98.
- c. Penentuan kadar lumpur agregat halus sesuai dengan ASTM C 117-80.
- d. Analisis gradasi agregat halus mengacu pada ASTM C 33-93.
- e. Penentuan berat volume agregat halus sesuai dengan ASTM C 29.

Pengujian terhadap agregat kasar dilakukan dengan parameter sebagai berikut:

- a. Penentuan kadar air agregat kasar berdasarkan ASTM C 566-78.
- b. Pengujian berat jenis dan daya serap agregat kasar mengacu pada ASTM C 127-88.
- c. Penentuan kadar lumpur agregat kasar sesuai dengan ASTM C 117-80.
- d. Analisis gradasi agregat kasar sesuai dengan ASTM C 33-93.
- e. Penentuan berat volume agregat kasar berdasarkan ASTM C 29.

Pengujian terhadap semen meliputi parameter berikut:

- a. Penentuan berat jenis semen sesuai dengan ASTM C 188-95.
- b. Pengujian waktu pengikatan awal semen berdasarkan ASTM C 191-08.
- c. Penentuan kehalusan semen mengacu pada ASTM C 430.

3.5. Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Dalam penelitian ini, mutu beton yang direncanakan adalah K-300, dengan kuat tekan rencana ($f'c$) sebesar 25 MPa pada umur 28 hari. Perancangan

campuran beton dilakukan berdasarkan SNI 7656:2012 tentang Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Massa.

3.6. Pembuatan Sampel Benda Uji

Penelitian ini menggunakan benda uji sebanyak 6 buah yang terdiri dari 3 benda uji beton berbentuk kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm untuk pengujian kuat tekan dan 3 buah beton berbentuk pelat dengan ukuran 100 x 100 x 22 cm yang telah diberi *void* dan retakan buatan untuk pengujian termografi inframerah. Kode dan Jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kode dan jumlah benda uji.

Pengujian	Kode	Umur Beton (Hari)
Kuat Tekan	KT-1	28
	KT-2	
	KT-3	
Termografi Inframerah	IRT-1	28
	IRT-2	
	IRT-3	

Benda uji beton untuk uji termografi inframerah diberi retakan buatan (*artificial crack*) dan *void* buatan dengan cara menancapkan/memasukan mika dengan ukuran panjang 10 cm serta bola pingpong dan bola plastik sebagai *void* buatan. Benda uji pertama diberikan 3 mika dengan lebar $W_{cr1} = 2$ mm dengan variasi kedalaman d_{cr1} , d_{cr2} , dan d_{cr3} serta 9 *void* buatan yang terletak 0,5 cm permukaan beton dengan variasi ukuran yang berbeda seperti pada tabel 3. Benda uji kedua diberikan 3 mika dengan lebar $W_{cr2} = 1$ mm dengan variasi kedalaman d_{cr1} , d_{cr2} , dan d_{cr3} serta 9 *void* buatan yang terletak 3 cm dari permukaan beton. Benda uji ketiga diberikan 3 mika dengan lebar $W_{cr3} = 0,5$ mm dengan variasi kedalaman d_{cr1} , d_{cr2} , dan d_{cr3} serta 9 *void* buatan yang terletak 5 cm dari permukaan beton.

Pada pembuatan benda uji, digunakan tulangan dowel Ø32 mm, serta tulangan Ø12 mm sebagaiudukan dowel. Letak *void*, retakan buatan (*artificial crack*) dan tulangan tertampil pada Gambar 8 dan 9. Detail panjang, lebar, dan kedalaman retak dan *void* buatan pada benda uji tertampil pada Tabel 5.

