

DISERTASI

**PENDEKATAN IDENTIFIKASI HOT SPOT UNTUK
APLIKASI INSPEKSI PANEL SURYA MENGGUNAKAN
PENCITRAAN TERMAL**

*An Approach for Hot Spot Identification in Solar Panel Inspection
Application Using Thermal Imaging*

**A. NAJIAH NURUL AFIFAH IBRAHIM
D053191007**



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

DISERTASI

PENDEKATAN IDENTIFIKASI HOT SPOT UNTUK APLIKASI INSPEKSI PANEL SURYA MENGUNAKAN PENCITRAAN TERMAL

A. NAJIAH NURUL AFIFAH IBRAHIM
D053191007

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 10 Juni 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU
NIP. 19740530 199903 1 003

Co-Promotor



Prof. Dr. Ir. H, Ansar Suyuti, M.T., IPU.,
ASEAN.Eng
NIP. 19671231 199202 1 001

Co-Promotor



Prof. Dr. Ir. Indrabayu, S.T., M.T., M.Bus.Sys.,
IPM., ASEAN.Eng
NIP. 19750716 200212 1 004

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST.,
MT., IPM., ASEAN.Eng
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
S3 Teknik Elektro



Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, MT.
NIP. 19601231 198703 1 022

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : A. Najiah Nurul Afifah Ibrahim
Nomor mahasiswa : D053191007
Program studi : S3 Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “PENDEKATAN IDENTIFIKASI HOT SPOT UNTUK APLIKASI INSPEKSI PANEL SURYA MENGGUNAKAN PENCITRAAN TERMAL” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T, M.Eng., IPU sebagai Promotor, Prof. Dr. Ir. H, Ansar Suyuti, M.T., IPU., ASEAN.Eng sebagai co-promotor-1 dan Prof. Dr. Ir. Indrabayu, S.T., M.T., M.Bus.Sys., IPM., ASEAN.Eng. sebagai co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di *Prosiding 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat 2020)* sebagai artikel dengan judul “*Hot spot Detection in Photovoltaic Module using Otsu Thresholding Method*”, *Prosiding 2021 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application (ISITIA 2021)* sebagai artikel dengan judul “*A New Approach for Hot Spot Solar Cell Detection based on Multi-level Otsu Algorithm*”, *Jurnal ICIC Express Letters Vol. 15 No. 7* sebagai artikel dengan judul “*A review on image processing techniques for damage detection on photovoltaic panels*”, dan *Jurnal International Journal of Innovative Computing, Information and Control Vol. 19 No. 1* sebagai artikel dengan judul “*Improving the Image Quality of Grayscale Thermal Images Taking from Photovoltaic Panel with Contrast Enhancement Method*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 16 Mei 2024

Yang menyatakan



A. Najiah Nurul Afifah Ibrahim

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU sebagai promotor, Prof. Prof. Dr. Ir. H, Ansar Suyuti, M.T., IPU., ASEAN.Eng sebagai co-promotor- 1, dan Prof. Dr. Ir. Indrabayu, S.T., M.T., M.Bus.Sys., IPM., ASEAN.Eng. sebagai co-promotor-2. Terima kasih yang tak terhingga atas bimbingan, dukungan, kesabaran, kritik serta saran yang membangun dan sangat menginspirasi penulis untuk menghasilkan karya yang berkualitas.
2. Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., Dr. Ir. Ingrid Nurtanio, M.T., Dr. Adnan, S.T., M.T., dan Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. sebagai komisi tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat bermanfaat bagi penulis dalam penyelesaian segala rangkaian penelitian mulai dari proposal hingga terselesaikannya disertasi ini.
3. Prof. Dr. Ir. Andani, M.T. sebagai Ketua Program Studi S3 Teknik Elektro yang selalu berusaha memotivasi penulis.
4. Kepada Dikti, terima kasih atas beasiswa PMDSU yang diberikan selama empat tahun menempuh program pendidikan magister dan doktor.
5. Suami yaitu Andi Asvin Mahersatillah Suradi S.Kom., M.T. dan anak Andi Khalid Ghifari. Terima kasih atas segala bentuk dukungan dan pengertian yang luar biasa kepada penulis.
6. Kedua orang tua yaitu bapak Andi Ibrahim Muallah dan ibu July A. Anshar, kakak A. Hikmatyar, adik A. Nadiah Nurul Fadilah, serta seluruh anggota keluarga lainnya yang telah memberikan dukungan moral dan doa selama proses penulisan disertasi ini.

7. Apresiasi juga ditujukan kepada ibu Prof. Dr. Eng. Intan Sari Areni, S.T., M.T. yang selalu memberikan motivasi dan nasihat bijak kepada penulis untuk menyelesaikan pendidikan ini.
8. Seluruh staff Departemen Teknik Elektro yang selalu membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung, Bu Tika, Pak Iccang, dan lainnya, juga Pak Budi laboran lab DIL yang telah membantu penulis mengambil data.
9. Serta semua teman-teman yang setia memberikan dukungan hingga saat ini, kakak Uya, kakak Rasna, kakak Baizul, kakak Sofy, Pak Arafah, Bu Yulia, Pak Ali, dan semuanya yang mungkin terlupa untuk disebutkan. Semoga Allah balas kebaikan-kebaikannya dengan berlipa-lipat ganda. Aamiin.

