

**PENGGUNAAN METODE *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS* (PCA)
BERDASARKAN HASIL UJI TERMOGRAFI PASIF UNTUK
IDENTIFIKASI *VOID* PADA BETON**

(Skripsi)

Oleh

WILY FAHREZA PUTRA

NPM 2115011072



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

PENGGUNAAN METODE *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS* (PCA) BERDASARKAN HASIL UJI TERMOGRAFI PASIF UNTUK IDENTIFIKASI *VOID* PADA BETON

Oleh

WILY FAHREZA PUTRA

Void merupakan salah satu cacat internal pada beton yang dapat menurunkan kualitas struktur, sehingga diperlukan metode identifikasi *non-destruktif test* yang akurat. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi luas *artificial void* pada beton menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) berbasis termografi pasif serta menganalisis tingkat akurasinya, dan membandingkan peletakan *artificial void* rencana dengan kondisi sebenarnya. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan sampel beton dengan variasi kedalaman *void* 0 cm dan 1 cm serta variasi jarak pengambilan citra 0,5 m hingga 2,5 m menggunakan kamera inframerah FLIR E8-XT, kemudian data citra termal dianalisis menggunakan PCA melalui MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan metode PCA mampu mendeteksi luas *artificial void* dengan baik pada jarak 0,5 m dan 1 m dengan akurasi rata-rata di atas 99%, sedangkan pada jarak lebih jauh kemampuan deteksi menurun. Selain itu, semakin besar kedalaman *void*, luas *void* yang terdeteksi cenderung berkurang sehingga akurasi menurun. Perbandingan peletakan *void* rencana dan aktual menunjukkan keberhasilan peletakan pada kedalaman 0 cm berada pada kisaran 44–66%, sedangkan pada kedalaman 1 cm di bawah 34%. Berdasarkan hasil tersebut, metode PCA berbasis termografi pasif efektif digunakan untuk identifikasi *void* pada beton, khususnya pada jarak dekat dan kedalaman dangkal.

Kata kunci: Beton, *Void*, Termografi Pasif, *Principal Component Analysis* (PCA), *Non-Destructive Test*.

ABSTRACT

THE APPLICATION OF PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS (PCA) BASED ON PASSIVE THERMOGRAPHY TEST RESULTS FOR VOID IDENTIFICATION IN CONCRETE

By

WILY FAHREZA PUTRA

Void is one of the internal defects in concrete that can reduce structural quality, therefore an accurate non-destructive testing method is required for its identification. This study aims to identify the area of artificial voids in concrete using the Principal Component Analysis (PCA) method based on passive thermography and to analyze its accuracy, as well as to compare the planned placement of artificial voids with their actual conditions. This research was conducted experimentally using concrete specimens with void depth variations of 0 cm and 1 cm, and image acquisition distances ranging from 0.5 m to 2.5 m using a FLIR E8-XT infrared camera. The thermal image data were then analyzed using PCA through MATLAB. The results showed that the PCA method was able to detect the area of artificial voids effectively at distances of 0.5 m and 1 m, with an average accuracy above 99%, while detection capability decreased at greater distances. In addition, the greater the void depth, the smaller the detected void area tended to be, resulting in reduced accuracy. Comparison between the planned and actual void placement showed a placement success rate of 44–66% at 0 cm depth, while at 1 cm depth it was below 34%. Based on these results, the PCA method based on passive thermography is effective for void identification in concrete, particularly at close distances and shallow depths.

Keywords: Concrete, Void, Passive Thermography, Principal Component Analysis (PCA), Non-Destructive Testing.

**PENGGUNAAN METODE *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS* (PCA)
BERDASARKAN HASIL UJI TERMOGRAFI PASIF UNTUK
IDENTIFIKASI *VOID* PADA BETON**

Oleh

WILY FAHREZA PUTRA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

Judul Skripsi

: **PENGGUNAAN METODE *PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS* (PCA) BERDASARKAN HASIL UJI TERMOGRAFI PASIF UNTUK IDENTIFIKASI *VOID* PADA BETON**

Nama Mahasiswa

: **Wily Fahreza Putra**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115011072

Program Studi

: Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik



Dr. Suyadi, S.T., M.T.

NIP 19741225 200501 1 003

Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.

NIP 19700430 199703 1 003

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Prodi 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

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



Penguji

Bukan Pembimbing : Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 4 Mei 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Wily Fahreza Putra

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115011072

Judul Skripsi : Penggunaan Metode *Principal Component Analysis* (PCA) Berdasarkan Uji Termografi Pasif Untuk Identifikasi *Void* Pada Beton

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, 4 Mei 2026

Pembuat Pernyataan



Wily Fahreza Putra

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Bandar Lampung pada 15 Mei 2001. Penulis merupakan anak kedua dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Wiji Nuryadin dan Ibu Lilik Suparti. Penulis mempunyai satu kakak perempuan yang bernama Eki Anisa Putri dan tiga adik perempuan yang bernama Rahma Dhani Regita Putri, Dhea Putri Anggraini, dan Arsyla Putri.

Penulis memulai jenjang pendidikan di TK YWKA Tanjung Karang-Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2007, lalu melanjutkan pendidikan dasar di SD N 5 Sukajawa pada tahun 2007-2013, kemudian melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP N 10 Bandar Lampung pada tahun 2013-2016, dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA N 10 Bandar Lampung pada tahun 2016-2019.

Penulis memulai dunia perkuliahan pada tahun 2021 setelah dinyatakan lulus di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) sebagai anggota Departemen K2 (Kerohanian dan Keolahragaan) pada periode 2023-2024 dan 2024-2025.

Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode 1 di Desa Adi Karya Mulya, Kecamatan Panca Jaya, Kabupaten Mesuji, Provinsi Lampung selama 40 hari pada Januari – Februari 2024. Pada Juli – September 2024 penulis

melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Proyek Pembangunan Azana *Boutique* Hotel Kota Bandar Lampung dan pada tahun 2025 penulis memulai penelitian yang berjudul “Penggunaan Metode *Principal Component Analysis* (PCA) Berdasarkan Uji Termografi Pasif Untuk Identifikasi Void Pada Beton” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik.

LEMBAR PERSEMBAHAN

Segala Puji Bagi Allah SWT.

Skripsi ini saya persembahkan untuk kedua orang tua tercinta atas doa yang tiada henti dalam setiap langkah perjalanan pendidikan saya dan kepada semua pihak yang telah menjadi bagian dari perjalanan ini. Terima kasih atas dukungan, semangat, dan kebersamaan yang tak ternilai.

Terima kasih juga kepada diri sendiri yang sudah berusaha dan berjuang dalam menyelesaikan skripsi ini.

MOTTO

“Human clock is always in a rush, God’s clock is always on time”

(Mykhailo Mudryk)

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah: 6)

“If you do not believe in yourself, no one will do it for you”

(Kobe Bryant)

“Success is no accident. It is hard work, perseverance, learning, studying, sacrifice and most of all, love of what you are doing”

(Cristiano Ronaldo)

SANWACANA

Dengan memanjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Penggunaan Metode *Principal Component Analysis* (PCA) Berdasarkan Hasil Uji Termografi Pasif untuk Identifikasi *Void* pada Beton” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis menerima berbagai bentuk bantuan, dukungan, bimbingan, dan arahan dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT. atas segala nikmat yang diberikan kepada penulis selama mengikuti perkuliahan di Universitas Lampung.
2. Keluarga tercinta terutama kedua orang tua yang selalu mendoakan dan memotivasi dalam menyelesaikan pendidikan.
3. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M, selaku Rektor Universitas Lampung sekaligus Dosen Teknik Sipil.
4. Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung sekaligus Dosen Teknik Sipil.
5. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
6. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil sekaligus Dosen Pembimbing I, penulis menyampaikan terima kasih yang tulus atas waktu, arahan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan sepanjang penyusunan skripsi ini. Penulis sangat berterima kasih atas ilmu, ide, inspirasi, serta petunjuk berharga yang Bapak sampaikan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan atas ketulusan, pengertian, dan kesabaran yang senantiasa Bapak tunjukkan selama proses penulisan berlangsung.