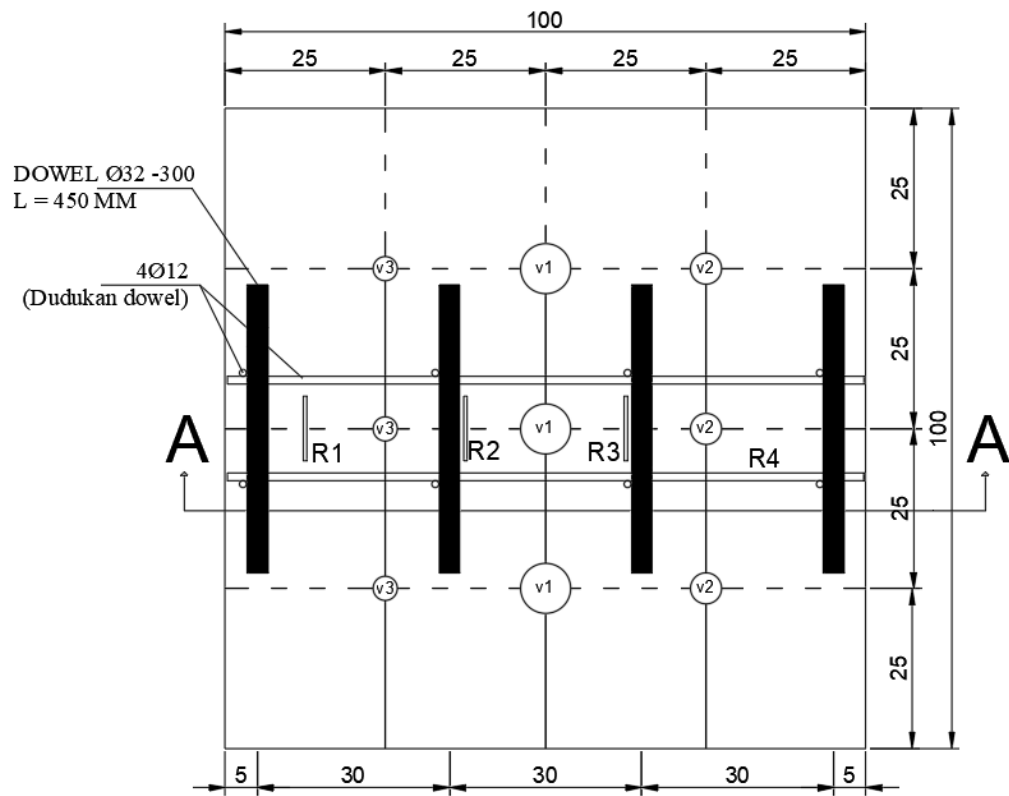
Tabel 3. Variasi ukuran *void*

Kode Void	Diameter (cm)	Jumlah (buah)
V1	4	3
V2	2,5	3
V3	2	3

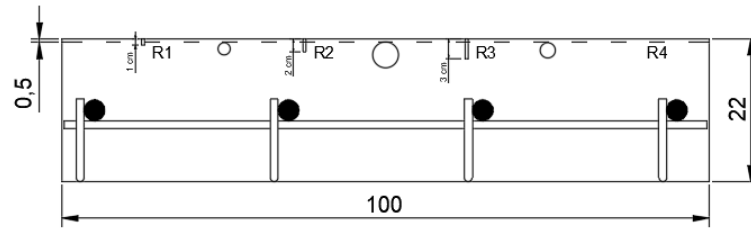
Tabel 4. Diameter ruji (dowel)

No	Tebal pelat beton, h (mm)	Diameter ruji (mm)
1	$125 < h \leq 140$	20
2	$140 < h \leq 160$	24
3	$160 < h \leq 190$	28
4	$190 < h \leq 220$	32
5	$220 < h \leq 250$	36

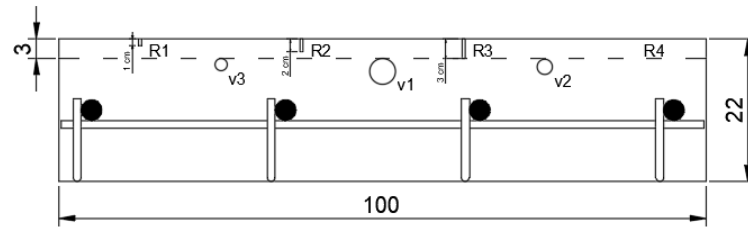
(sumber : Pd T-14,2003)