Penulis menyadari bahwa Disertasi ini masih memiliki banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Untuk itu melalui kata pengantar ini penulis sangat terbuka menerima kritik serta saran yang membangun sehingga secara bertahap penulis akan dapat memperbaikinya.

Gowa, 23 Juli 2024

A. Najiah Nurul Afifah Ibrahim

ABSTRAK

A. NAJIAH NURUL AFIFAH IBRAHIM. Pendekatan Identifikasi Otomatis Hot Spot untuk Aplikasi Inspeksi Panel Surya Menggunakan Pencitraan Termal (dibimbing oleh **Syafaruddin, Ansar Suyuti, Indrabayu**)

Panel surya atau sistem fotovoltaik (PV) semakin populer sebagai sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan. Modul PV, sebagai komponen kunci dalam sistem fotovoltaik, rentan terhadap kerusakan yang dapat mengurangi kinerja dan efisiensi sistem. Oleh karena itu, pemeriksaan reguler pada sistem PV sangat penting untuk memastikan kinerja optimal dan mencegah kegagalan operasional.

Penelitian ini memperkenalkan pendekatan inovatif untuk deteksi kesalahan dini, khususnya dalam mengidentifikasi hot spot pada modul panel surya. Hot spot merupakan anomali yang dapat diamati melalui termografi. Pemanfaatan teknologi termografi atau pencitraan termal ini melibatkan langkah-langkah pengolahan citra untuk identifikasi hot spot secara otomatis, yang kemudian diterapkan pada aplikasi inspeksi panel surya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inspeksi panel surya berbasis citra termal mampu mengidentifikasi hot spot secara efektif. Pemanfaatan metode segmentasi baru yaitu *Adaptive Peaks-Guided Multi-level Thresholding*, peningkatan kualitas citra termal melalui peningkatan kontras menggunakan *Histogram Equalization*, dan analisis rasio aspek pada bentuk hot spot memungkinkan identifikasi dengan mendeteksi dan mengklasifikasi hot spot beserta kemungkinan penyebabnya. Selain itu, aplikasi seluler dengan integrasi notifikasi push dapat memfasilitasi pemantauan real-time sistem panel surya di masa depan.

Kata kunci: panel surya, citra termal, hot spot, inspeksi, aplikasi seluler

ABSTRACT

A. NAJIAH NURUL AFIFAH IBRAHIM. An Approach for Automatic Hot Spot Identification in Solar Panel Inspection Application Using Thermal Imaging (supervised by **Syafaruddin, Ansar Suyuti, Indrabayu**)

The solar panel or photovoltaic (PV) system is becoming increasingly popular as a renewable and environmentally friendly energy source. As a component in the photovoltaic system, PV modules are susceptible to damage that can reduce the system's performance and efficiency. Therefore, regular inspections of PV systems are crucial to ensure optimal performance and prevent operational failures.

This research introduces an innovative approach to early fault detection, particularly in identifying hot spots on solar panel modules. Hot spots are anomalies detectable through thermography, captured by an infrared thermal camera. Utilizing thermography or thermal imaging technology involves image processing steps for automatic hot spot identification, which is subsequently used in a solar panel inspection application.

The results showed that thermal image-based solar panel inspections could identify hot spots effectively. Utilizing the new segmentation method called Adaptive Peaks-Guided Multi-level Thresholding, improved thermal image quality through contrast enhancement using Histogram Equalization and aspect ratio analysis of hot spot shapes enables identification by detecting and classifying hot spots and their possible causes. In addition, a mobile app with push notification integration could facilitate real-time monitoring of solar panel systems in the future.

Keywords: solar panel, thermal image, hot spot, inspection, mobile application

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI.....	3
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	16
1.1 Latar Belakang Penelitian.....	16
1.2 Rumusan Masalah.....	19
1.3 Tujuan Penelitian	20
1.4 Manfaat Penelitian.....	20
BAB II KERANGKA KONSEPTUAL PENELITIAN	22
2.1 Kerangka konsep.....	22
2.2 Roadmap Penelitian	23
2.3 Sumber Data	25
2.4 Kebaharuan (<i>Novelty</i>)	26
BAB III TINJAUAN TEKNIK PENGOLAHAN CITRA UNTUK DETEKSI KERUSAKAN PADA PANEL FOTOVOLTAIK	27
3.1 Abstrak.....	27
3.2 Pendahuluan	27

3.3 Klasifikasi Kerusakan.....	28
3.4 Deteksi Kerusakan menggunakan Teknik Pencitraan Termal	32
3.5 Teknik Visi Komputer untuk Deteksi Kerusakan – Proses Umum.	33
3.6 Kesimpulan	36

**BAB IV PENGOLAHAN CITRA TERMAL UNTUK DETEKSI *HOT SPOT*
PADA MODUL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN METODE**

THRESHOLDING	37
4.1 Abstrak.....	37
4.2 Pendahuluan	37
4.3 Metodologi	41
4.4 Hasil Penelitian.....	48
4.5 Kesimpulan	52

