

TESIS

**SISTEM DETEKSI DEBU DAN KOTORAN PADA
PERMUKAAN PANEL SURYA MENGGUNAKAN
ALGORITME *REDUCED RANDOM FOREST***

*Dust and Dirt Detection System on Solar Panel Surface using
Reduced Random Forest Algorithm*

**MARTATI
D032202006**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



PENGAJUAN TESIS

SISTEM DETEKSI DEBU DAN KOTORAN PADA PERMUKAAN PANEL SURYA MENGGUNAKAN ALGORITME *REDUCED RANDOM FOREST*

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

ttd

**MARTATI
D032202006**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



TESIS

SISTEM DETEKSI DEBU DAN KOTORAN PADA PERMUKAAN PANEL SURYA MENGGUNAKAN ALGORITME *REDUCED RANDOM FOREST*

**MARTATI
D032202006**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 06 Oktober 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof.Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT,IPU,ACPE
NIP. 19750605 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

Pembimbing Pendamping



Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T, M.T.
NIP. 19830714 200604 2 001

Ketua Program Studi
S2 Teknik Elektro



Dr. Eng. Ir. Wardi, ST. M.Eng
NIP. 19720828 199903 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Martati
Nomor mahasiswa : D03220200
Program studi : Magister Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Sistem Deteksi Debu dan Kotoran pada Permukaan Panel Surya Menggunakan Algoritme Reduced Random Forest” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof.Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT,IPU,ACPE. NIP. 19750605 200212 1 004 dan Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T, M.T. NIP. 19830714 200604 2 001). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. 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 tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding The 2023 International Conference on Computer Science, Information, Technology and Engineering (ICCOSITE 2023) sebagai artikel dengan judul “*The Economic Impact on Energy Management in Hybrid Street Lights Solar Panel System and Grid:220VAC*”.

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

Gowa, 06 Oktober 2023

Yang menyatakan



Martati

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena hanya dengan nikmat dan karunia-Nya sehingga bisa menyelesaikan penulisan tesis ini. Dan tak lupa Shalawat serta salam semoga tetap terlimpah kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW, sang pembawa kabar gembira dan sebaik-baiknya tauladan bagi yang mengharap Rahmat dan Hidayah-Nya.

Bukan hal yang mudah untuk menyelesaikan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan tesis. Berkat bimbingan, arahan, dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini disusun sesuai dengan persyaratan yang diberikan. Maka, Penulis dengan tulus mengahaturkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua terkasih, M. Tahir dan Ibu Yenni, adik dan segenap keluarga yang memberikan doa dan dukungan dalam penyelesaian tesis ini.
2. Bapak Dr.Eng. Wardi, S.T., M. Eng sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro.
3. Bapak Prof. Dr.-ing. Ir. Faizal Arya Samman, S.T., M.T., IPU., APCE., sebagai pembimbing I dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari., S.T., M.T., sebagai pembimbing II, yang senantiasa memberikan motivasi, nasehat, dan saran-saran dalam penyelesaian tesis ini.
4. Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, M.T., sebagai penguji I, Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T., sebagai penguji II, dan Ibu Dr. Ir. Hasniaty A., S.T., M.T., sebagai penguji III atas bimbingan serta arahannya dalam penyelesaian tesis ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar yang telah memberikan kami ilmu, bantuan, dan kemudahan selama kami menempuh pendidikan di Departemen Teknik Elektro.

teman seperjuangan S2 Teknik Elektro atas motivasi dan dukungannya.



Penulis menyadari bahwa tesis ini tidak luput dari kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari para pembaca, sangat penulis harapkan demi penyempurnaan dan perbaikan tesis ini.

Martati



ABSTRAK

MARTATI. Sistem Deteksi Debu dan Kotoran pada Permukaan Panel Surya Menggunakan Algoritme Reduced Random Forest (dibimbing oleh **Faizal Arya Samman, Fitriyanti Mayasari**).

Panel surya telah mengalami perkembangan yang signifikan sebagai sumber energi terbarukan yang penting dalam beberapa dekade terakhir. Meskipun demikian, tantangan utamanya adalah penurunan output daya akibat penumpukan debu dan kotoran pada permukaan panel surya. Deteksi otomatis debu dan kotoran menjadi penting guna mengurangi biaya perawatan dan meningkatkan efisiensi daya pada panel surya. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem prediksi debu dan kotoran pada panel surya dengan metode algoritme *reduced random forest*. Proses implementasi metode melibatkan pengambilan *dataset*, pelatihan model, dan pengujian model. Hasil implementasi menunjukkan tingkat akurasi 99% dalam mengenali anomali pada panel surya. Hasil analisis kelayakan investasi dengan menghitung *Payback Period* (PP) dan *Net Present Value* (NPV) menunjukkan bahwa investasi sistem yang dirancang layak untuk direalisasikan. Sehingga, metode ini dapat diusulkan sebagai kontribusi dalam pengembangan penelitian memprediksi debu dan kotoran pada panel surya, meningkatkan efisiensi perawatan, dan pemeliharaan serta perpanjangan masa pakai panel surya.