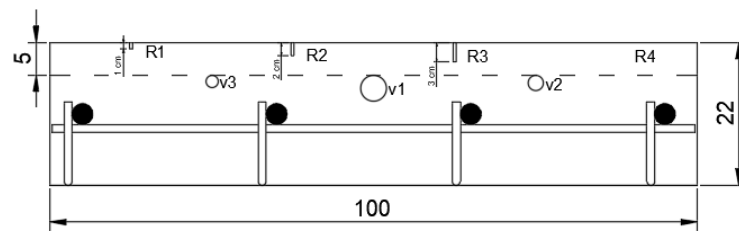
Gambar 8. Letak void dan retakan buatan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 9. Potongan A-A benda uji beton (a) Sampel IRT-1 (b) Sampel IRT-2 (c) Sampel IRT-3

Tabel 5. Rincian data retakan pada benda uji beton

Kode Sampel	Kode Retakan	Kedalaman Retakan (cm)	Lebar Retakan (mm)	Panjang Retakan (cm)
IRT-1	R ₁	1	2	10
	R ₂	2	2	10
	R ₃	3	2	10
	R ₄	0	0	0
IRT-2	R ₁	1	1	10
	R ₂	2	1	10
	R ₃	3	1	10
	R ₄	0	0	0
IRT-3	R ₁	1	0,5	10
	R ₂	2	0,5	10
	R ₃	3	0,5	10
	R ₄	0	0	0

3.7. Pengujian Benda Uji

Dalam penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian utama. Pengujian pertama adalah pengujian kuat tekan beton yang menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan hingga mencapai batas keruntuhannya. Selanjutnya dilakukan pula pengujian termografi inframerah menggunakan kamera FLIR E8-XT, yang berfungsi untuk mendeteksi distribusi suhu pada permukaan benda uji.

3.7.1. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) untuk mengetahui sejauh mana beton mampu menahan beban tekan hingga mengalami keruntuhan.

Pengujian ini merupakan tahapan penting dalam menentukan performa dan kualitas struktural beton.

Pada penelitian ini, kuat tekan rencana beton yang ditargetkan untuk benda uji adalah sebesar 25 MPa (mutu K-300) pada umur 28 hari, sesuai dengan hasil perencanaan campuran beton.

3.7.2. Pengujian Termografi Inframerah

Pengujian termografi inframerah dilakukan untuk mengidentifikasi *void* buatan pada beton melalui perbedaan suhu permukaan yang terdeteksi dengan bantuan kamera inframerah. Pengujian ini dilakukan pada saat kondisi *thermal contrast* maksimum, yaitu ketika perbedaan suhu antara area cacat dan area utuh paling besar. Dalam penelitian ini digunakan metode termografi pasif, karena pengukuran hanya memanfaatkan matahari sebagai sumber eksitasi panas sehingga kondisi pengujian mendekati keadaan aktual di lapangan.

Pada tahap pengujian, benda uji beton diletakkan di area terbuka pada permukaan datar sehingga sisi atas beton dapat menerima paparan sinar matahari secara merata. Setelah proses pemanasan alami berlangsung, dilakukan pengukuran suhu permukaan benda uji menggunakan kamera inframerah tipe FLIR E8-XT untuk memperoleh citra termal.

Selanjutnya, dilakukan pengambilan citra termal sebanyak 40 kali pada setiap jarak pengambilan (D_{cam}). Setiap pengambilan gambar dilakukan dengan interval waktu 10 detik untuk memastikan perubahan suhu terekam secara konsisten dan mencegah bias akibat fluktuasi termal mendadak. Data hasil perekaman suhu tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA) guna mengidentifikasi

anomali termal yang mengindikasikan adanya *void* pada struktur beton. Hasil analisis termografi ini digunakan untuk mendeteksi serta memetakan lokasi potensial terjadinya kerusakan internal pada benda uji beton.

3.8. Pengolahan Data berdasarkan *Principal Component Analysis* (PCA)

Metode *Principal Component Analysis* (PCA) pada penelitian ini digunakan sebagai teknik pengolahan citra (*image processing*) untuk meningkatkan kontras termal serta mengidentifikasi pola distribusi suhu pada hasil uji *thermography passive*. PCA diterapkan pada data citra termal untuk memisahkan informasi utama (*signal*) dari gangguan (*noise*) sehingga anomali suhu akibat keberadaan retakan dapat ditampilkan dengan lebih jelas.