**BAB V MENINGKATKAN KUALITAS CITRA TERMAL *GRAYSCALE*
YANG DIAMBIL DARI PANEL FOTOVOLTAIK DENGAN METODE**

<i>CONTRAST ENHANCEMENT</i>.....	53
5.1 Abstrak.....	53
5.2 Pendahuluan	53
5.3 Teori Terkait.....	55
5.4 Metodologi	60
5.5 Hasil Penelitian dan Pembahasan.....	64
5.6 Kesimpulan	68

BAB VI PENDEKATAN IDENTIFIKASI HOT SPOT OTOMATIS DALAM MODUL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN <i>ADAPTIVE PEAKS- GUIDED MULTI-LEVEL THRESHOLDING</i> DAN ANALISIS RASIO	
ASPEK	70
6.1 Abstrak	70
6.2 Pendahuluan	71
6.3 Metodologi	73
6.4 Hasil dan Pembahasan	82
6.5 Kesimpulan	86
BAB VII PEMBAHASAN UMUM	88
7.1 Pengaruh Hot Spot terhadap Kinerja Panel Surya	88
7.2 Teknologi Pencitraan Termal pada Panel Surya	90
7.3 Tahapan Pengolahan Citra Termal Panel Surya	92
7.4 Konsep Histogram dan Plot CDF dari citra termal PV	95
7.5 Kontribusi Penelitian	97
BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN	102
8.1 Kesimpulan	102
8.2 Saran	103
DAFTAR PUSTAKA	104
LAMPIRAN	111
Lampiran 1. Dokumentasi Pengambilan Data	111
Lampiran 2. Source Code pada bagian <i>Image Processing</i>	112

Lampiran 3. Source Code pada bagian Aplikasi Mobile 115

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi kerusakan pada modul PV	29
Tabel 2. Hasil Percobaan.....	49
Tabel 3. Hasil Percobaan (Topik Penelitian III)	50
Tabel 4. Contoh Tampilan Citra Grayscale dan Histogramnya	58
Tabel 5. Contoh Tampilan Citra <i>Grayscale</i> dan Plot CDF-nya	59
Tabel 6. Hasil Histogram dan CDF Citra Termal <i>Grayscale</i> Fotovoltaik.....	65
Tabel 7. Citra Masukan dengan Hasil Pengolahan Citra Termal	83
Tabel 8. Pengujian <i>Blackbox</i>	86
Tabel 9. Uraian Kontribusi dari setiap Topik Penelitian	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kerangka Konseptual Penelitian.....	22
Gambar 2. Roadmap Penelitian.....	24
Gambar 3. Citra Termal dari Dataset	25
Gambar 4. Citra PV dari kamera termal genggam, terdiri dari citra tampak dan citra termal yang diambil dengan ketinggian: (a) 0,3 meter, (b) 1,5 meter, dan (c) 3 meter	25
Gambar 5. Beberapa contoh kerusakan	29
Gambar 6. Modul PV menunjukkan sel yang terlalu panas karena bayangan oleh tanaman (Jahn et al., 2018).....	33
Gambar 7. Proses Umum Teknik Visi Komputer untuk Deteksi Kerusakan	33
Gambar 8. Hasil <i>preprocessing</i> citra termal modul PV	41
Gambar 9. Histogram citra <i>grayscale</i>	43
Gambar 10. Hasil Segmentasi Bi-level Otsu thresholding	43
Gambar 11. Diagram Alir <i>Multilevel Thresholding</i>	44
Gambar 12. Citra termal fotovoltaik yang tidak dicrop. (a) Citra <i>grayscale</i> , (b) Citra tersegmentasi	46
Gambar 13. Citra biner. (a) Sebelum <i>morphological area opening</i> , (b) Setelah <i>morphological opening</i> (Topik Penelitian III).....	47
Gambar 14. Hasil Deteksi dengan data yang <i>dicrop</i>	48
Gambar 15. Hasil Deteksi dari data yang tidak <i>dicrop</i>	48
Gambar 16. Diagram akurasi dari setiap citra	51
Gambar 17. Citra tersegmentasi yang kurang tepat dan hasil deteksi DJI_0114	52
Gambar 18. Perbedaan antara citra <i>input</i> kontras rendah dan hasil citra yang disempurnakan dengan fungsi <i>f</i>	56
Gambar 19. Contoh Histogram Citra.....	57
Gambar 20. Diagram metode yang diusulkan	60
Gambar 21. Citra modul fotovoltaik: (a) Citra termal <i>grayscale</i> asli; (b) citra biner.....	61
Gambar 22. (a) Citra biner; (b) Citra modul PV yang terdeteksi dengan kontur (Topik Penelitian IV).....	62
Gambar 23. Representasi lima zona tonal dari histogram citra.....	63
Gambar 24. Histogram tonal <i>zones contrast-stretching</i>	66
Gambar 25. Histogram tonal <i>zones histogram equalization</i>	66
Gambar 26. Metrik Kinerja Deteksi Sel <i>Hot spot</i> dengan Metode Peningkatan Kontras..	67