7. Bapak Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II, penulis menyampaikan terima kasih yang tulus atas waktu, arahan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan sepanjang penyusunan skripsi ini. Penulis sangat berterima kasih atas ilmu, ide, inspirasi, serta petunjuk berharga yang Bapak sampaikan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan atas ketulusan, pengertian, dan kesabaran yang senantiasa Bapak tunjukkan selama proses penulisan berlangsung.
8. Bapak Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Penguji, penulis menyampaikan terima kasih atas masukan, serta kritik dan saran yang sangat bermanfaat baik dalam proses perkuliahan maupun dalam proses penyusunan skripsi ini.
9. Bapak Dr. Ir. Endro Prasetyo Wahono, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Akademik, penulis menyampaikan terima kasih atas nasehat dan dorongannya yang terus membantu penulis dalam proses studi.
10. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang sudah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat dalam proses pembelajaran agar lebih baik kedepannya.
11. Staf Laboratorium Bahan dan Konstruksi yang sudah memberikan fasilitas sarana prasarana dalam menunjang penelitian serta memberikan saran, dukungan serta bimbingan selama penulis melakukan penelitian.
12. Staf Administrasi dan civitas kampus yang sudah membantu penulis dalam proses administrasi baik saat perkuliahan sampai penyelesaian skripsi ini.
13. Teman-teman SMA yang selalu menyemangati penulis dalam menyelesaikan perkuliahan.
14. Teman-teman SETSOT yang selalu menghibur dan memberikan dukungan kepada saya dalam proses perkuliahan ini.
15. Keluarga besar angkatan 2021 (ASPIRE) yang telah menemani, memberikan semangat, dan dukungan yang luar biasa dalam proses penyelesaian skripsi. Terima kasih kita sudah bertahan dan menjalani kehidupan skripsi yang menyenangkan ini.
16. Penulis juga ingin menyampaikan apresiasi kepada diri sendiri yang telah berjuang dengan penuh kesabaran, ketekunan, dan tanggung jawab dalam

menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih karena tidak menyerah di tengah berbagai tantangan dan tetap berkomitmen hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan ini masih terdapat keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi untuk penyempurnaan selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi pihak yang membutuhkan.

Bandar Lampung, Mei 2026
Penulis,

Wily Fahreza Putra

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Beton	6
2.2 Metode <i>Non-Destructive Test</i> pada Beton.....	8
2.3 Termografi Inframerah dalam Pengujian Beton.....	8
2.3.1 Termografi aktif	9
2.3.2 Termografi pasif.....	10
2.4 <i>Principal Component Analysis</i> (PCA)	11
2.5 <i>Thermal Contrast</i>	15
2.6 Alat yang digunakan	16
III. METODOLOGI PENELITIAN	18

3.1	Umum.....	18
3.2	Lokasi Pengujian.....	18
3.3	Persiapan Alat dan Bahan Pembuatan Beton	19
3.3.1	Alat Pengujian Material.....	19
3.3.2	Material yang digunakan	19
3.4	Pemeriksaan Material.....	20
3.5	<i>Mix Design</i> Beton.....	21
3.6	Pembuatan Sampel Benda Uji.....	21
3.7	Pengujian Benda Uji	23
3.7.1	Pengujian Kuat Tekan	23
3.7.2	Pengujian <i>Thermal Contrast</i>	24
3.7.3	Pengujian Termografi Pasif.....	24
3.8	Diagram Alir Penelitian.....	25
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1	Umum.....	26
4.2	Hasil Pengujian Material.....	27
4.3	Kebutuhan Material Campuran Beton	28
4.4	Pembuatan Benda Uji.....	28
4.5	Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	30
4.6	Hasil Pengujian <i>Thermal Contrast</i>	31
4.7	Hasil Pengujian Termografi Pasif	36
4.7.1	Pengujian Termografi.....	36
4.7.2	Analisis Data Menggunakan <i>Software</i> FLIR TOOLS	41
4.7.3	Analisis Data Menggunakan Aplikasi MATLAB	43
4.8	Hasil Pengukuran <i>Artificial Void</i>	64

4.9 Hasil Perbandingan Peletakan <i>Void</i> Rencana dan Keadaan Sebenarnya.....	80
V. KESIMPULAN DAN SARAN	86
5.1 Kesimpulan	86
5.2 Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA.....	88

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Retakan beton.	7
Gambar 2. <i>Scaling</i> pada beton.....	7
Gambar 3. Deteksi <i>void</i> pada beton.....	7
Gambar 4. Radiasi yang diterima oleh kamera inframerah.....	9
Gambar 5. Contoh pengujian termografi aktif.	10
Gambar 6. Contoh pengujian termografi pasif.....	11
Gambar 7. Pembentukan matriks 2D dari urutan termogram.....	12
Gambar 8. Proses PCA.....	13
Gambar 9. Hasil PCA penelitian terdahulu (a) Milovanović et al. (2020); (b) An et al. (2015).	14
Gambar 10. Termokopel.....	16
Gambar 11. Kamera inframerah.....	17
Gambar 12. <i>Data logger</i>	17
Gambar 13. Letak <i>void</i> buatan pada beton.	22
Gambar 14. Potongan sampel beton untuk pengujian (a) dan (b) termografi pasif (c) <i>thermal contrast</i>	23
Gambar 15. <i>Flowchart</i> penelitian.....	25
Gambar 16. Lokasi penelitian (a) pembuatan sampel dan pengujian kuat tekan (b) pengujian <i>thermal contrast</i> dan termografi inframerah.....	26
Gambar 17. Benda uji kuat tekan.	28
Gambar 18. Pemasangan termokopel (a) saat dicor (b) setelah dicor.	29
Gambar 19. Pemasangan <i>void</i> pada benda uji (a) sebelum dicor (b) setelah dicor.	29

Gambar 20.	Pengujian kuat tekan.....	30
Gambar 21.	Proses pengambilan data <i>thermal contrast</i>	31
Gambar 22.	Grafik suhu (a) hari ke- 1; (b) hari ke- 2; (c) hari ke- 3; (d) hari ke- 4; (e) hari ke- 5; (f) hari ke- 6; (g) hari ke- 7; (h) hari ke- 8; (i) hari ke- 9.....	34
Gambar 23.	Tabel <i>thermal contrast</i> di setiap grafik.....	35
Gambar 24.	Peletakkan benda uji.....	37
Gambar 25.	Pengambilan foto pengujian termografi inframerah.....	37
Gambar 26.	Hasil pengambilan foto termal saat <i>void</i> terletak di 0 cm (berhimpit permukaan beton) (a) jarak 0,5 m; (b) jarak 1 m; (c) jarak 1,5 m; (d) jarak 2 m; (e) jarak 2,5 m.	39
Gambar 27.	Hasil pengambilan foto termal saat <i>void</i> terletak di bawah 1 cm permukaan beton (a) jarak 0,5 m; (b) jarak 1 m; (c) jarak 1,5 m; (d) jarak 2 m; (e) jarak 2,5 m.	41
Gambar 28.	Pengolahan data menggunakan <i>software</i> FLIR TOOLS.	42
Gambar 29.	Hasil pengolahan data bentuk <i>Comma Separated Values</i> (CSV).....	43
Gambar 30.	Tahapan PCA.....	44
Gambar 31.	Proses statistik PCA.	45
Gambar 32.	Hasil visual pada jarak 0,5 m (a) P-1; (b) P-2; (c) P-3; (d) BP-1; (e) BP-2; (f) BP-3.....	49
Gambar 33.	Hasil visual pada jarak 1 m (a) P-1; (b) P-2; (c) P-3; (d) BP-1; (e) BP-2; (f) BP-3.	53
Gambar 34.	Hasil visual pada jarak 1,5 m (a) P-1; (b) P-2; (c) P-3; (d) BP-1; (e) BP-2; (f) BP-3.....	56
Gambar 35.	Hasil visual pada jarak 2 m (a) P-1; (b) P-2; (c) P-3; (d) BP-1; (e) BP-2; (f) BP-3.	60
Gambar 36.	Hasil visual pada jarak 2,5 m (a) P-1; (b) P-2; (c) P-3; (d) BP-1; (e) BP-2; (f) BP-3.....	63
Gambar 37.	Pengambilan data hasil PCA.	64
Gambar 38.	Memindahkan data hasil PCA dari MATLAB ke Excel.....	65
Gambar 39.	Memasukkan data ke Surfer.	65

Gambar 40.	Membuat lingkaran pada kontur <i>void</i>	66
Gambar 41.	Mencari kontur yang mendekati <i>void</i>	66
Gambar 42.	<i>Export</i> kontur ke AutoCad.....	67
Gambar 43.	Pemotongan beton.	83
Gambar 44.	Hasil pemotongan beton (a) <i>void</i> diameter 2,2 cm; (b) <i>void</i> diameter 2,7 cm; (c) <i>void</i> diameter 4 cm.....	84
Gambar 45.	Pengukuran diameter <i>void</i> (a) dan pengukuran kedalaman <i>void</i> (b).	84