Dalam pengolahan citra termal, penerapan PCA pada deret waktu termogram dikenal sebagai *Principal Component Thermography* (PCT). Metode ini mengevaluasi perubahan kontras termal terhadap waktu sehingga variasi suhu yang disebabkan oleh perbedaan sifat termal material dapat diidentifikasi secara lebih efektif.

3.8.1. Akuisisi dan Pra-Pengolahan Data Termal

Data penelitian diperoleh dari hasil pengujian *thermography passive* menggunakan kamera inframerah. Citra termal hasil pengujian diekspor menggunakan perangkat lunak FLIR Tools dalam bentuk deret gambar termogram. Data yang diekspor kemudian diseleksi berdasarkan waktu terjadinya *thermal contrast* maksimum agar perbedaan suhu antara area retak dan area beton sehat dapat ditangkap secara optimal.

Selanjutnya, deret termogram tersebut dipersiapkan untuk proses analisis PCA dengan tujuan meningkatkan kualitas visual citra serta

meminimalkan pengaruh gangguan lingkungan dan noise pada data termal.

3.8.2. Penyusunan Matriks Data Termal

Citra termal yang semula berbentuk matriks dua dimensi disusun ulang menjadi matriks dua dimensi berbasis ruang-waktu (*spatial-temporal matrix*). Setiap piksel pada citra termal direpresentasikan sebagai satu baris, sedangkan setiap waktu pengambilan citra direpresentasikan sebagai satu kolom.

Secara matematis, matriks data termal dapat dinyatakan sebagai:

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdots & T_{mn} \end{bmatrix}$$

dengan:

T_{ij} = nilai suhu piksel ke- i pada waktu ke- j

m = jumlah piksel

n = jumlah frame termogram

3.8.3. Dekomposisi Matriks

Proses *Principal Component Analysis* (PCA) pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD). Metode ini digunakan untuk memecah matriks data termal menjadi beberapa komponen utama sehingga pola distribusi suhu yang penting dapat dipisahkan dari gangguan (*noise*).

Secara matematis, matriks data termal T didekomposisi menggunakan persamaan berikut:

$$T = U\Sigma V^T$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa matriks T diuraikan menjadi tiga matriks, yaitu:

1. U merupakan matriks yang berisi pola distribusi suhu utama pada permukaan beton. Matriks ini dikenal sebagai *Empirical Orthogonal Function* (EOF) dan digunakan untuk menampilkan lokasi anomali suhu secara visual.
2. Σ merupakan matriks diagonal yang berisi nilai singular. Nilai ini menunjukkan seberapa besar kontribusi masing-masing pola suhu terhadap keseluruhan data termal. Semakin besar nilainya, semakin penting pola tersebut.
3. V^T merupakan matriks yang menggambarkan perubahan suhu terhadap waktu selama proses pengujian berlangsung.

Dengan menggunakan metode SVD, variasi suhu yang dominan dapat diidentifikasi tanpa kehilangan informasi utama. Pola suhu yang memiliki kontribusi kecil, yang umumnya berkaitan dengan gangguan lingkungan atau noise, dapat dipisahkan dari pola suhu utama yang berkaitan dengan keberadaan retakan pada beton.

3.8.4. Ekstraksi *Empirical Orthogonal Function* (EOF)

Empirical Orthogonal Function (EOF) merupakan hasil utama dari proses PCA yang menampilkan pola distribusi suhu dominan pada permukaan beton. EOF diperoleh dari kolom-kolom matriks U , di mana setiap EOF merepresentasikan satu mode variasi termal yang saling ortogonal.