Gambar 27. Modul PV yang diamati.....	74
Gambar 28. Citra PV dari kamera termal genggam, terdiri dari citra tampak (<i>visible image</i>) dan citra termal (<i>thermal image</i>) yang diambil dengan ketinggian berbeda: (a) 0,3 meter, (b) 1,5 meter, dan (c) 3 meter.....	74
Gambar 29. Alur pengambilan gambar untuk pengolahan citra	75
Gambar 30. Alur pengambilan gambar untuk pengolahan citra	76
Gambar 31. Diagram alir metode <i>adaptive peaks guided</i> yang diusulkan.....	78
Gambar 32. Histogram ROI yang ditingkatkan dengan puncak yang terdeteksi	78
Gambar 33. Ilustrasi komponen rasio aspek.....	79
Gambar 34. Alur pemberitahuan <i>push</i>	80
Gambar 35. Perbandingan hasil penelitian sebelumnya	82
Gambar 36. Tampilan Layar (a) Halaman Utama, (b) Halaman setelah mengklik Tombol " <i>Browse and Upload Image</i> ".....	84
Gambar 37. Tampilan pemberitahuan <i>push</i> pada sistem	85
Gambar 38. Tampilan Hasil	85
Gambar 39. Proses terbentuknya Hot Spot (Sun et al., 2022).....	88
Gambar 40. Model sederhana dari sel <i>hot spot</i> (Gosumbonggot & Fujita, 2019).....	88
Gambar 41. Interval radiasi elektromagnetik	91
Gambar 42. Contoh palet warna dari kamera termal	91
Gambar 43. Diagram tahapan pengolahan citra termal panel surya.....	92
Gambar 44. Proses segmentasi untuk mencari wilayah modul PV	93
Gambar 45. Hasil Perbaikan Kualitas Citra.....	94
Gambar 46. Histogram Citra dengan 16 puncak yang terdeteksi.....	94
Gambar 47. Hasil Segmentasi Hot Spot	95
Gambar 48. Perbandingan Kurva CDF <i>Low contrast</i> dan <i>high contrast</i>	96
Gambar 49. Data citra yang digunakan (a) cropped, dan (b) tidak dicrop	98
Gambar 50. Sebelum dan sesudah peningkatan kontras diterapkan pada Citra modul PV yang terdeteksi	98
Gambar 51. Gambaran Umum hasil dari Setiap Luaran Publikasi	100

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Banyak negara telah tertarik dengan energi baru dan terbarukan dan meminimalkan dampak lingkungan yang dihasilkan oleh penggunaan bahan bakar fosil (Lee et al., 2018). Pengembangan pembangkit listrik berbasis panel surya menjadi solusi bagi dunia untuk beralih ke sumber daya terbarukan. Panel surya atau modul fotovoltaik telah menjadi fokus pengembangan yang signifikan dibandingkan dengan berbagai jenis sumber daya berkelanjutan lainnya. Keistimewaan dari panel surya terletak pada kemampuannya mengkonversi energi matahari menjadi arus listrik tanpa memerlukan transmisi seperti yang dibutuhkan oleh jaringan listrik konvensional, karena dapat dipasang secara modular di setiap lokasi yang membutuhkan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keamanan dalam pemasangan, tetapi juga mendukung konsep keberlanjutan (Al-Shahri et al., 2021). Proses pembangkit listrik menggunakan panel surya tidak menyebabkan kebisingan dan mengurangi polusi secara signifikan, berbeda dengan metode konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil seperti minyak dan batu bara. Dengan demikian, pengembangan dan implementasi panel surya tidak hanya memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, tetapi juga membawa dampak positif terhadap lingkungan secara keseluruhan.

Panel surya telah meraih popularitas yang tinggi dalam aplikasi perumahan dan komersial, dengan jumlah instalasi yang terus bertambah dengan pesat. Sejak tahun 2010, ketika biaya produksi mulai turun, lebih dari 110 negara telah menginvestasikan sumber daya dan dana dalam energi surya, menandai peningkatan popularitas instalasi fotovoltaik (International Energy Agency (IEA), 2019). Sektor instalasi, operasi, dan pemeliharaan pasar layanan fotovoltaik diprediksi akan meningkat sebesar 10,81 miliar dolar dari 2019 hingga 2023, atau 16% per tahun (Wire, 2019). Namun, setelah modul fotovoltaik berhasil dipasang, muncul tantangan baru terkait dengan pemeliharaan dan pengawasan kondisi modul PV. Kesadaran yang rendah terhadap perlunya memeriksa kondisi modul PV dapat

menyebabkan masalah serius. Modul yang mengalami kesalahan operasional tanpa mendapat perhatian untuk jangka waktu yang lama dapat mengakibatkan kegagalan panel PV secara keseluruhan. Dampaknya tidak hanya terbatas pada hilangnya energi yang signifikan tetapi juga berisiko menyebabkan matinya seluruh sistem, bahkan meningkatkan risiko terjadinya kebakaran (Q. Wang et al., 2021). Oleh karena itu, inspeksi dan perawatan rutin modul PV menjadi esensial untuk memastikan kinerja yang optimal dan mencegah kerugian yang tidak diinginkan.