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Software yang Mendukung untuk Analisis dalam Metode <i>Principal Component Analysis</i> (PCA)	15
Tabel 2. Jumlah Sampel Beton Berdasarkan Jenis Pengujian.....	21
Tabel 3. Variasi Ukuran <i>Artificial Void</i>	22
Tabel 4. Hasil Pengujian Material.....	27
Tabel 5. Kebutuhan Material Beton	28
Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan	30
Tabel 7. Waktu Pengujian Termografi Inframerah.....	37
Tabel 8. Ukuran Matriks pada Setiap Sampel Benda Uji.....	42
Tabel 9. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen Vector</i> pada Jarak 0,5 m	69
Tabel 10. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen Vector</i> pada Jarak 1 m	69
Tabel 11. Hasil Nilai Kontur/ <i>Eigen Vector</i> pada Jarak 1,5 - 2,5 m.....	70
Tabel 12. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 0,5 m.....	71
Tabel 13. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 1 m.....	72
Tabel 14. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 1,5 m.....	74
Tabel 15. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 2 m.....	76
Tabel 16. Luas <i>Void</i> yang Terdeteksi pada Jarak 2,5 m.....	77
Tabel 17. Perbandingan Kedalaman <i>Void</i> Rencana dengan Keadaan yang Sebenarnya	80

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material yang sangat penting dan banyak digunakan untuk membangun infrastruktur (Manuahe *et al.*, 2014). Beton diminati karena banyak memiliki kelebihan dibandingkan dengan bahan lainnya, antara lain mudah dibentuk, mempunyai kekuatan yang baik, bahan baku penyusun mudah didapat, tahan lama, tahan terhadap api, tidak mengalami pembusukan (Pane *et al.*, 2015). Meskipun memiliki kekuatan tekan yang tinggi, beton tidak sepenuhnya bebas dari risiko kerusakan. Dalam praktik konstruksi, beton dapat mengalami cacat struktural yang disebabkan oleh kesalahan dalam proses pengecoran, pemadatan, atau akibat pengaruh lingkungan. Salah satu jenis cacat struktural yang penting untuk diidentifikasi sejak dini adalah *void*.

Menurut Isneini (2009) *voids* adalah lubang-lubang yang relatif dalam dan lebar pada beton. *Void* pada beton disebabkan karena 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 (Nugroho & Arry, 2021). Jika tidak terdeteksi sejak awal, *void* dapat melemahkan struktur dan mempercepat kerusakan, termasuk terjadinya retak atau bahkan keruntuhan. Oleh karena itu, untuk mendeteksi *void* di dalam beton secara akurat tanpa merusak struktur yang ada, diperlukan metode pengujian non-destruktif (NDT).

Salah satu teknik NDT yang semakin banyak digunakan adalah termografi inframerah. Termografi inframerah adalah teknik untuk menghasilkan gambar cahaya inframerah yang tidak terlihat oleh mata kita yang dipancarkan oleh objek karena kondisi termalnya (Zhu *et al.*, 2011). Dalam praktiknya, termografi pasif yang memanfaatkan radiasi inframerah alami yang dipancarkan oleh objek tanpa perlu pemanasan tambahan sangat cocok untuk inspeksi kondisi nyata struktur beton. Keunggulan metode ini terletak pada sifatnya yang non-destruktif dan kemudahan aplikasinya, sehingga banyak diminati dalam pengujian material beton. Namun demikian, hasil termografi pasif sering kali sulit dianalisis karena kontras suhu yang rendah dan gangguan *noise* dari lingkungan sekitar, sehingga memerlukan teknik pemrosesan data lanjutan untuk meningkatkan akurasi deteksi cacat seperti *void*.

Untuk mengatasi keterbatasan interpretasi visual dari citra termografi, diperlukan pendekatan pemrosesan citra lanjutan yang mampu mengekstrak informasi penting dari data mentah. Salah satu metode yang terbukti efektif dalam hal ini adalah *Principal Component Analysis* (PCA). PCA merupakan teknik statistik yang digunakan untuk mereduksi dimensi data dan menyoroti variansi utama dalam sekumpulan data kompleks. Dalam konteks termografi, PCA dapat digunakan untuk mengisolasi komponen suhu dominan yang terkait dengan anomali struktural, sekaligus mengurangi gangguan dari latar belakang atau *noise*. Penerapan PCA pada citra termografi pasif dapat meningkatkan *visibilitas void* dalam beton, sehingga proses identifikasi menjadi lebih akurat dan efisien.

Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada pemanfaatan metode PCA dalam pengolahan hasil uji termografi pasif untuk mengidentifikasi *void* pada beton. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknik inspeksi non-destruktif yang lebih handal dalam mendeteksi kerusakan internal pada material beton.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana tingkat akurasi termografi inframerah dalam mengidentifikasi *void* pada beton? Jika *image processing* menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA).

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengidentifikasi luas *artificial void* pada beton menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) dan menganalisis tingkat akurasinya.
2. Untuk membandingkan peletakan *artificial void* rencana dengan keadaan sebenarnya.

1.4 Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah dalam penelitian ini:

1. Pengujian material dan pembuatan sampel beton akan dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Lampung.
2. Penelitian ini menggunakan sepuluh buah sampel beton yang terdiri dari tiga buah beton berbentuk kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm dan tujuh buah beton berbentuk balok dengan ukuran 30 x 30 x 20 cm.
3. Jenis pengujian termografi inframerah menggunakan termografi pasif.
4. Metode pengujian thermal contrast menggunakan alat ukur termokopel dan data logger, sedangkan pengujian termografi inframerah dengan kamera IR jenis FLIR E8-XT resolusi 240 x 320 piksel.
5. Pengujian thermal contrast dilaksanakan dari pukul 08.00 WIB sampai dengan pukul 17.00 WIB.
6. Pengujian termografi inframerah dilakukan dengan variasi jarak kamera terhadap beton sejauh 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, dan 2,5 m dengan masing-masing jarak diambil 40 gambar.

7. Pengujian termografi inframerah dilakukan pada saat rentang waktu uji *thermal contrast* terbesar.
8. Analisis thermal menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA).
9. Terdapat dua variasi kedalaman *void*, yaitu 0 cm (berhimpit dengan permukaan) dan 1 cm di bawah permukaan beton.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang didapat adalah sebagai berikut:

1. Diharapkan dapat menambah kajian ilmiah tentang termografi inframerah khususnya tentang identifikasi *void* pada beton.
2. Diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi praktisi teknik sipil terkait termografi intramerah.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai isi penelitian ini, sistematika penulisan skripsi ini disusun 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.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi referensi-referensi yang digunakan dalam penelitian ini.

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). Menurut Mansyur *et al.* (2024), beton memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu:

1. Beton memiliki kuat tekan tinggi sehingga cocok digunakan pada elemen struktural yang menahan beban berat, seperti kolom dan balok.
2. Durabilitas beton sangat baik karena mampu bertahan terhadap cuaca ekstrem dan lingkungan agresif
3. Beton mudah dibentuk saat masih segar sehingga bisa dicetak ke dalam berbagai bentuk sesuai kebutuhan desain.
4. Tidak mudah terbakar
5. Ekonomis dan mudah didapat karena bahan bakunya melimpah dan dapat diproduksi dalam skala besar dengan biaya relatif rendah.

Menurut Isneini (2009) kerusakan pada beton umumnya dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. Retak (*cracks*) adalah pecah pada beton dalam garis-garis yang relatif panjang dan sempit. Keretakan ini bisa disebabkan oleh berbagai hal seperti kesalahan dalam proses curing, kelebihan beban, kehilangan air dan faktor cuaca (Alfredo *et al.*, 2015). Retak dapat diidentifikasi berdasarkan tiga parameter, yaitu lebar, panjang, dan pola umum. Lebar retak ini sulit diukur karena bentuknya yang tidak teratur (Saputra Gunawan *et al.*, 2014).



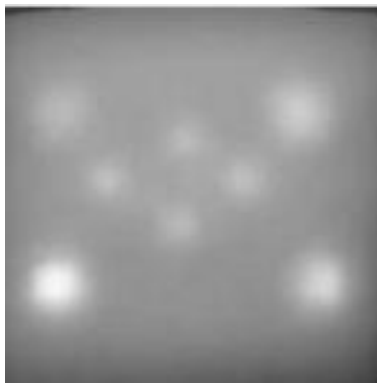
Gambar 1. Retakan beton.

2. *Scaling* adalah adalah pengelupasan dangkal pada permukaan yang terjadi akibat paparan berulang terhadap siklus pembekuan dan pencairan, sehingga menyebabkan permukaan tersebut mengelupas (Isneini, 2009).



Gambar 2. *Scaling* pada beton.

3. Kerusakan *voids* yang disebabkan faktor nonstruktural lebih banyak terjadi pada elemen struktur yang tinggi/panjang (Alfredo *et al.*, 2015).



Gambar 3. Deteksi *void* pada beton.

2.2 Metode *Non-Destructive Test* pada Beton

Non-Destructive Test (NDT) adalah tes fisik suatu material atau benda uji untuk mencari cacat pada benda dengan tidak merusak atau menghancurkan benda uji tersebut (Endramawan *et al.*, 2017). Tujuan dari pengujian NDT adalah untuk mendeteksi cacat dengan suatu prosedur tertentu pada suatu benda.