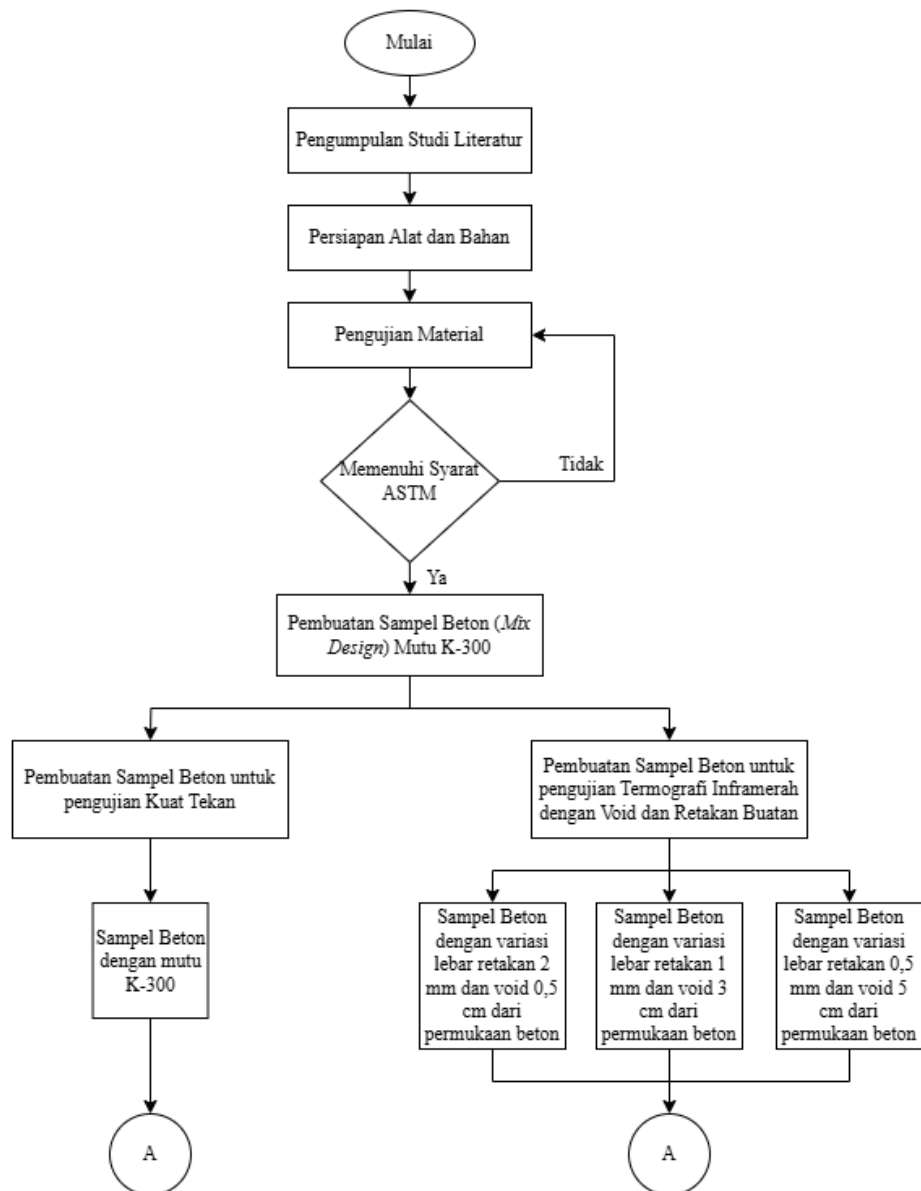
EOF pertama umumnya menggambarkan distribusi suhu global akibat pemanasan lingkungan, sedangkan EOF selanjutnya menunjukkan variasi lokal yang lebih spesifik. Anomali suhu akibat keberadaan retakan pada beton cenderung muncul pada EOF tertentu yang

memiliki kontribusi variansi signifikan namun tidak mendominasi keseluruhan data.