Secara umum, penyebab kesalahan modul fotovoltaik diawali dengan adanya *hot spot*. *Hot spot* adalah cacat yang ditemukan pada modul fotovoltaik yang mengganggu operasi modul PV (Salazar & Macabebe, 2016). Fenomena *hot spot* terjadi ketika setidaknya satu area mengalami arus hubung singkat yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan area lainnya. Dalam kasus seperti ini, area atau sel yang bermasalah dipaksa untuk mengalirkan arus yang melebihi kemampuannya sebagai pembangkit daya, yang pada akhirnya menghasilkan panas, bukan mengonversi energi menjadi listrik. Pemanasan berlebih pada area kecil ini dapat menyebabkan dampak destruktif, seperti retaknya sel atau kaca, degradasi modul PV yang signifikan, hingga terjadinya kebakaran (Q. Wang et al., 2021). Dalam menghadapi tantangan ini, inspeksi visual muncul sebagai pendekatan yang solutif dalam deteksi dini dan pemantauan kesalahan pada panel surya. Keunggulan inspeksi visual terletak pada kemampuannya untuk memberikan gambaran langsung tentang kondisi fisik modul PV, memungkinkan identifikasi *hot spot* secara visual melalui termografi.

Termografi atau pencitraan termal telah terbukti efektif dalam memantau peralatan listrik dan mendiagnosis kesalahan, termasuk dalam pemantauan panel surya (Haider et al., 2019). Teknologi ini dapat memantau perbedaan suhu pada modul tanpa kontak fisik, meminimalkan risiko kerusakan lebih lanjut pada modul PV. Pencitraan termal menggunakan kamera termal inframerah bekerja dengan mengukur emisivitas panas pada area atau titik tertentu dengan memanfaatkan energi infra merah yang tidak terlihat dengan mata, dipancarkan oleh suatu objek, dan kemudian diubah menjadi citra termal secara visual (Kyal et al., 2018). Namun, detail yang terlihat dapat menimbulkan perbedaan persepsi visual manusia karena adanya keterbatasan perangkat akuisisi citra dan keragaman lingkungan fotovoltaik.

Oleh karena itu, diperlukan pengolahan citra untuk mendeteksi adanya *hot spot* secara otomatis. Hal ini penting untuk menentukan lokasi anomali dengan tepat.

Dalam tahapan pengolahan citra, segmentasi memiliki pengaruh besar dalam proses identifikasi. Beberapa algoritma atau langkah perlu dijalankan untuk menyelesaikan proses identifikasi seperti yang diteliti oleh Alfaro-Mejia et al. Studi ini memperkenalkan dua teknik langkah segmentasi untuk citra termal fotovoltaiik, yaitu metode level-set kontur aktif (ACMLS) dan *filtering* berdasarkan area. Dengan teknik tersebut, kontur panel surya dan sudut-sudutnya diperoleh, kemudian diproses menggunakan operasi Morfologi. Transformasi Hough diterapkan untuk menemukan garis pada citra termal. Evaluasi dilakukan terhadap ekstraksi wilayah yang diminati menggunakan *Dice similarity koefisien* (DSC), *Intersection over Union* (IoU), dan metrik segmentasi *recall* (Alfaro-Mejía et al., 2020). Namun, penelitian ini belum sampai pada pendeteksian *hot spot* pada panel surya. *Thresholding* adalah metode segmentasi umum yang mengubah data citra *grayscale* menjadi format biner dengan mencari nilai *threshold* dari citra tersebut. Dalam konteks citra termal, *thresholding* Otsu memiliki hasil yang memuaskan dalam segmentasi peralatan listrik (Haider et al., 2019). Meskipun demikian, langkah-langkah selanjutnya dalam penelitian ini perlu difokuskan pada pendeteksian *hot spot* pada panel surya untuk meningkatkan ketepatan analisis.

Visualisasi citra termal *grayscale* seringkali sulit untuk didefinisikan secara langsung oleh penglihatan manusia dan komputer karena masalah kontras yang cenderung rendah. Citra termal seringkali menampilkan detail buram dan kontras rendah dalam beberapa kondisi, yang dapat disebabkan oleh faktor lingkungan dan perbedaan dalam kualitas kamera yang digunakan (Román et al., 2019). Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan upaya untuk meningkatkan kualitas citra termal melalui penerapan teknik *preprocessing* citra yang praktis guna memperoleh interpretasi citra yang lebih baik dan hasil analisis yang lebih akurat. Salah satu langkah kritis dalam *preprocessing* citra adalah perbaikan kualitas citra. Langkah ini dirancang untuk meningkatkan fitur suatu citra dengan memperbaiki aspek visual dan memberikan representasi konversi yang dapat diterima. Proses ini menjadi penting dalam langkah-langkah pengolahan citra berikutnya, seperti segmentasi, identifikasi dan evaluasi (Narayana Tinnaluri & Kumar, 2019). Oleh

karena itu, pada tahap ini, metode peningkatan kontras diterapkan untuk meningkatkan kontras citra, menghasilkan detail atau informasi yang lebih tepat mengenai citra tersebut. Langkah ini mendukung proses pengolahan citra yang lebih lanjut, memastikan bahwa data yang dihasilkan lebih berkualitas dan dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut.