Berikut adalah beberapa metode dari *non-destructive test*:

1. *Hammer test*

Hammer test merupakan suatu metode uji yang mudah dan praktis untuk memperkirakan mutu beton. Prinsip kerja *hammer test* adalah dengan memberikan beban *impact* (tumbukan) pada permukaan beton dengan menggunakan suatu massa yang diaktifkan dengan menggunakan energi yang besarnya tertentu.

2. Termografi inframerah

Prinsip kerja termografi inframerah, kamera inframerah mendeteksi distribusi panas abnormal yang menunjukkan cacat.

3. *Ultrasonic test*

Prinsip kerja *ultrasonic test*, yaitu dengan mengirim gelombang ultrasonik ke dalam material, memantul dari cacat internal, lalu dianalisis.

4. *Radiographic test*

Prinsip kerja *radiographic test* menggunakan sinar-X atau gamma untuk menembus material dan membentuk citra cacat di film.

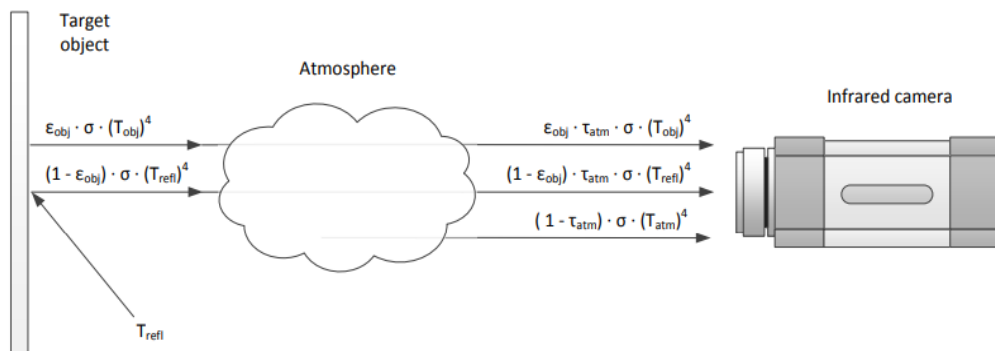
2.3 Termografi Inframerah dalam Pengujian Beton

Termografi inframerah (IRT) adalah teknologi untuk mendeteksi radiasi termal yang dipancarkan dari bahan (Omar & Nehdi, 2016). Termografi inframerah telah menjadi bagian uji tak rusak (NDT) yang sangat penting dalam deteksi beton karena sifatnya yang tidak bersentuhan, cepat, dan mampu mencitrakan area yang luas (An *et al.*, 2015). IRT adalah satu-satunya metode yang tidak memerlukan akses langsung ke permukaan yang sedang diperiksa karena

gambar dapat ditangkap dari jarak jauh dengan menggunakan lensa optik yang sesuai.

Termografi adalah teknik pencitraan yang menggunakan radiasi inframerah untuk menciptakan gambar termal. Gambar yang dihasilkan oleh kamera inframerah merupakan interpretasi energi panas yang diterima oleh sensor termal kamera inframerah yang masih mengandung *noise* (Kartorono *et al.*, 2023). Alat ini dapat menciptakan gambar suhu permukaan berdasarkan radiasi yang dipancarkan. Menurut Usamentiaga *et al.* (2014) radiasi total yang diterima oleh kamera (W_{tot}) berasal dari tiga sumber, yaitu emisi objek target (E_{obj}), emisi lingkungan sekitar dan dipantulkan oleh objek (E_{refl}), dan emisi atmosfer (E_{atm}). Dengan demikian, emisi dari objek target dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm}$$



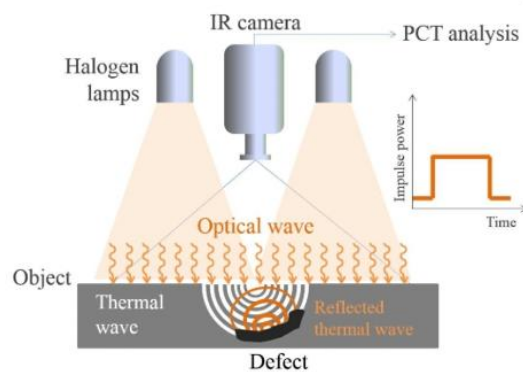
Gambar 4. Radiasi yang diterima oleh kamera inframerah.
(Sumber: Usamentiaga *et al.*, 2014)

Menurut Zhu *et al.* (2011) termografi inframerah didasarkan pada perbedaan suhu. Ada dua jenis termografi:

2.3.1 Termografi aktif

Pengujian termografi aktif adalah pengujian yang memerlukan sumber energi eksternal untuk menginduksi perbedaan suhu antara area yang

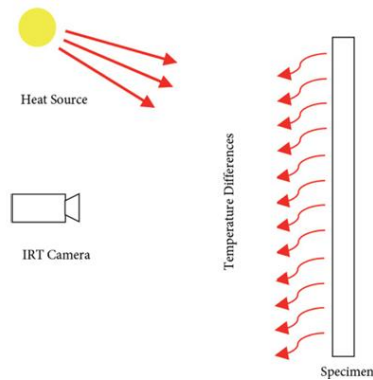
rusak dan tidak rusak pada spesimen yang diperiksa (Ikromi *et al.*, 2023). Salah satu sumber energi eksternal yang bisa digunakan untuk pengujian termografi aktif adalah lampu halogen. Teknik IRT aktif lebih banyak diterapkan untuk mendeteksi kerusakan pada material dan struktur yang tidak terpapar sinar matahari langsung (Milovanović & Pečur, 2016). Ketika pengujian termografi aktif dilakukan di dalam ruangan, pengaruh radiasi sumber panas terhadap variasi suhu ruangan akan lebih dominan. Pada saat yang sama, variasi suhu di dalam ruangan akan tetap konstan (Kartorono *et al.*, 2023).



Gambar 5. Contoh pengujian termografi aktif.
(Sumber: Milovanović & Pečur, 2016)

2.3.2 Termografi pasif

Pendekatan pasif menggunakan sumber panas alami seperti pemanasan matahari dan perubahan suhu (Omar & Nehdi, 2016). Menurut Milovanović & Pečur (2016), keuntungan utama termografi pasif adalah teknik ini murah dan ramah lingkungan, yang memberikan pemanasan yang merata secara sempurna. Kekurangannya adalah daya pemanasan yang tersedia relatif rendah dan ketergantungan pada kondisi cuaca, orientasi permukaan, dan warna beton, karena matahari terutama memanaskan dalam cahaya tampak.

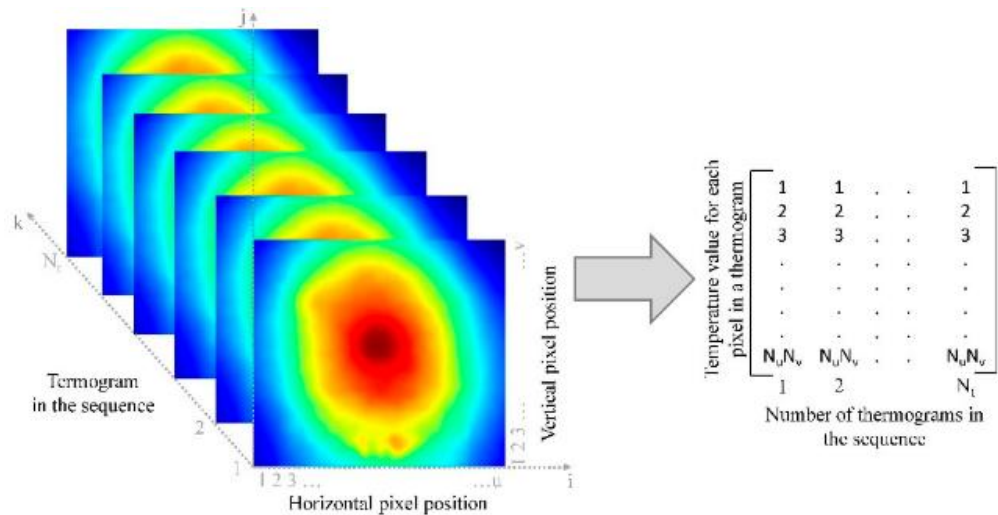


Gambar 6. Contoh pengujian termografi pasif.
(Sumber: Sirca & Adeli, 2018)

2.4 *Principal Component Analysis (PCA)*

Principal Component Analysis (PCA) adalah alat statistik yang digunakan untuk identifikasi pola tertentu dalam kumpulan data, dan menganalisis kumpulan data dengan cara yang memungkinkan penggambaran kesamaan dan perbedaan pola tertentu yang terjadi pada data menggunakan mode statistik yang diperoleh dengan menguraikan data menjadi nilai tunggal (Milovanović *et al.*, 2020). *Principal Component Analysis (PCA)* digunakan untuk mengubah urutan gambar inframerah menjadi satu set komponen utama. Kemudian, hasil deteksi dapat diperoleh dengan cepat dengan menjaga yang lebih rendah komponen utama dan mengabaikan komponen yang lebih tinggi (An *et al.*, 2015).