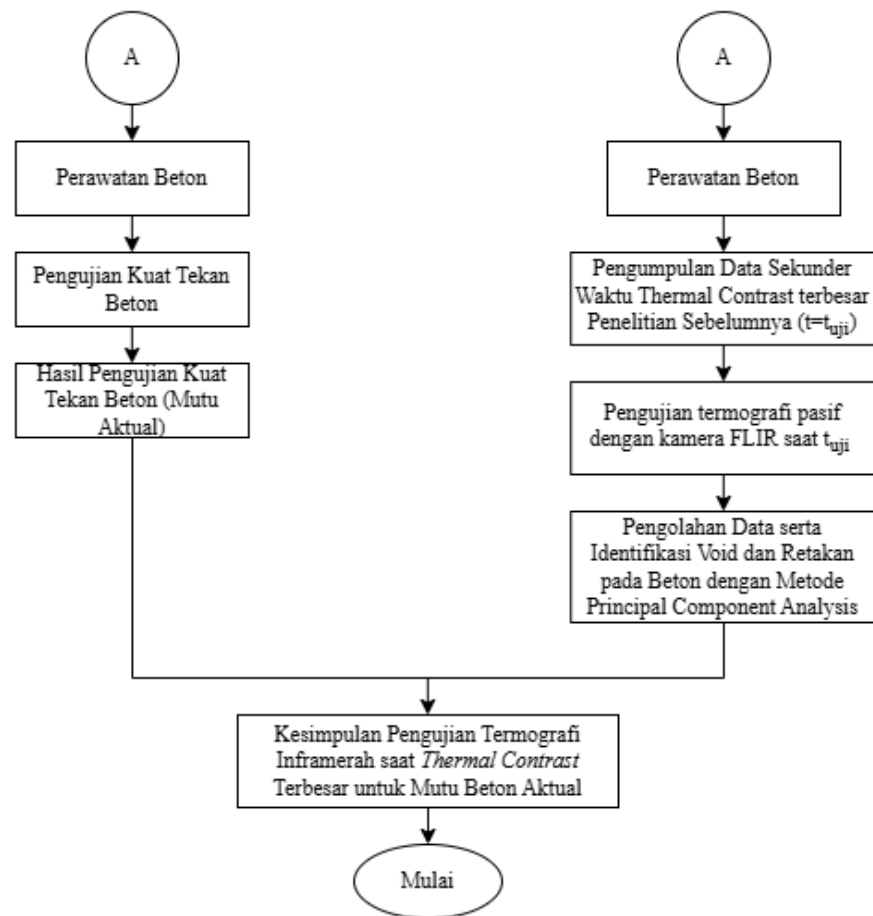
3.8.5. Analisis Hasil PCA

Analisis hasil PCA dilakukan dengan menginterpretasikan citra EOF yang dihasilkan. Identifikasi retakan didasarkan pada perbedaan kontras termal antara area yang mengalami anomali suhu dengan area beton sehat di sekitarnya. Hasil analisis ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan metode PCA dalam meningkatkan visibilitas retakan pada pengujian thermography passive.

3.9. Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram alir penelitian.



Gambar 11. Diagram alir penelitian. (Lanjutan)

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai pemanfaatan metode termografi inframerah yang dikombinasikan dengan analisis *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mendeteksi *void* dan retakan pada beton, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- a. Metode *Principal Component Analysis* (PCA) mampu mendeteksi *void* buatan pada beton dengan baik, terutama pada sampel IRT-1 (Kedalaman *void* 0,5 cm) dengan jarak kamera 0,5 – 1,5 m. Hasil deteksi yang diperoleh hampir sama dengan kondisi aktual. Nilai akurasi yang didapat juga sangat tinggi, yaitu rata-rata di atas 90%. Pada jarak 2–2,5 m serta sampel IRT-2 dan IRT-3, *void* tidak dapat terdeteksi. Sehingga metode ini hanya efektif digunakan pada jarak dekat dengan ukuran *void* yang cukup besar.
- b. Hasil identifikasi retakan menggunakan PCA menunjukkan bahwa metode ini memiliki keterbatasan yang cukup signifikan, di mana retakan hanya terdeteksi pada sampel IRT-1 kondisi R3 (lebar 2 mm, kedalaman 3 cm) pada jarak 0,5 m. Pada termogram mentah, panjang retakan masih dapat terdeteksi pada beberapa kondisi dengan akurasi yang cukup baik, namun lebar retakan tidak dapat teridentifikasi sama sekali akibat keterbatasan resolusi piksel kamera. Hal ini menunjukkan bahwa kedua kondisi pengujian tersebut masih memiliki keterbatasan dalam mendeteksi retakan secara menyeluruh..
- c. Perbedaan tingkat kejelasan deteksi *void* dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya diameter *void*, kedalaman *void*, dan jarak kamera. Semakin kecil diameter *void*, kontras suhu yang terbentuk semakin lemah

sehingga *void* semakin sulit terdeteksi. Kedalaman *void* yang semakin besar juga cenderung memperlemah sinyal termal, hal ini dibuktikan dengan tidak terdeteksinya *void* pada sampel IRT-2 dan IRT-3. Begitu pula dengan jarak kamera, semakin jauh jarak pengambilan citra maka resolusi piksel per satuan luas semakin menurun sehingga perbedaan suhu antar area tidak dapat ditangkap dengan jelas.