Kata kunci: panel surya, deteksi otomatis debu dan kotoran, *reduced random forest*, efisiensi energi



ABSTRACT

MARTATI. Dust and Dirt Detection System on Solar Panel Surface using Reduced Random Forest Algorithm (supervised by **Faizal Arya Samman, Fitriyanti Mayasari**).

Solar panels have experienced significant development as an important source of renewable energy in recent decades. However, the main challenge is the decrease in power output due to the accumulation of dust and dirt on the surface of the solar panels. Automatic anomaly detection is important to reduce maintenance costs and increase power efficiency in solar panels. The purpose of this research is to develop an dust and dirt prediction system on solar panels using the reduced random forest algorithm method. The method implementation process involves collecting *datasets*, model training, and model testing. The implementation results show an accuracy rate of 99% in recognizing anomalies in solar panels. The results of the investment feasibility analysis by calculating the Payback Period (PP) and Net Present Value (NPV) show that the investment in the designed system is feasible to be realized. Thus, this method can be proposed as a contribution to the development of research to predict dust and dirt in solar panels, increase maintenance efficiency, and maintain and extend the service life of solar panels.

Keywords: solar panels, automatic dust and dirt detection, reduced random forest, energy efficiency



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Teori Penunjang	7
2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	7
2.1.2 Kerusakan Panel Surya.....	8
2.3 Artificial Intelligence (AI)	12
2.4 Algoritme <i>Random Forest</i>	13
2.4 Algoritme <i>Decision Tree</i>	14
2.4 Algoritme <i>K-nearest Neighbors</i>	15
2.8 <i>Confusion Matrix</i>	18
2.5 <i>Precision</i>	18
2.6 <i>Recall</i>	18
2.7 <i>Score</i>	19
2.8 <i>Feedback Period (PP)</i>	19



2.10 <i>Net Present Value</i> (NPV)	20
2.2 Penelitian Terdahulu	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	25
3.2 Tahap Penelitian.....	25
3.3 Perancangan Sistem	27
3.3.1 Desain Perangkat Keras.....	27
3.3.2 Perancangan <i>Website</i>	31
3.4 Cara Kerja Sistem	31
3.5 Instrumen Penelitian	33
3.6 Pengambilan Data	33
1.7 Tahapan <i>Processing</i> Data.....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Hasil Perancangan Sistem	38
4.1.1 Hasil Perancangan Perangkat Keras	38
4.1.2 Hasil Perancangan Perangkat Lunak	40
4.2 Tahap Perancangan Data dan Perancangan Model	40
4.2.1 Tahap Pra-pemrosesan Data	43
4.2.2 <i>Training Set</i>	45
4.3 Evaluasi Hasil <i>Training</i>	49
4.4 <i>Export</i> model ke bahasa C.....	50
4.5 Proses Implementasi dan <i>Testing</i> Model pada Sistem	51
4.5.1 Pengujian Secara Bergantian Pemberian Debu dan Permukaan Panel Bersih.....	51
4.5.2 Pengujian Berdebu Merata pada Permukaan Panel.....	54
4.5.3 Pengujian Berdebu pada Satu Sisi Pinggir Permukaan Panel Surya	56
4.5.4 Pengujian Berdebu pada Dua Sisi Pinggir Permukaan Panel Surya	59
4.5.5 Pengujian Berdebu pada Sisi Tengah Permukaan Panel Surya.....	61
) Pengujian Cuaca Mendung dan Berdebu pada Permukaan Panel	
a 63	
' Pengujian Kotoran Burung Buatan pada Permukaan Panel Surya	66



4.5.5 Rata-rata Hasil Prediksi Model.....	68
4.6. Evaluasi Ekonomi	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN.....	80