PCA dapat mengurangi dimensi kumpulan data, dan mempertahankan fitur yang berkontribusi varians dari kumpulan data yang paling banyak, dengan demikian lusinan frame urutan gambar inframerah dikompresi menjadi beberapa komponen utama yang dapat menunjukkan esensi sampel. Salah satu keuntungan penting dari PCA adalah kegunaannya dalam denoising gambar, karena PCA secara efektif mengelola *noise* dengan menangkap struktur esensial data sambil menyaring komponen yang kurang informatif (Zhang *et al.*, 2010).



Gambar 7. Pembentukan matriks 2D dari urutan termogram.
(Sumber: Milovanović *et al.*, 2020)

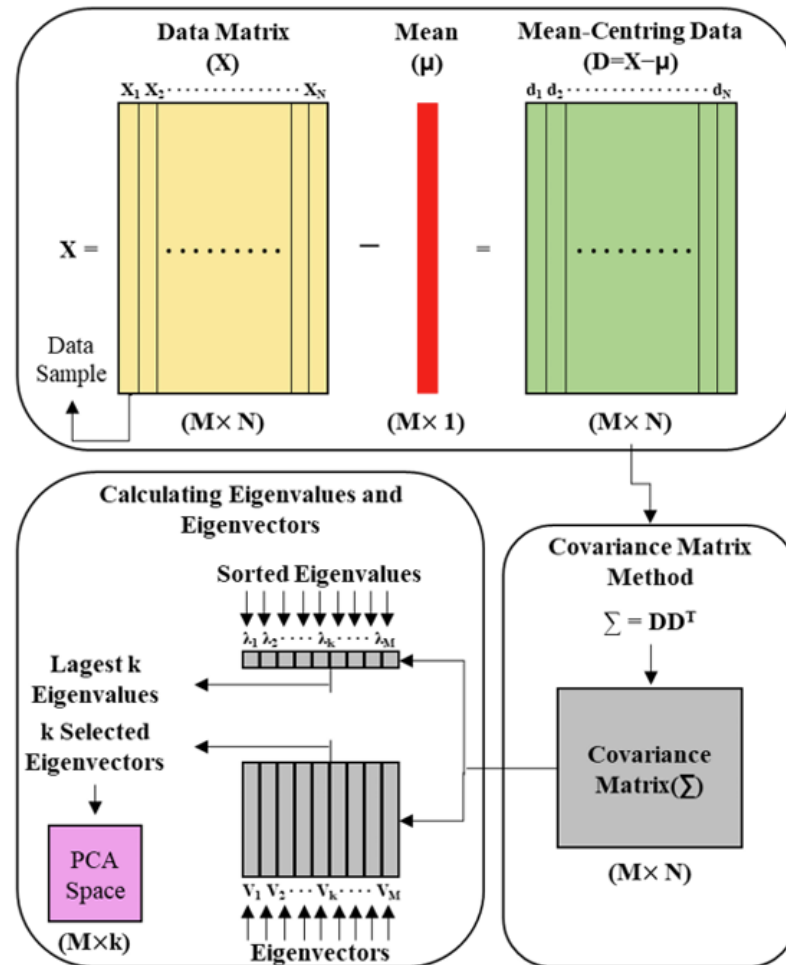
Dalam implementasinya, PCA sering dihitung menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD), yang merupakan teknik dekomposisi matriks menjadi tiga komponen utama, yaitu U , S , dan V^T . Dengan menggunakan SVD, proses PCA menjadi lebih efisien dan stabil secara numerik, terutama pada data berdimensi besar seperti citra. SVD didasarkan pada operasi matriks data asli dalam format $x \times y \times N$ sebagai matriks 3D perlu disusun ulang menjadi $M \times N$ sebagai matriks 2D. Kemudian SVD dari matriks 2D tersebut dapat dihitung dengan:

$$A = URV^T$$

Dimana U adalah matriks ortogonal berukuran $M \times N$, R adalah matriks diagonal berukuran $N \times N$ (dengan nilai *singular* A terdapat di diagonal), dan V^T adalah transpose dari matriks ortogonal berukuran $N \times N$ (Ibarra-Castanedo *et al.*, 2009).

Principal Component Analysis (PCA) dapat mentransformasikan data secara linier ke dalam sistem koordinat baru, di mana arah dengan variansi terbesar dijadikan sebagai komponen utama pertama, sedangkan arah dengan variansi terbesar berikutnya menjadi komponen utama kedua. Dengan demikian, PCA berfungsi untuk menguraikan variasi data menjadi beberapa komponen yang

mampu merepresentasikan karakteristik utama dari data tersebut secara optimal. Adapun tahapan penerapannya ditunjukkan pada gambar berikut (Yoon *et al.*, 2021).

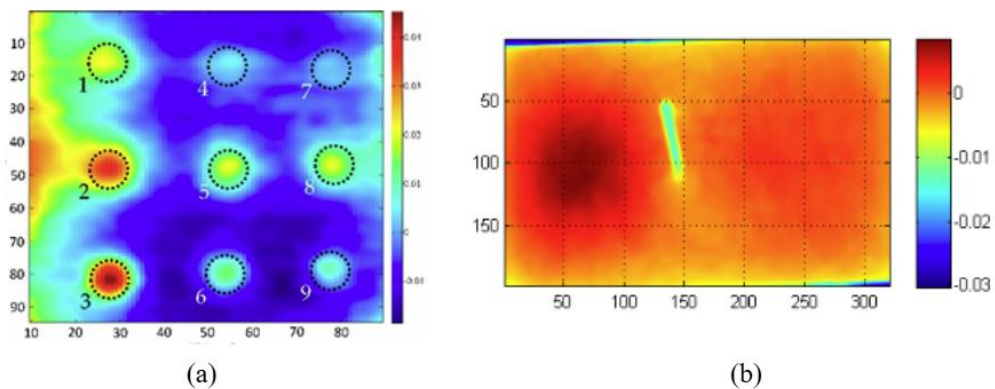


Gambar 8. Proses PCA.
(Sumber: Choi *et al.*, 2019)

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Milovanović *et al.*, 2020) dan (An *et al.*, 2015) sama-sama memanfaatkan metode termografi inframerah yang dikombinasikan dengan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mendeteksi cacat internal pada beton. Kedua penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan kemampuan identifikasi cacat yang sulit dideteksi menggunakan citra termal konvensional.

Metode yang digunakan adalah mengolah data citra termal dalam bentuk urutan gambar (*image sequence*) menjadi matriks, kemudian dianalisis menggunakan PCA melalui dekomposisi Singular Value Decomposition (SVD). Pendekatan ini memungkinkan reduksi dimensi data serta mengekstraksi informasi penting dari citra termal.

Hasil dari kedua penelitian menunjukkan bahwa penggunaan PCA mampu meningkatkan kejelasan deteksi cacat, mengurangi *noise*, serta menampilkan pola cacat dengan lebih jelas dibandingkan metode termografi biasa. Namun, hasil deteksi masih dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kondisi pemanasan, ukuran dan kedalaman cacat, serta gangguan lingkungan.



Gambar 9. Hasil PCA penelitian terdahulu (a) Milovanović et al. (2020); (b) An et al. (2015).

Berbeda dengan penelitian-penelitian tersebut yang menggunakan termografi aktif, penelitian ini menggunakan termografi pasif, sehingga tidak memerlukan sumber panas buatan dan diharapkan lebih sederhana serta aplikatif dalam kondisi lapangan.

Dalam pengolahan data citra (*image data*), metode *Principal Component Analysis* (PCA) digunakan untuk reduksi dimensi, ekstraksi fitur, denoising, dan kompresi citra. Berikut adalah *software* yang mendukung implementasi PCA secara efisien.

Tabel 1. *Software* yang Mendukung untuk Analisis dalam Metode *Principal Component Analysis* (PCA)

<i>Tools</i>	Pengertian
Python	Python adalah bahasa pemrograman tingkat tinggi dan serbaguna yang mendukung berbagai paradigma pemrograman, seperti prosedural, berorientasi objek, dan fungsional.
Matlab	MATLAB (<i>Matrix Laboratory</i>) adalah lingkungan komputasi numerik dan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh <i>MathWorks</i> , digunakan secara luas dalam teknik dan ilmu pengetahuan untuk analisis data, pemodelan, simulasi, serta pengolahan sinyal dan citra.
R	R adalah bahasa pemrograman dan perangkat lunak statistik yang dikembangkan untuk analisis data dan visualisasi grafis. R sangat kuat dalam komputasi statistik dan sering digunakan dalam penelitian ilmiah, ekonomi, bioinformatika, dan pembelajaran mesin.