- d. Perbedaan tingkat kejelasan deteksi retakan dipengaruhi oleh ukuran retakan yang sangat kecil dibandingkan dimensi sampel (100×100 cm), sehingga perbedaan suhu yang terbentuk tidak cukup signifikan untuk teridentifikasi oleh PCA. Faktor lain yang berkontribusi adalah ketidaksesuaian dimensi retakan aktual akibat proses pembuatan sampel yang kurang optimal, khususnya pada sampel IRT-1 kondisi R3 yang menunjukkan lebar deteksi jauh melebihi rencana.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

- a. Pada penelitian selanjutnya, disarankan untuk menggunakan variasi ukuran *void* dan retakan yang lebih beragam.
- b. Proses pembuatan sampel perlu diperhatikan dengan lebih baik agar dimensi *void* dan retakan sesuai dengan rencana, sehingga hasil pengujian dapat lebih representatif dan akurat.
- c. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan kamera termografi dengan resolusi spasial yang lebih tinggi. Penggunaan kamera beresolusi lebih tinggi menjadi syarat utama agar deteksi retakan berukuran kecil dapat dilakukan secara lebih akurat.
- d. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan minimal 3 sampel pada setiap variasi kedalaman *void* dan lebar retakan. Jumlah tersebut dinilai cukup untuk memvalidasi kecenderungan yang teramati dalam penelitian ini, mengingat hasil pengujian termografi sangat dipengaruhi

oleh kondisi lingkungan dan waktu pengambilan citra, sehingga replikasi diperlukan untuk meminimalisasi potensi hasil yang tidak representatif.

- e. Penelitian selanjutnya disarankan untuk membandingkan hasil deteksi termografi inframerah berbasis PCA dengan metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) guna mengevaluasi efektivitas masing-masing metode dalam mendeteksi void dan retakan pada *rigid pavement*.
- f. Penelitian selanjutnya dapat mengaplikasikan metode yang sama langsung pada struktur *rigid pavement* di lapangan, bukan hanya pada sampel laboratorium, untuk mengetahui efektivitas metode ini dalam kondisi nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfredo, D., Hutomo, K., Sudjarwo, P., & Buntoro, J. (2015). *Analisa Penyebab Dan Metode Perbaikan Yang Tepat Pada Beton Yang Disebabkan Oleh Faktor Non-Struktural*. Sipil, 1(1).
- An, N., Xie, J., Zheng, X., & Gao, X. (2015). *Application of PCA in concrete infrared thermography detection*. 2015 2nd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences, 809–814.
- Az-zahra. (2025). *Identifikasi Retakan Permukaan Beton Menggunakan Metode Principal Component Analysis (Pca) Dari Hasil Uji Thermography Passive*. Universitas Lampung.
- Benítez, H. D., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X., Loaiza, H., & Caicedo, E. (2008). *Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography*. Infrared Physics & Technology, 51(3), 160–167.
- Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. (2018). *Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete*. Construction and Building Materials, 186, 1031–1045.
- Ghafur, A. (2009). *Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu terhadap Kuat Tekan dan Pola Retak Beton (Kajian Eksperimental)*. Universitas Sumatera Utara.
- Hakim, N. (2025). *Identifikasi Retakan Pada Permukaan Beton Menggunakan Alat Uji Termografi Inframerah Berdasarkan Thermal Contrast Terbesar*. Universitas Lampung.
- Halloua, H., Elhassnaoui, A., Saifi, A., Obbadi, A., Errami, Y., & Sahnoun, S. (2016). *An intelligent method using neural networks for Depth detection by standard thermal contrast in active thermography*. Conference QIRT, 697–704.
- Hamdi, F., Lapian, F. E. P., Tumpu, M., Mabui, D. S. S., Raidyarto, A., Sila, A. A., & Rangan, P. R. (2022). *Teknologi beton*. Tohar Media.
- Isneini, M. (2009). *Kerusakan dan perkuatan Struktur beton bertulang*. Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Lampung, 13(3), 140016.