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Hotspot pada termal panel surya (Pathak,2022)	8
Gambar 2. Retakan mikro pada panel surya (Dhimish, 2018).....	9
Gambar 3. Jejak siput pada panel surya (Köntges, 1972).....	10
Gambar 4. Perubahan warna dan delemansi pada panel surya (Köntges, 1972) .	10
Gambar 5. Debu yang menempel pada permukaan panel surya (Köntges, 1972)	12
Gambar 6. Komponen machine learning (Kurniawan, 2022).....	13
Gambar 7. Kinerja algoritme (Kurniawan, 2022).....	13
Gambar 8. Flowchart algoritme random forest (Chen, 2018).....	14
Gambar 9. Flowchart algoritme decision tree (Charbuty, 2021).....	15
Gambar 10. Struktur algoritme <i>K-nearest Neighbors</i> (Taunk, 2019).....	16
Gambar 11. Cara kerja algoritme <i>K-nearest Neighbors</i> (Taunk, 2019)	17
Gambar 12. Lokasi pengambilan data, Komp. TVRI Malengkeri.....	25
Gambar 13. Daigram blok tahapan penelitian	27
Gambar 14. Skema sistem	28
Gambar 15. Diagram blok sistem	29
Gambar 16. Diagram alir sistem.....	32
Gambar 17. Diagram Proses Data Menjadi Model.....	34
Gambar 18. Tahap membangun model.....	36
Gambar 19. Sistem Panel Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	39
Gambar 20. Sistem Kontrol Panel Listrik Tenaga Surya (PLTS)	39
Gambar 21. Tampilan Antarmuka <i>Website</i>	40
Gambar 22. Pengambilan dataset mendung.....	41
Gambar 23. Perubahan daya kondisi mendung	42
Gambar 24. Pengambilan dataset cerah.....	42
Gambar 25. Perubahan daya kondisi cerah.....	43
Gambar 26. Modul-Modul Phyton yang Digunakan	45
Gambar 27. Dataset yang Telah Diolah.....	46
Gambar 28. Fitur dan Label Model Random Forest.....	46
29. Data Training dan Data Testing.....	47
30. Buat Model RF dan <i>Training Model</i>	48
31. Hasil Evaluasi Training Model	49



Gambar 32. Model yang telah di-ekspor ke Bahasa C	50
Gambar 33. Uji Coba seling antara Pemberian Debu dan Permukaan Panel Bersih	51
Gambar 34. Hasil Prediksi Uji Coba antara Pemberian Debu dan Permukaan ...	52
Gambar 35. Uji Coba Berdebu Merata pada Permukaan Panel.....	54
Gambar 36. Hasil Prediksi Uji Coba Berdebu Merata pada Permukaan Panel ...	54
Gambar 37. Uji Coba Berdebu pada Satu Sisi Pinggir Permukaan Panel	56
Gambar 38. Hasil Prediksi Uji Coba Berdebu pada Satu Sisi Pinggir Permukaan Panel.....	57
Gambar 39. Uji Coba Berdebu pada Dua Sisi Pinggir Permukaan Panel.....	59
Gambar 40. Hasil Prediksi Uji Coba Berdebu pada <i>Dua</i> Sisi Pinggir Permukaan Panel.....	59
Gambar 41. Hasil Prediksi Uji Coba Berdebu pada Sisi Tengah Permukaan Panel	61
Gambar 42. Uji Coba Cuaca Mendung dan Berdebu pada Permukaan Panel.....	63
Gambar 43. Hasil Prediksi Uji Coba Berdebu pada Satu Sisi <i>Tengah</i> Permukaan Panel.....	64
Gambar 44. Uji Coba Kotoran Burung Buatan pada Permukaan Panel	66
Gambar 45. Hasil Prediksi Uji Coba Kotoran Burung pada Permukaan Panel ...	66



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perhitungan confusion matrix.....	18
Tabel 2. State of the Art.....	21
Tabel 3. Spesifikasi panel surya	29
Tabel 4. Spesifikasi arduino nano.....	29
Tabel 5. Spesifikasi baterai.....	30
Tabel 6. Spesifikasi node MCU.....	30
Tabel 7. Spesifikasi sensor PZEM-0017	30
Tabel 8. Spesifikasi Solar Charger Control (SCC).....	30
Tabel 9. Spesifikasi sensor <i>BH1750</i>	30
Tabel 10. Contoh dataset mentah	41
Tabel 11. Dataset yang Telah Diberikan Label Manual Sesuai Kondisi	44
Tabel 12. Hasil Uji Coba antara Pemberian Debu dan Permukaan Panel Bersih. 52	
Tabel 13. Hasil Uji Coba Berdebu Merata pada Permukaan Panel.....	55
Tabel 14. Hasil Uji Coba Berdebu pada Satu Sisi Pinggir Permukaan Panel	57
Tabel 15. Hasil Uji Coba Berdebu pada Dua Sisi Pinggir Permukaan Panel.....	60
Tabel 16. Hasil Uji Coba Berdebu pada Sisi Tengah Permukaan Panel	62
Tabel 17. Hasil Uji Coba Cuaca Mendung dan Berdebu pada Permukaan Panel	64
Tabel 18. Hasil Uji Coba Kotoran Burung Buatan pada Permukaan Panel	67
Tabel 19. Rata-rata Hasil Prediksi Model	68
Tabel 20. Perhitungan Evaluasi Ekonomi	70