2.5 *Thermal Contrast*

Thermal contrast adalah perbedaan suhu yang signifikan antara dua area atau dua material yang berdekatan. *Thermal contrast* digunakan dalam pengujian non-destruktif test (NDT) dengan termografi inframerah untuk mengevaluasi visibilitas cacat, meningkatkan kualitas gambar, dan pada akhirnya untuk tujuan kuantitatif (Benítez *et al.*, 2008).

Penggunaan kontras termal standar untuk menyingkap keberadaan cacat sangat bijaksana karena beberapa alasan. Kontras termal standar $C(t)$ didefinisikan sebagai rasio antara perbedaan suhu area yang cacat dan area yang tidak cacat, perbedaan suhu ini dihitung antara waktu t dan t_0 (Halloua *et al.*, 2016). Perbedaan suhu pada titik i (T_i) dan titik j (T_j) di permukaan (ΔT_{ij}). Perbedaan

ini dikenal sebagai kontras termal atau kontras suhu (Pedram *et al.*, 2022). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\Delta T_{ij}(t) = T_i(t) - T_j(t)$$

2.6 Alat yang digunakan

Berikut adalah alat - alat yang akan digunakan dalam melaksanakan penelitian:

1. 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” (Wahyudi *et al.*, 2018).



Gambar 10. Termokopel.

2. Kamera Inframerah

Kamera inframerah adalah kamera yang dapat merekam pancaran inframerah dari permukaan benda (HARYANTO *et al.*, 2020). Pada penelitian ini memakai kamera inframerah jenis FLIR E8-XT dengan resolusi 240 x 320 piksel.



Gambar 11. Kamera inframerah.

3. Data Logger

Data *logger* adalah suatu alat elektronik yang berfungsi mencatat data dari waktu ke waktu secara *continue* (Lysbetti Marpaung & Ervianto, 2012).



Gambar 12. Data logger.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan membuat sampel beton sebanyak sepuluh buah dengan menambahkan *artificial void* di dalam beton. Terdapat dua variasi kedalaman *artificial void* dalam sampel beton yang akan diteliti, yaitu pada kedalaman 0 cm (berhimpit dengan permukaan beton) dan 1 cm di bawah permukaan beton. Setelah sampel beton terbuat selanjutnya melaksanakan proses deteksi *void* pada beton dengan pengujian *thermal contrast* dan termografi inframerah. Hasil dari pengolahan data menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) akan menghasilkan *eigen vector* untuk hasil *image* yang lebih akurat.

3.2 Lokasi Pengujian

Pengujian dalam penelitian ini dilaksanakan di beberapa lokasi yang telah disesuaikan dengan jenis pengujian dan ketersediaan fasilitas pendukung. Proses pembuatan benda uji beton serta pengujian kuat tekan dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Laboratorium ini menyediakan peralatan yang memadai untuk pencampuran, pencetakan, perawatan, hingga pengujian kekuatan beton sesuai prosedur standar. Sementara itu, pengujian *thermal contrast* dan pengujian termografi pasif dilakukan di Jalan Harapan 1 No. 14, Labuhan Ratu, Kedaton, Bandar Lampung.

3.3 Persiapan Alat dan Bahan Pembuatan Beton

Sebelum melaksanakan penelitian, sangat penting untuk menyiapkan terlebih dahulu alat dan bahan yang akan dipakai. Adapun perlengkapan dan material yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Alat Pengujian Material

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

- a) Satu set saringan
- b) Container
- c) Oven
- d) Mesin molen
- e) Timbangan
- f) Bekisting
- g) Meteran
- h) Cetakan kerucut pasir
- i) Bak perendaman beton
- j) Tongkat pematik
- k) Sekop
- l) Ember
- m) *Compression testing machine* (CTM)
- n) Bejana silinder
- o) Botol *le chatelier*
- p) Satu set alat *slump test*
- q) Tabung *picnometer*

3.3.2 Material yang digunakan

Berikut adalah material yang akan digunakan pada penelitian ini:

- a) Semen PCC

- b) Agregat halus
- c) Agregat Kasar
- d) Air
- e) Oli
- f) Bola pingpong dan bola plastik (*artificial void*)

3.4 Pemeriksaan Material

Penelitian ini diawali dengan pengujian terhadap material konstruksi yang meliputi agregat kasar, agregat halus, dan semen. Seluruh data hasil pengujian kemudian dievaluasi berdasarkan standar yang ditetapkan oleh ASTM. Hanya data yang memenuhi kriteria tersebut yang digunakan sebagai dasar dalam perhitungan komposisi campuran beton normal.

Pengujian agregat halus yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a) Kadar air agregat halus sesuai ASTM C 566-78.
- b) Berat jenis dan penyerapan agregat halus sesuai ASTM C 128-98.
- c) Kadar lumpur agregat halus sesuai ASTM C 117-80.
- d) Kandungan zat organis agregat halus sesuai ASTM C 40-92.
- e) Gradasi agregat halus sesuai ASTM C 33-93.
- f) Berat volume agregat halus sesuai ASTM C 29.

Pengujian agregat kasar yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a) Kadar air agregat kasar sesuai ASTM C 556-78.
- b) Berat jenis dan penyerapan agregat kasar sesuai ASTM C 127-88.
- c) Gradasi agregat kasar sesuai ASTM C 33-93.
- d) Berat volume agregat kasar sesuai ASTM C 29.

Pengujian semen yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a) Berat jenis semen sesuai ASTM C 188-95.
- b) Waktu pengikatan awal semen sesuai ASTM C 191-08.
- c) Kehalusan semen sesuai ASTM C 430.

3.5 *Mix Design* Beton

Pada penelitian ini kekuatan beton ($f'c$) yang direncanakan sebesar 20 MPa pada umur 28 hari. Perhitungan campuran beton ini berdasarkan SNI 7656:2012 tentang tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat, dan beton massa.

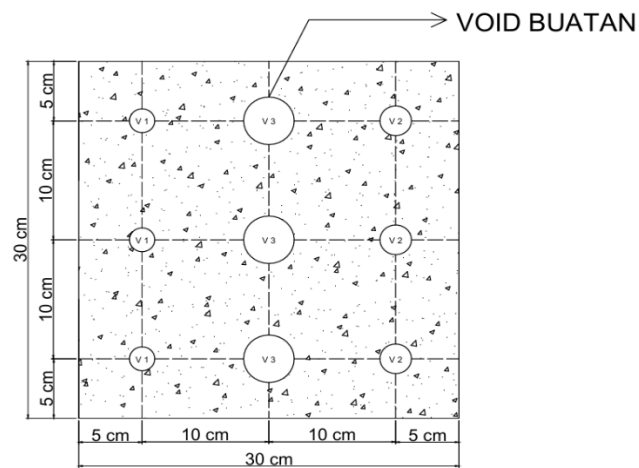
3.6 Pembuatan Sampel Benda Uji

Penelitian ini menggunakan sampel beton sebanyak sepuluh buah yang terdiri dari tiga buah beton berbentuk kubus berukuran 15 x 15 x 15 cm untuk pengujian kuat tekan dan tujuh buah beton berbentuk balok berukuran 30 x 30 x 20 cm yang telah diberi *artificial void* untuk pengujian *thermal contrast* dan termografi pasif. Jumlah sampel beton berdasarkan jenis pengujian dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Jumlah Sampel Beton Berdasarkan Jenis Pengujian

Pengujian	Jumlah (Buah)	Umur Beton (Hari)
Kuat Tekan	3	28
<i>Thermal Contrast</i>	1	28
Termografi Inframerah	6	28

Artificial void yang digunakan dalam penelitian ini adalah bola pingpong dan bola plastik. Kedua benda tersebut dipilih karena beratnya yang sangat ringan dan mempunyai konduktivitas termal yang sangat rendah (hampir seperti udara). Dalam satu buah sampel berbentuk balok berisi sembilan *artificial void* yang terdiri dari tiga ukuran berbeda. Berikut adalah ukuran *void* dan peletakkan *artificial void* pada beton.