Teknologi inspeksi yang efisien diperlukan untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem PV dengan memberikan informasi detail terkini untuk mengambil tindakan pencegahan jika *hot spot* terdeteksi. Solusi nirkabel menawarkan ketahanan, pengambilan keputusan yang lebih cepat, peningkatan keamanan, mobilitas, dan efisiensi biaya. Keberadaan solusi ini menjadi sangat penting dalam kehidupan modern yang semakin bergantung pada aplikasi seluler, memungkinkan akses data *real-time*, dan adanya notifikasi untuk pengguna. Informasi mengenai penyebab *hot spot* juga sangat penting untuk penanganannya secara tepat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan identifikasi *hot spot* secara *real-time* dalam Aplikasi Seluler Inspeksi Fotovoltaik. Dengan menggabungkan teknologi pemantauan nirkabel dan kemampuan analisis citra termal, penelitian ini diharapkan dapat membawa inovasi signifikan dalam deteksi dini kesalahan pada sistem PV. Dengan demikian, aplikasi seluler akan menjadi lebih efisien dalam memberikan informasi yang tepat waktu, mendukung pengambilan keputusan yang cepat, dan meningkatkan keandalan serta keamanan operasional sistem fotovoltaik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada uraian latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini yakni:

1. Bagaimana tinjauan teknik pengolahan citra dalam mendeteksi kerusakan pada panel fotovoltaik?
2. Bagaimana kemampuan metode pengolahan citra termal dalam mendeteksi *hot spot* pada modul fotovoltaik?
3. Bagaimana melakukan pembangunan aplikasi inspeksi panel surya untuk membantu mengidentifikasi *hot spot* serta memberikan informasi yang lebih cepat dan efektif terkait *hot spot* pada panel surya?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian yaitu:

1. Menelaah teknik pengolahan citra untuk mendeteksi kerusakan pada panel fotovoltaik guna meningkatkan kemampuan identifikasi kerusakan.
2. Mengevaluasi keakuratan dari metode pengolahan citra termal yang dikembangkan dalam mendeteksi *hot spot* pada modul fotovoltaik, dengan menguji berbagai data citra dengan kondisi berbeda.
3. Membangun aplikasi inspeksi panel surya berbasis pengolahan citra termal untuk mengidentifikasi *hot spot* serta memberikan informasi yang lebih cepat dan efektif terkait *hot spot* pada panel surya.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu:

1. Peningkatan efektivitas pemantauan panel surya: Penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada pengembangan sistem pemantauan panel surya yang lebih efektif. Dengan menerapkan teknik pengolahan citra termal dan metode deteksi *hot spot* yang lebih baik, pemantauan kondisi panel surya dapat dilakukan dengan lebih akurat dan *real-time*.
2. Deteksi dini kerusakan: Dengan fokus pada deteksi *hot spot* dan kerusakan pada panel surya, penelitian ini dapat membantu dalam mengidentifikasi potensi kerusakan lebih awal. Hal ini akan memungkinkan tindakan pencegahan atau perbaikan yang lebih cepat, mengurangi risiko kehilangan efisiensi dan mencegah kerusakan lebih lanjut.
3. Peningkatan keamanan dan keandalan energi surya: Dengan memberikan solusi untuk mendeteksi dan mengatasi *hot spot*, penelitian ini dapat meningkatkan keandalan dan keamanan sistem energi surya. Ini dapat membantu menghindari kegagalan sistem dan potensi risiko kebakaran yang dapat disebabkan oleh *hot spot* yang tidak terdeteksi.
4. Kontribusi terhadap penelitian ilmiah: Penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang pengolahan citra termal dan deteksi kesalahan pada panel

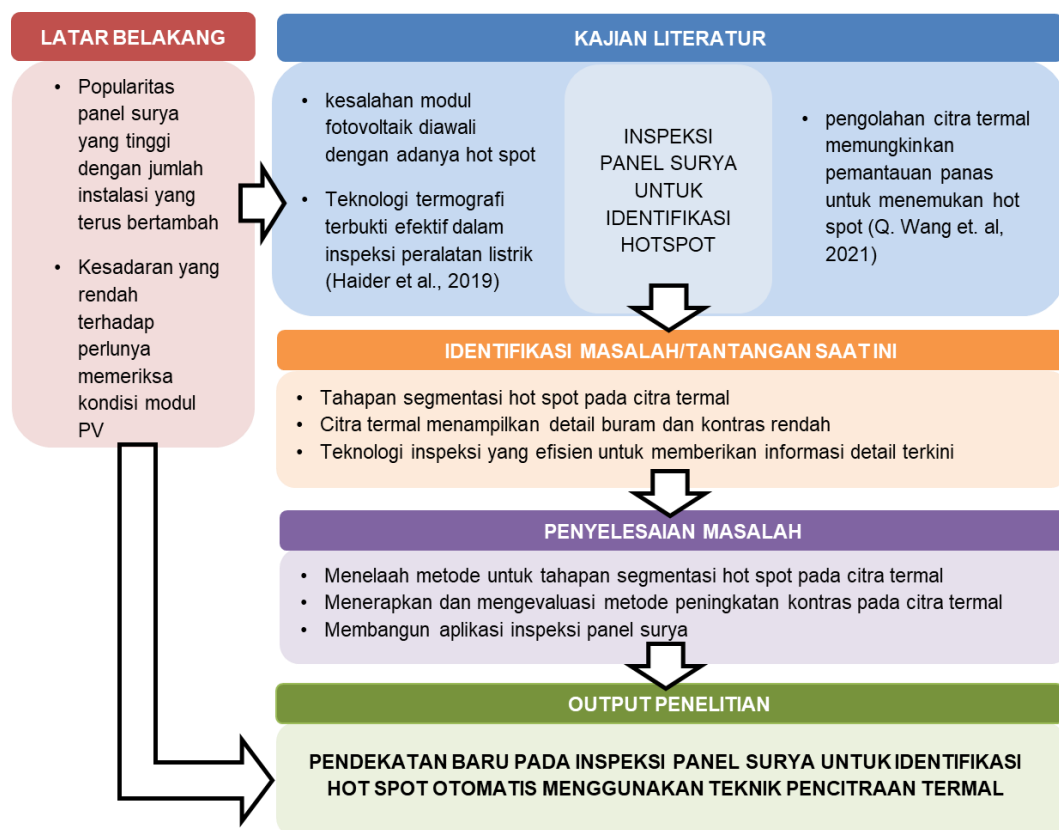
surya. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi peneliti lain dalam mengembangkan metode deteksi kesalahan panel surya yang lebih efektif dan efisien.