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Program model yang telah dilatih di modul Phyton dan di ekspor ke bahasa program C	79
Lampiran 2. Sebagian Data logger yang telah diolah dan diberikan label pada Ms Exel	83
Lampiran 3. Diagram algoritme Random Forest 1 decision tree dari 10 decision trees	84
Lampiran 4. Foto-foto proses pembuatan sistem dan pengujian sistem	85
Lampiran 5. Pemantauan website, Database website dan Serial monitor	86
Lampiran 6. Proses pengambilan dataset dan pengujian sistem lapangan	87
Lampiran 7. Proses Pencarian algoritme yang tepat untuk sistem	88



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik selama ini paling banyak berasal dari bahan bakar fosil, namun keberlangsungan pasokan bahan bakar tersebut semakin menipis dan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan semakin mengkhawatirkan (Rehman, 2019). Dalam upaya menghadapi perubahan iklim dan krisis energi, energi terbarukan menjadi alternatif utama. Pengembangan energi terbarukan tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga mampu memenuhi kebutuhan energi. Salah satu bentuk energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTS menjadi pilihan utama karena konstruksinya yang sederhana dan kemampuan untuk memanfaatkan sinar matahari yang melimpah. Data dari *Power Access Viewer* NASA tahun 2021 menunjukkan bahwa Indonesia memiliki tingkat radiasi matahari rata-rata sebesar 5,6 kWh/m²/hari (Winardi, 2022). Namun, meskipun potensi yang besar, energi listrik yang dihasilkan oleh sel surya sangat tergantung pada intensitas cahaya matahari yang diterima oleh sistem.

Panel surya telah berkembang secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir sebagai sumber energi terbarukan yang penting, terutama karena manfaat seperti pembangkit energi yang efisien, ramah lingkungan, kemudahan perawatan, dan keandalan (Zargar, 2019). Akibatnya, kapasitas terpasang PLTS global secara eksponensial 177 GW pada tahun 2014 meningkat menjadi 740 GW pada tahun 2022 (Tang 2020). Indonesia sangat kaya akan energi terbarukan, dengan potensi sekitar 200.000 MW energi surya. Pemerintah melalui kementerian ESDM menargetkan terpasangnya PLTS sebesar 3.600 MW secara bertahap hingga tahun 2025 (ESDM 2022). Namun, *output* daya yang dihasilkan oleh panel surya dapat terpengaruh oleh sejumlah faktor. Kerusakan fisik yang terjadi selama pengangkutan dan pemasangan, risiko korsleting listrik, serta dampak kerusakan akibat kondisi alam seperti mendung, debu, suhu, dan limbah organik dapat menyebabkan penurunan daya yang dihasilkan (Shaju, 2018; Khant, 2016; Saloux, 2016). Salah satu masalah yang sering dihadapi adalah penumpukan kotoran dan debu pada permukaan panel surya, yang menghalangi cahaya matahari dan mengurangi potensi PLTS (K. Ilse, 2019; Olorunfemi, 2023; Z. Wang, 2022).



Akumulasi debu pada panel fotovoltaik (PV) memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik, seperti dalam sejumlah penelitian. Menurut penelitian Sara Lasfar (2021), akumulasi debu dapat menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 21,57% per panel berdebu dibandingkan dengan panel yang bersih. Hal ini disebabkan oleh efek blokade radiasi matahari oleh debu, yang mengurangi kemampuan modul PV untuk menyerap energi matahari dan mengakibatkan penurunan daya keluaran. Selain itu, panel PV yang terpapar debu juga memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah daripada panel bersih. Penelitian Isaacs (2023) menunjukkan bahwa tingkat kehilangan daya akibat debu dapat melampaui 50% di lokasi yang sangat terpengaruh, dan variabilitas tingkat kehilangan listrik ini dapat bervariasi signifikan setiap tahunnya.