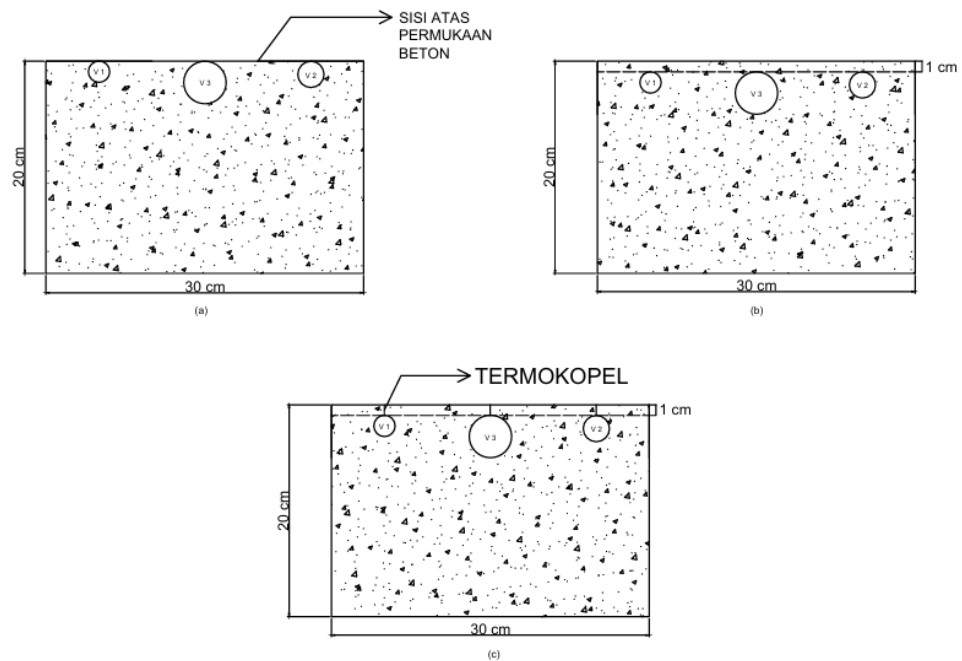


Gambar 13. Letak *void* buatan pada beton.

Tabel 3. Variasi Ukuran *Artificial Void*

Kode <i>Void</i>	Diameter <i>Void</i> (cm)	Jumlah <i>Void</i> (buah)
V1	2,2	3
V2	2,7	3
V3	4	3

Terdapat tiga jenis sampel dalam penelitian ini, yaitu *artificial void* berada di kedalaman 1 cm dengan termokopel untuk pengujian *thermal contrast*, *artificial void* di kedalaman 0 cm dan 1 cm tanpa termokopel untuk pengujian termografi pasif. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 14. Potongan sampel beton untuk pengujian (a) dan (b) termografi pasif (c) thermal contrast.

3.7 Pengujian Benda Uji

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

3.7.1 Pengujian Kuat Tekan

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

Kuat tekan pada penelitian ini hanya sebagai informasi, yang direncanakan sebesar 20 MPa pada umur 28 hari.

3.7.2 Pengujian *Thermal Contrast*

Pengujian *thermal contrast* dilakukan untuk mengidentifikasi dan mencatat nilai suhu tertinggi yang muncul sepanjang periode pengamatan. Pengujian ini dilaksanakan mulai dari pukul 08.00 - 17.00 WIB. Nantinya *thermal contrast* terbesar beserta waktu terjadinya tersebut akan dijadikan patokan utama dalam menganalisis termografi pasif. Pengujian ini menggunakan termokopel sebagai sensor pendeteksi suhu pada permukaan beton dan data *logger* sebagai media penyimpanan rekaman suhu secara kontinu, sehingga setiap fluktuasi termal dapat terekam dengan akurat untuk keperluan evaluasi lebih lanjut.

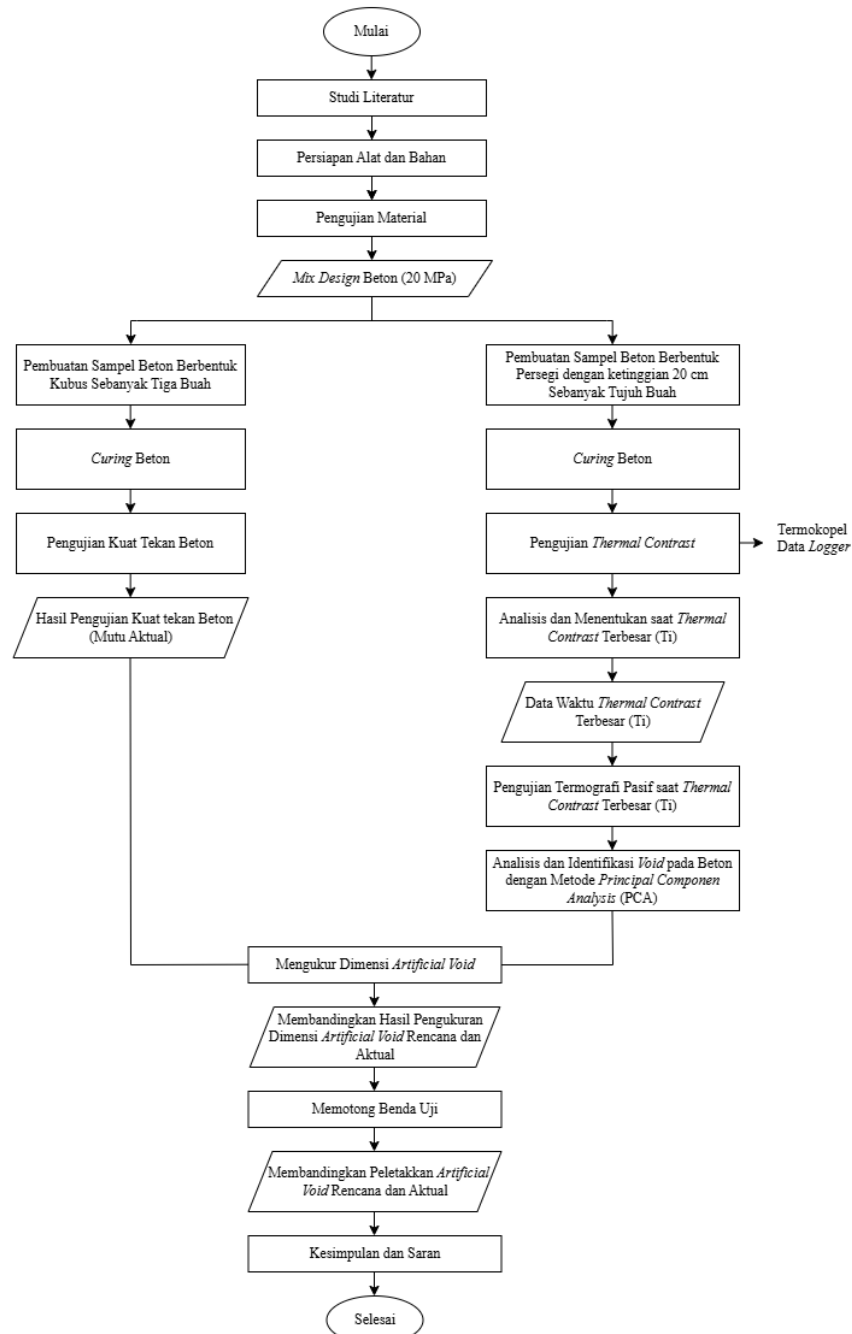
3.7.3 Pengujian Termografi Pasif

Penelitian ini menggunakan jenis termografi pasif karena jenis termografi ini hanya memakai panas alami (matahari). Pengujian termografi pasif dilakukan untuk mendeteksi *artificial void* dengan bantuan kamera inframerah. Pengujian termografi pasif dilakukan pada saat kondisi *thermal contrast* terbesar dan dalam waktu tersebut terjadi.

Pada pengujian ini sampel beton diletakkan di ruang terbuka dan ditempatkan pada permukaan yang datar agar sisi atas beton dapat terkena sinar matahari secara merata. Setelah itu, melakukan pengujian termografi pasif menggunakan kamera inframerah dengan *imaging* sebanyak 40 kali dari masing-masing jarak pengambilan foto, yaitu 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, dan 2,5 m. Setelah mendapatkan data suhu tersebut, kemudian melakukan pembacaan hasil pengujian dari kamera inframerah menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) dengan bantuan *software* Matlab. Hasil akhir dari analisis ini nanti akan

berbentuk tabel dan gambar untuk mengetahui keakuratan ukuran dan letak *artificial void* pada beton.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 15. *Flowchart* penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan di atas, metode *Principal Component Analysis* cukup efektif dalam mendeteksi keberadaan *void* terutama pada pengambilan gambar yang berjarak 0,5 m dan 1 m. Akan tetapi, pengambilan gambar pada jarak 1,5 – 2,5 m *void* tidak dapat terdeteksi. Berikut adalah kesimpulan dari penelitian ini.

- a. Metode *Principal Component Analysis* (PCA) berhasil mengidentifikasi luas *artificial void* pada beton dengan baik, terutama pada jarak 0,5 m dan 1 m, dengan hasil deteksi yang mendekati kondisi sebenarnya. Metode ini memiliki akurasi sangat tinggi, yaitu rata-rata di atas 99%, sehingga efektif digunakan untuk deteksi pada jarak dekat. Selain itu, terdapat hubungan antara kedalaman *void* dengan kemampuan deteksi, dimana semakin besar kedalaman *void*, maka luas *void* yang terdeteksi cenderung semakin mengecil dan nilai selisih semakin meningkat. Dengan demikian, akurasi metode PCA lebih baik pada kedalaman dangkal dibandingkan kedalaman yang lebih besar.
- b. Berdasarkan hasil penelitian, perencanaan peletakan kedalaman *void* belum sepenuhnya berhasil. Pada kedalaman 0 cm, tingkat keberhasilan berada pada kisaran 44–66% sehingga dapat dikatakan cukup berhasil. Namun, pada kedalaman 1 cm, tingkat keberhasilan sangat rendah di bawah 34% bahkan ada yang mencapai 0%, sehingga tidak sesuai dengan rencana. Hal ini menunjukkan bahwa semakin dalam peletakan *void*, maka semakin sulit untuk mencapai posisi yang direncanakan.