BAB II

KERANGKA KONSEPTUAL PENELITIAN

2.1 Kerangka konsep

Kerangka konseptual inspeksi panel surya untuk identifikasi *hot spot* didasarkan pada penggunaan metode pengolahan citra termal untuk mengidentifikasi adanya *hot spot* dalam modul fotovoltaik serta aplikasi *mobile* sebagai antarmuka inspeksi panel surya untuk mengirim notifikasi ke pengguna aplikasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Konseptual Penelitian

Dalam beberapa tahun terakhir, popularitas panel surya telah meningkat pesat, tercermin dari peningkatan jumlah instalasi di seluruh dunia. Namun demikian, kesadaran terhadap perlunya memeriksa kondisi modul fotovoltaik (PV) masih rendah, menyebabkan risiko tidak terdeteksi dan penanganan masalah yang

kurang efisien. Studi literatur menunjukkan bahwa kesalahan pada modul fotovoltaik seringkali dimulai dengan munculnya *hot spot*. Teknologi termografi telah terbukti efektif dalam inspeksi peralatan listrik, termasuk panel surya (Haider et al., 2019). Pengolahan citra termal juga memungkinkan pemantauan panas untuk mendeteksi *hot spot* dengan akurat (Q. Wang et al., 2021). Beberapa tantangan yang dihadapi saat ini melibatkan tahapan segmentasi *hot spot* pada citra termal, di mana citra seringkali menampilkan detail buram dan kontras rendah. Selain itu, diperlukan teknologi inspeksi yang lebih efisien untuk memberikan informasi detail terkini tentang kondisi panel surya.

Dalam rangka mengatasi tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menelaah metode untuk tahapan segmentasi *hot spot* pada citra termal. Selain itu, penelitian ini akan menerapkan dan mengevaluasi metode peningkatan kontras pada citra termal untuk meningkatkan kualitas citra. Sebagai langkah lanjutan, penelitian ini juga akan membangun aplikasi inspeksi panel surya. Dengan fokus pada pendekatan baru, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode inspeksi panel surya dengan identifikasi *hot spot* yang dilakukan secara otomatis menggunakan teknik pencitraan termal. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dalam memperbaiki efisiensi inspeksi panel surya dan mendukung pemeliharaan yang lebih baik dalam penggunaan teknologi energi terbarukan ini.

2.2 Roadmap Penelitian

Penelitian ini memaparkan serangkaian tahapan penelitian yang menginvestigasi teknik pengolahan citra untuk mendeteksi anomali hot spot pada panel fotovoltaik secara efektif. Gambar 2 memperlihatkan roadmap penelitian yang dilakukan.

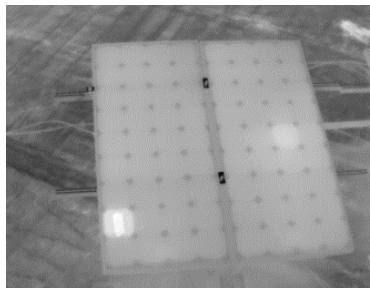
TAHUN	2019 - 2020	2020	2021	2022	2023
TOPIK	Studi Gangguan pada Modul Fotovoltaik dan Penerapan Pengolahan Citra untuk Identifikasi	Segmentasi Hot Spot pada citra termal Modul PV	Segmentasi Hot Spot pada Modul PV	Perbaikan Citra Termal Fotovoltaik untuk Deteksi Hotspot	Pengembangan aplikasi inspeksi modul PV
TUJUAN	Menyelidiki jenis dan klasifikasi gangguan dan mereview teknik pengolahan citra	Mendeteksi hot spot menggunakan metode Otsu thresholding	Mendeteksi hot spot menggunakan metode Multi-level Otsu	Meningkatkan kualitas citra termal menggunakan metode peningkatan kontras	Mengidentifikasi menggunakan metode baru Adaptive Peaks-Guided Multi-level Thresholding, analisis rasio aspek, dan memberikan peringatan melalui aplikasi
LUARAN	Artikel Jurnal 1 <i>A review on image processing techniques for damage detection on photovoltaic panels</i> ICIC Express Letters Vol. 15 No. 7	Artikel Prosiding 1 <i>Hotspot Detection in Photovoltaic Module using Otsu Thresholding Method</i> IEEE COMNETSAT 2020	Artikel Prosiding 2 <i>A New Approach for Hot Spot Solar Cell Detection based on Multi-level Otsu Algorithm</i> IEEE ISITIA 2021	Artikel Jurnal 2 <i>Improving the Image Quality of Grayscale Thermal Images Taking from Photovoltaic Panel with Contrast Enhancement Method</i> IJICIC Vol. 19 No. 1	Artikel Jurnal 3 <i>A Novel Approach for Automatic Hot Spot Identification in Photovoltaic Module using Adaptive Peaks-Guided Multi-level Thresholding and Aspect Ratio Analysis</i>