Lebih lanjut, hasil penelitian Fan (2022) mengungkapkan bahwa efisiensi konversi panel PV dapat mengalami penurunan drastis hingga mencapai 72,9% akibat akumulasi debu. Temuan ini menggarisbawahi dampak serius debu terhadap kinerja sistem fotovoltaik. Studi oleh Kaldellis (2011) juga menyimpulkan bahwa ketika akumulasi debu pada permukaan panel PV mencapai tingkat tertentu, energi yang dihasilkan oleh panel tersebut dapat mengalami penurunan hingga 30%, atau efisiensi berkurang sekitar 1,5% per jam.

Penelitian yang dilakukan oleh Katoch (2021) menemukan bahwa endapan debu dapat mengakibatkan penurunan signifikan dalam keluaran daya listrik dari sel surya. Penting untuk diketahui bahwa partikel debu pada panel PV memiliki berbagai ukuran, mulai dari nano hingga mikro, dan distribusinya tidak teratur. Debu ini sebagian besar berasal dari produk industri dan polusi perkotaan, dengan pembentukan kerak debu yang dapat mengurangi tingkat transmisi panel PV, yang pada gilirannya mengurangi efisiensi panel dalam menghasilkan listrik. Faktor-faktor seperti waktu, kelembaban relatif, dan suhu siang hari rata-rata juga memengaruhi tingkat akumulasi debu (Liu, 2021).

Mamadou Simina (2021) menambahkan bahwa komposisi debu tersebut bervariasi. Partikel debu ini memiliki kemampuan untuk memantulkan lebih banyak radiasi matahari yang mencapai permukaan panel fotovoltaik, yang juga berkontribusi pada pengurangan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik.



Dalam konteks ini, memahami dan mengatasi masalah akumulasi debu pada panel PV menjadi suatu keharusan untuk menjaga kinerja dan efisiensi sistem fotovoltaik yang optimal.

Dalam rangka mengatasi masalah ini, pemeliharaan yang efektif bagi sistem panel surya menjadi sangat penting. Memantau kinerja PLTS secara akurat dan tepat waktu, serta menerapkan deteksi otomatis kesalahan pada panel surya, merupakan langkah kritis untuk mengurangi biaya perawatan dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Teknologi *Internet of Things* (IoT) memfasilitasi komunikasi dan berbagi informasi di berbagai perangkat, sistem, dan layanan (Čolaković, 2018). Dalam penelitian ini, sistem pemantauan yang berbasis IoT memainkan peran penting dalam pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Melalui teknologi ini, PLTS dapat memantau kinerja dan pemeliharaan sistem secara *real-time*, dan secara berkala memberikan informasi mengenai kondisi panel surya kepada pengguna. Hal ini tidak hanya memberikan akses kepada lokasi panel surya yang mungkin terletak jauh, tetapi juga memungkinkan diagnosis masalah dan pemeliharaan yang efektif dan cepat.

Metode klasifikasi *random forest* menjadi fokus utama. *Random forest* dikenal karena kemampuannya dalam menghasilkan prediksi yang akurat. Algoritme ini bekerja dengan menggabungkan beberapa *decision tree* yang saling bekerja sama, mengatasi kelemahan individu masing-masing pohon, dan menghasilkan hasil prediksi yang konsisten dan dapat diandalkan (Aleem, 2022). Dalam penelitian ini, jumlah pohon dalam *random forest* dikurangi menjadi 10 dari nilai *default* sebanyak 100 pohon. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kompleksitas klasifikasi dan mencegah memorisasi model, sehingga model dapat diimplementasikan pada komponen yang lebih sederhana dengan dampak yang positif terhadap akurasi. *Random forest* juga memiliki kemampuan untuk mengatasi *overfitting*, yaitu kecenderungan model yang tepat pada data latihan namun buruk pada data baru. Dengan menggunakan subset acak dari data pelatihan, algoritme ini dapat mengenali pola yang kompleks dan mengelola keragaman data dengan lebih



nampuan *random forest* dalam mendeteksi anomali sangat relevan dalam 1 deteksi masalah pada panel surya. Algoritme ini dapat mengenali yang tidak biasa pada data daya dan cahaya panel surya, membantu

mengidentifikasi potensi gangguan yang dapat mempengaruhi kinerja panel surya. Keunggulan lainnya adalah kemampuan skalabilitas dan efisiensi, sehingga algoritme ini dapat digunakan pada *dataset* besar dengan kinerja yang cepat. Dengan demikian, *random forest* merupakan pilihan yang tepat untuk mengembangkan model deteksi anomali pada panel surya.