- J. Helal, M. Sofi, & Mendis, P. (2015). *Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods*. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 97–105.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). *Principal Component Analysis: a review and recent developments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
- Kartorono, S., Setio, H., Surahman, A., & Zulkifli, E. (2023). *Determination of reflected temperature in active thermography measurements for corrosion quantification of reinforced concrete elements*. *Structural Durability & Health Monitoring*, 17(3), 195.
- Mac, V. H., Tran, Q. H., Huh, J., Doan, N. S., Kang, C., & Han, D. (2019). *Detection of Delamination with Various Width-to-depth Ratios in Concrete Bridge Deck Using Passive IRT: Limits and Applicability*. *Materials*, 12(23), 3996.
- Milovanović, B., & Banjad Pečur, I. (2016). *Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete*. *Journal of Imaging*, 2(2), 11.
- Milovanović, B., Gaši, M., & Gumbarević, S. (2020). *Principal component thermography for defect detection in concrete*. *Sensors*, 20(14), 3891.
- Nair, K. R., Vimal Mohan, & P. Srinivasan. (2023). *Reliability of Thermal Images and Numerical Modelling on Passive Infrared Thermography for Concrete Structures*. *Journal of Non Destructive Testing and Evaluation (JNDE)*, 20(1), 64–74.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson.
<https://books.google.co.id/books?id=TdfewmQ-cMIC>
- Parvatani, R. (2009). *Principal component thermography for steady thermal perturbation scenarios*. Clemson University.
- Pedram, M., Taylor, S., Robinson, D., Hamill, G., O'Brien, E., & Uddin, N. (2022). *Experimental investigation of subsurface defect detection in concretes by infrared thermography and convection heat exchange*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(6), 1355–1373.
- Raja, B., Miramini, S., Duffield, C., & Zhang, L. (2021). *Infrared Thermography for Detecting Subsurface Defects of Concrete Structures* (pp. 1165–1176).
- Rajic, N. (2002). *Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*. *Composite Structures*, 58(4), 521–528.

- Scott, M., Luttig, H., Strydom, M., Gonelli, M., Kruger, D., Rankine, R. G. D., & Broodryk, T. (2012). *Passive infrared thermography as a diagnostic tool in civil engineering structural material health monitoring*. Proceedings of the Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 3–5.
- Septiani, V., Suryan, V., & Amalia, D. (2024). *Faktor-faktor yang mempengaruhi campuran beton: Rancangan beton, kekuatan beton, dan karakteristik beton*. Journal of Engineering and Transportation, 1(4).
- Sidabutar, R. A., Saragi, Y. R., Pasaribu, H., Pardede, M., & Hutabarat, T. (2021). *Evaluasi Perkerasan Jalan Kaku (Rigid Pavement) Pada Jalan SM Raja Medan Dengan Metode Bina Marga*. Jurnal Visi Eksakta, 2(2), 215–224.
- Sirca Jr, G. F., & Adeli, H. (2018). *Infrared thermography for detecting defects in concrete structures*. Journal of Civil Engineering and Management, 24(7), 508–515.
- Sukirman, S. (2010). *Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur*. NOVA.
- Tomita, K., & Chew, M. Y. L. (2022). *A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection on Infrastructures and Buildings*. Sensors, 22(2), 423.
- 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.
- Yang, F., Zeng, X., Xia, Q., Yang, L., Cai, H., & Cheng, C. (2025). *Early Detection and Analysis of Cavity Defects in Concrete Columns Based on Infrared Thermography and Finite Element Analysis*. Materials, 18(7), 1686.
- Zhang, L., Dong, W., Zhang, D., & Shi, G. (2010). *Two-stage image denoising by Principal Component Analysis with local pixel grouping*. Pattern Recognition, 43(4), 1531–1549.