Gambar 2. Roadmap Penelitian

Teknik pengolahan citra merupakan komponen kritis dalam identifikasi *hot spot*, dan berbagai upaya telah dilakukan untuk mengoptimalkan pendekatan ini. Salah satu metode yang dikaji adalah *Otsu Thresholding*, di mana penelitian ini menggali implementasinya dalam mendeteksi hot spot pada modul fotovoltaik. Pencarian juga dilakukan terhadap pendekatan baru dengan menerapkan algoritma *Multi-Level Otsu* untuk mendeteksi *hot spot* pada sel surya. Selain itu, penelitian ini mengeksplorasi penerapan metode peningkatan kontras untuk meningkatkan kualitas citra termal *grayscale* panel fotovoltaik. Seiring dengan itu, pengembangan metode segmentasi baru secara otomatis menentukan jumlah *thresholds* berdasarkan jumlah *peaks* dari histogram citra termal PV skala abu-abu yang ditingkatkan, membuat metode berjalan secara adaptif. Selain itu, *hot spot* dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuknya untuk mengetahui penyebab potensial menggunakan analisis rasio aspek. Aplikasi inspeksi panel surya menjadi fokus untuk mendapatkan hasil informasi detail terkait *hot spot* secara *real-time*. Serangkaian penelitian ini bertujuan untuk merinci dan menggabungkan temuan-temuan tersebut, membentuk pemahaman yang holistik tentang cara meningkatkan efektivitas inspeksi panel surya dalam mengidentifikasi *hot spot*.

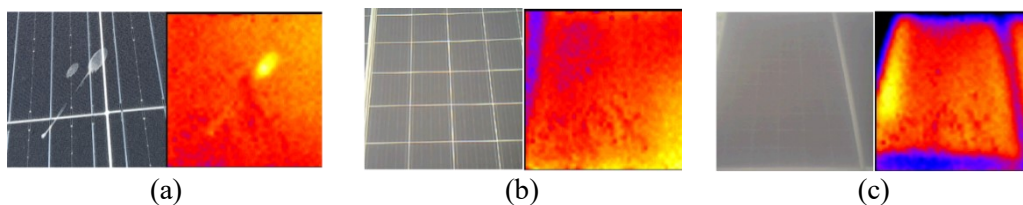
2.3 Sumber Data

Citra termal diunduh dari Journal Data in Brief Elsevier yang berjudul “*Dataset for recognition of snail trails and hot spot failures in monocrystalline Si solar panels*”. Citra dari dataset ini diambil menggunakan kamera *IR Zenmuse XT* dengan panjang gelombang 7 - 13 μm untuk deskripsi termal modul PV untuk mengenali cacat *hot spot*. Sampel citra termal PV dari kumpulan data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Citra Termal dari Dataset

Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan citra termal yang diambil dengan kamera termal genggam, yang memungkinkan evaluasi kemampuan adaptif dari metode yang diusulkan. Kamera termal genggam yang digunakan beroperasi dalam rentang panjang gelombang 8-12 μm dan dapat menampilkan suhu objek mulai dari -10°C hingga +350°C. Data yang dihasilkan terdiri dari citra termal palet tampak dan Ironbow, masing-masing dengan resolusi 267x267 piksel dalam format .bmp. Citra tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Citra PV dari kamera termal genggam, terdiri dari citra tampak dan citra termal yang diambil dengan ketinggian: (a) 0,3 meter, (b) 1,5 meter, dan (c) 3 meter

Citra diambil dari tiga ketinggian yang berbeda yaitu 0,3 meter, 1,5 meter, dan 3 meter. Pemilihan berbagai ketinggian untuk pengambilan gambar ini

memungkinkan analisis modul PV yang komprehensif, dengan mempertimbangkan beberapa faktor yang dapat memengaruhi performa dan kondisinya.

2.4 Kebaharuan (*Novelty*)

Kebaharuan dari penelitian ini terletak pada hasil identifikasi *hot spot* dari pengolahan citra termal yang secara otomatis dapat mendeteksi dan mengklasifikasikan *hot spot* berdasarkan pendekatan baru yaitu *Adaptive Peaks-Guided Multi-level Thresholding* dan analisis rasio aspek dari bentuk *hot spot* pada pencitraan termal. Pada umumnya, studi sebelumnya lebih berfokus pada deteksi dan klasifikasi *hot spot* dengan waktu komputasi yang lama, sedangkan penelitian ini memperkaya kontribusinya dengan mengeksplorasi teknik segmentasi *thresholding* serta aspek bentuk *hot spot* melalui rasio aspek dengan waktu komputasi yang lebih singkat. Dengan melibatkan pengolahan citra termal, penelitian ini mengintegrasikan elemen analisis terhadap karakteristik bentuk dan penyebab *hot spot* pada panel surya ke dalam aplikasi inspeksi kondisi modul fotovoltaik.