Penelitian ini mengusulkan penggunaan metode *random forest* untuk menganalisis data daya, memperkirakan prediksi anomali, dan menilai kebutuhan pemeliharaan panel surya. Data masukan dari pembangkit listrik surya, dikumpulkan melalui IoT, diolah dan dilatih menggunakan metode RF. Tujuan utama adalah memprediksi cacat pada data *input*. Ketika terjadi anomali pada permukaan panel, output daya menurun. Logika prediksi kesalahan pada permukaan panel berdasarkan prediksi nilai daya dan cahaya. Setelah model dilatih dengan data input, nilai daya baru dapat diprediksi. Jika nilai daya yang diukur lebih rendah dari nilai daya prediksi dalam radiasi normal, kesalahan dianggap anomali. Pendekatan ini memungkinkan prediksi kesalahan dilaporkan *real-time* melalui *platform* IoT, memungkinkan pemeliharaan tepat waktu.

Berdasarkan uraian tersebut, peneliti tertarik untuk mengembangkan metode algoritme *random forest* sebagai pendekatan utama dalam merancang sistem pemantauan dan pendeteksian kondisi permukaan panel surya. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan penghematan biaya melalui pemeliharaan yang dilakukan hanya saat diperlukan, yakni saat kondisi anomali, berbanding dengan metode pemeliharaan berdasarkan jadwal waktu yang memerlukan upaya lebih besar dalam mendeteksi kesalahan dan memberikan perawatan secara berkala. Sistem pemantauan akan memanfaatkan sensor-sensor yang relevan dengan parameter-parameter yang perlu diukur pada panel surya. Data pengukuran dari sensor-sensor ini akan diintegrasikan dan ditampilkan melalui sebuah *website* menggunakan konsep *Internet of Things* (IoT). Selain itu, sistem juga akan menerapkan teknik diagnostik kesalahan berdasarkan *machine learning* untuk panel surya. Dengan menggabungkan elemen-elemen ini, diharapkan sistem deteksi yang

akan metode algoritme *random forest* ini mampu meningkatkan efisiensi pemeliharaan panel surya dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya lebih efektif.



1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem prototipe serta membangun model dari algoritme *random forest* untuk sistem deteksi debu dan kotoran pada permukaan panel surya?
2. Bagaimana unjuk kerja dari sistem deteksi debu dan kotoran pada permukaan panel surya dengan model dari algoritme *random forest*?
3. Bagaimana evaluasi ekonomi pada implementasi model dari algoritme *random forest* pada sistem deteksi debu dan kotoran pada permukaan panel surya?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Merancang prototipe dan membangun model dari algoritme *random forest* yang dapat melakukan deteksi debu dan kotoran pada permukaan panel surya.
2. Menguji akurasi sistem kerja pendeteksian debu dan kotoran pada permukaan panel surya dengan model dari algoritme *random forest*.
3. Menghitung evaluasi ekonomi pada implementasi model dari algoritme *random forest* pada sistem deteksi debu dan kotoran pada permukaan panel surya

1.4 Batasan Masalah

Pembahasan dalam penelitian ini akan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan dengan metode algoritme *random forest*.
2. Penelitian ini dilakukan hanya untuk mendeteksi informasi kondisi normal dan tidak normal menggunakan debu dan kotoran di permukaan panel surya.
3. Sampel yang digunakan untuk penelitian ini hanya data daya dan yang dihasilkan panel surya dan intensitas cahaya yang di sekitar panel surya yang dirancang penulis.



Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu untuk analisis otomatis kondisi permukaan panel surya sehingga meminimalisir biaya pemeliharaan panel surya dengan adanya

informasi pemantauan waktu deteksi yang efektif untuk melakukan pemeliharaan panel surya, yang akan mengurangi biaya pemeliharaan panel surya secara keseluruhan.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika pada penulisan penelitian ini, yaitu:

1. Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang penulis mengangkat usaha pendeteksian panel surya sebagai topik penelitian, rumusan masalah yang akan diteliti dari tema yang ditentukan dengan menggunakan metode perancangan dan pengujian langsung, batasan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, kondisi panel surya dan sistematika penulisan yang tersusun pada penelitian ini.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang kajian pustaka dari penelitian–penelitian terdahulu yang relevan dan teori-teori yang berhubungan dengan panel surya, gangguan permukaan panel surya dan algoritme.

3. Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi tentang beberapa rancangan sistem PLTS, sistem kontrol, perancangan *website* dan alur proses penelitian dari metode algoritme *random forest*, tempat dan waktu penelitian, alat digunakan dalam proses pengambilan *dataset*, serta alat yang digunakan dalam proses pelatihan.

4. Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi hasil rancangan perangkat keras, rancangan *website*, simulasi *training* dan hasil pengujian dari deteksi kondisi prediksi normal/anomali menggunakan model algoritme *random forest*. Bab ini juga menjelaskan analisis mengenai data-data, parameter, hasil proses pelatihan dan pengujian sistem.

5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi hasil tentang kesimpulan dan pembahasan hasil dari analisis penggunaan metode *machine learning* algoritme *random forest* sebagai deteksi debu dan kotoran pada salah satu jenis gangguan pada panel surya. Bab ini dilanjutkan dengan saran dan perbaikan ke depannya yang lebih baik.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Penunjang

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang teori-teori yang mendasari penelitian.

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (PV), yang juga dikenal sebagai sel surya. Sel surya ini terdiri dari lapisan-lapisan tipis bahan semikonduktor, seperti yang dijelaskan oleh Wibowo (2022). Energi matahari merupakan sumber energi terbarukan yang sangat penting, dan PLTS menggunakan cahaya matahari yang dipancarkan oleh matahari untuk menghasilkan listrik. Di Indonesia, yang merupakan negara tropis dengan penyinaran matahari rata-rata 12 jam per hari, potensi energi surya sangat besar. Data dari RUEN (Rencana Umum Energi Nasional) mencatat bahwa Indonesia memiliki potensi energi surya sekitar 207.898 MW atau 4,80 kWh/m²/hari, setara dengan 112.000 GWp.

Intensitas radiasi matahari di Indonesia berkisar antara 2,5 hingga 5,7 kWh/m² menurut data yang dikumpulkan oleh BPPT dan BMG pada tahun 2020. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik sejenis arus searah (DC), yang nantinya dapat diubah menjadi arus bolak-balik (AC) jika diperlukan. Ini berarti bahwa meskipun cuaca sedang mendung, selama masih ada cahaya matahari, PLTS tetap dapat menghasilkan listrik.

PLTS dapat dirancang dalam berbagai skala, dari yang melayani kebutuhan listrik kecil hingga besar, baik secara mandiri maupun dalam sistem hibrida. Pemanfaatannya dapat bersifat desentralisasi atau sentralisasi, tergantung pada desain dan kebutuhan sistem tenaga listrik. Penggunaan PLTS semakin berkembang pesat dari tahun ke tahun, didorong oleh berbagai faktor seperti target penurunan emisi gas rumah kaca, peralihan menuju energi terbarukan, dan regulasi. Secara keseluruhan, PLTS memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara berkelanjutan, membantu mengurangi emisi gas



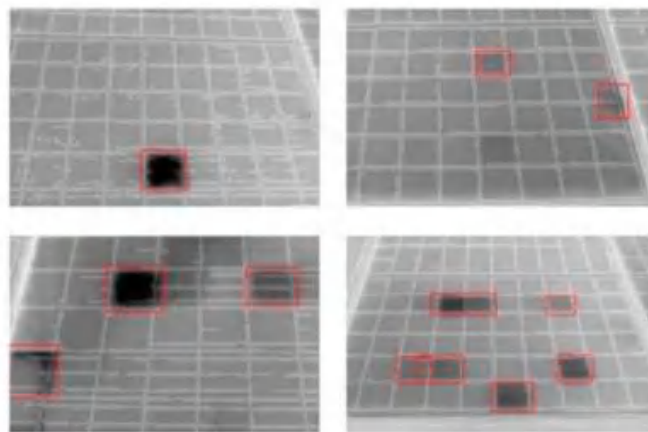
rumah kaca, dan berkontribusi pada transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan ramah lingkungan.

2.1.2 Kerusakan Panel Surya

Kerusakan pada panel surya dapat disebabkan oleh berbagai alasan. Beberapa kegagalan yang terkait dengan modul panel surya dan kemasan umumnya terjadi pada semua modul. Berikut adalah beberapa contoh masalah yang umum terjadi:

1. *Hot spotting*

Hot spotting adalah masalah keandalan dalam panel surya di mana sel yang tidak cocok memanaskan secara signifikan dan menurunkan kinerja daya keluaran panel surya. Temperatur sel surya yang tinggi akibat *hot spotting* dapat merusak sel enkapsulasi dan menyebabkan *second breakdown*, dimana keduanya menyebabkan kerusakan permanen pada panel surya. Titik panas panel surya terjadi ketika sel, atau sekelompok sel, beroperasi pada bias balik, menghamburkan daya (alih-alih mengirimkannya), karena itu, beroperasi pada suhu tinggi yang tidak normal (Aghaei, 2022). Peningkatan suhu sel ini secara bertahap akan menurunkan daya output yang dihasilkan oleh modul panel surya. Gambar 1. Ditunjukkan *hotspotting* pada termal panel surya.