5.2 Saran

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

- a. Pengambilan gambar menggunakan kamera inframerah sebaiknya harus tegak lurus menghadap benda uji.
- b. Pemasangan *void* harus lebih direncanakan lagi agar peletakkan *void* sesuai dengan rencana.
- c. Pada saat melakukan pengujian termografi inframerah diharapkan untuk meletakkan benda uji pada posisi yang sama.
- d. Pengujian termografi jangan dilakukan pada saat kondisi cuaca mendung/berawan.
- e. Pada penelitian selanjutnya, sebelum pengujian termografi inframerah dilakukan, permukaan beton disarankan dibersihkan dari debu atau kotoran untuk meminimalkan *noise* dan memperoleh hasil pembacaan termal yang lebih akurat.
- f. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan deteksi *void* pada kedalaman yang lebih besar, mengingat akurasi metode masih menurun seiring bertambahnya kedalaman *void*.
- g. Untuk penelitian lanjutan, disarankan mengembangkan metode agar tidak hanya dapat mengidentifikasi luas *void*, tetapi juga mampu memperkirakan volume *void*.

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), 1–5.
- An, N., Xie, J., Zheng, X., & Gao, X. (2015). *Application Of Pca In Concrete Infrared Thermography Detection*. *Iwmecs*, 813–818. <https://doi.org/10.2991/Iwmecs-15.2015.160>
- Benítez, H. D., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A. H., Maldague, X., Loaiza, H., & Caicedo, E. (2008). Definition Of A New Thermal Contrast And Pulse Correction For Defect Quantification In Pulsed Thermography. *Infrared Physics And Technology*, 51(3), 160–167. <https://doi.org/10.1016/J.Infrared.2007.01.001>
- Choi, I. H., Son, J. A., Koo, J. Bin, Yoon, Y. G., & Oh, T. K. (2019). Damage Assessment Of Porcelain Insulators Through *Principal Component Analysis* Associated With Frequency Response Signals. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15), 1–17. <https://doi.org/10.3390/App9153150>
- Endramawan, T., Haris, E., Dionisius, F., & Prinka, Y. (2017). Aplikasi Non Destructive Test Penetrant Testing (Ndt-Pt) Untuk Analisis Hasil Pengelasan Smaw 3g Butt Joint. *Jtt (Jurnal Teknologi Terapan)*, 3(2), 44–48. <https://doi.org/10.31884/Jtt.V3i2.61>
- 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*. January. <https://doi.org/10.21611/Qirt.2016.110>

- Hamdi, F., Lapian, F. E., Tumpu, M., Mansyur, Irianto, Mabui, D. D. S., Raidyarto, A., Sila, A. A., Pérez, C., Aranceta, J., Serra, L., Carbajal, Á., Rangan, P. R., & Hamkah. (2022). 2021, Teknologi Beton. In *Tohar Media* (Vol. 1, Issue 1). Http://Www.Nutricion.Org/Publicaciones/Pdf/Prejuicios_Y_Verdades_Sobre_Grasas.Pdf%0ahttps://Www.Colesterolfamiliar.Org/Formacion/Guia.Pdf%0ahttps://Www.Colesterolfamiliar.Org/Wp-Content/Uploads/2015/05/Guia.Pdf
- Haryanto, D., Giarno, G., Witoko, J. P., Kusnugroho, G. B. H., Kusumastuti, R., & Juarsa, M. (2020). Karakterisasi Prototipe Heater Element System Pada Untai Uji Rccs-Rdnk Menggunakan Kamera Infra Merah. *Elkomika: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8(2), 313. <Https://Doi.Org/10.26760/Elkomika.V8i2.313>
- Ibarra-Castanedo, C., Piau, J. M., Guilbert, S., Avdelidis, N., Genest, M., Bendada, A., & Maldague, X. P. V. (2009). Comparative Study Of Active Thermography Techniques For The Nondestructive Evaluation Of Honeycomb Structures. *Research In Nondestructive Evaluation*, 20(1), 1–31. <Https://Doi.Org/10.1080/09349840802366617>
- Ikromi, M. F., Kartorono, S., Helmi, M., & Isneini, M. (2023). *Penentuan Letak Pengukuran Reflected Temperature Dengan Menggunakan Termokopel Pada Pengujian Termografi Aktif Terhadap Beton Bertulang*. 11(4), 679–690.
- Isneini, M. (2009). Kerusakan Dan Perkuatan Struktur Beton Bertulang. *Jurnal Rekayasa*, 13(3), 259–270.
- 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. *Sdhm Structural Durability And Health Monitoring*, 17(3), 195–208. <Https://Doi.Org/10.32604/Sdhm.2022.023259>
- Lysbetti Marpaung, N., & Ervianto, D. E. (2012). Data Logger Sensor Suhu Berbasis Mikrokontroler Atmega 8535 Dengan Pc Sebagai Tampilan. *Jurnal Ilmiah Elite Elektro*, 3(1), 37–42.

- Mansyur, Miswar Tumpu, & Sri Gusty. (2024). *Material Beton Dan Konstruksi Jalan: Perkerasan Lentur Dan Kaku* (Issue October 2024). [Https://Arsymedia.Com](https://arsymedia.com)
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2014). Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(6), 277–282.
- Milovanović, B., Gaši, M., & Gumbarević, S. (2020). Principal Component Thermography For Defect Detection In Concrete. *Sensors (Switzerland)*, 20(14), 1–21. [Https://Doi.Org/10.3390/S20143891](https://doi.org/10.3390/S20143891)
- Milovanović, B., & Pečur, I. B. (2016). Principle Component Thermography For Defect Detection In Reinforced Concrete Structures. *Advances In Cement And Concrete Technology In Africa*, 1.
- Nugroho, A. S., & Arry, T. (2021). Kajian Pengaruh Penggunaan Zat Admixture ” X”, Fiber Dan Semen Grouting Terhadap Kuat Tekan Dan Retak Beton Pada Beton Tanpa Perawatan. *G-Smart*, 3(2), 63. [Https://Doi.Org/10.24167/Gs.V3i2.1784](https://doi.org/10.24167/Gs.V3i2.1784)
- Omar, T., & Nehdi, M. L. (2016). Application Of Passive Infrared Thermography For The Detection Of Defects In Concrete Bridge Elements. *2016 Transportation Association Of Canada's Conference And Exhibition, Tac 2016*, 1–12.
- Pane, F. P., Tanudjaja, H., & Windah, R. S. (2015). Pengujian Kuat Tarik Lentur Beton Dengan Variasi Kuat Tekan Beton. *Jurnal Sipil Statik*, 3(5), 313–321.
- 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. [Https://Doi.Org/10.1007/S13349-022-00550-Y](https://doi.org/10.1007/S13349-022-00550-Y)
- Saputra Gunawan, A., Taran, R., Sudjarwo, P., & Buntoro, J. (2014). *Identifikasi Penyebab Kerusakan Pada Beton Dan Pencegahannya*. 1–7.

- Sirca, G. F., & Adeli, H. (2018). Infrared Thermography For Detecting Defects In Concrete Structures. *Journal Of Civil Engineering And Management*, 24(7), 508–515. <https://doi.org/10.3846/Jcem.2018.6186>
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared Thermography For Temperature Measurement And Non-Destructive Testing. *Sensors (Switzerland)*, 14(7), 12305–12348. <https://doi.org/10.3390/S140712305>
- Wahyudi, N. T., Ilham, F. F., Kurniawan, I., & Sanjaya, A. S. (2018). Rancangan Alat Distilasi Untuk Menghasilkan Kondensat Dengan Metode Distilasi Satu Tingkat. *Jurnal Chemurgy*, 1(2), 30. <https://doi.org/10.30872/CMG.V1i2.1142>
- Yoon, Y. G., Lee, J. Y., Choi, H., & Oh, T. K. (2021). A Study On The Detection Of Internal Defect Types For Duct Depth Of Prestressed Concrete Structures Using Electromagnetic And Elastic Waves. *Materials*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/Ma14143931>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.Patcog.2009.09.023>
- Zhu, Y. K., Tian, G. Y., Lu, R. S., & Zhang, H. (2011). A Review Of Optical Ndt Technologies. *Sensors*, 11(8), 7773–7798. <https://doi.org/10.3390/S110807773>