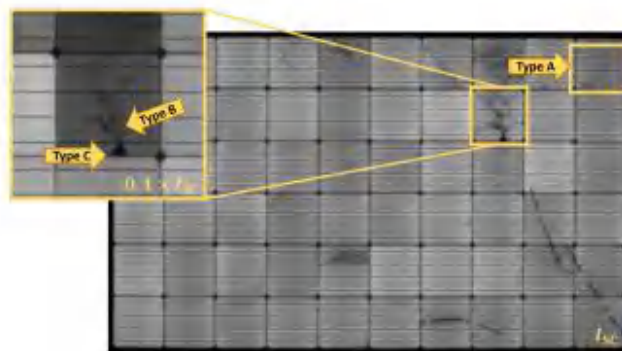


Gambar 1. *Hotspot* pada termal panel surya (Pathak,2022)



2. Retak mikro

Retakan sel diamati pada sel silikon kristal (c-Si) karena struktur kristal dan ketebalan kecil. Retakan dapat terjadi karena tekanan mekanis atau termal. Hal ini dimungkinkan untuk modul PV untuk mengembangkan *microcracks* tidak hanya selama proses manufaktur, tetapi juga selama pengiriman atau sebagai akibat dari praktek penanganan yang tidak tepat selama instalasi. *Microcracks* mungkin tidak serta merta mengakibatkan hilangnya output tetapi malah mendapatkan waktu penyelesaian yang lebih besar, misalnya sebagai akibat dari regangan termal atau akibat pengaruh faktor iklim dan musim. Jika retakan mikro cukup signifikan, sel surya akan rusak, yang akan mengurangi keluaran. Kuantitas energi yang dihasilkan oleh sel surya akan sangat dipengaruhi oleh kerusakan yang terjadi di lokasi pemasangan. Tingkat keparahan retakan sel menjadi tiga kategori: Tipe A retak, sering disebut retakan mikro, yang menyebabkan tidak terputusnya bagian sel; Tipe B retakan, yang memisahkan bagian-bagian sel yang mengakibatkan berkurangnya produksi, tetapi masih berpartisipasi dalam produksi daya; dan retakan Tipe C, yang mengecualikan bagian sel sepenuhnya dari produksi daya. Berikut tipe retakan pada Gambar 2.



Gambar 2. Retakan mikro pada panel surya (Dhimish, 2018)

3. Kontaminasi jejak siput

Jejak siput terlihat dengan kasat mata. Sepanjang tepi atau retakan sel pasta perak dari kontak depan bisa mendapatkan pewarnaan keabu-abuan, yang membuatnya terlihat seperti jejak siput di atas sel seperti yang ditunjukkan



Gambar 3. Saat membuat sel surya, pasta perak metalisasi depan yang kadang-kadang digunakan yang mungkin menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap pembentukan jejak siput. Namun, ini bukan satu-

satunya. Pasta perak yang rusak dapat menyebabkan panel menjadi lembap, dan jika ini terjadi, reaksi oksidasi dapat terjadi antara pasta perak dan zat penangkap yang dikenal sebagai *Etilena Vinil Asetat* (EVA).



Gambar 3. Jejak siput pada panel surya (Köntges, 1972)

4. Perubahan warna dan delaminasi

Perubahan warna berhubungan langsung ke film polimer dan mengarah ke penyerapan cahaya di sel-sel, dan karena itu kehilangan daya. Pada Gambar 4. Menunjukkan kasus, perubahan warna dari enkapsulan tidak dikaitkan dengan foto-oksidasi rantai polimer itu sendiri, tetapi untuk degradasi aditif dalam enkapsulan. Perubahan warna pernah menjadi degradasi yang sangat umum, tetapi dalam beberapa tahun terakhir enkapsulan telah diformulasikan dengan lebih sedikit atau aditif yang lebih stabil, sehingga kemunculannya jauh lebih rendah. Delaminasi adalah mode kegagalan lain yang relevan, dan dapat terjadi pada setiap antarmuka di dalamnya struktur laminasi. Beberapa faktor mempengaruhi kekuatan adhesi, dan proses penuaan fisik dan kimiawi dari enkapsulan dapat meningkat delaminasi. Meskipun kurang umum daripada perubahan warna, mode kegagalan ini dapat mempercepat degradasi sel dan sirkuit internal memfasilitasi akumulasi kelembaban dan produk degradasi.



ir 4. Perubahan warna dan delemansi pada panel surya (Köntges, 1972)



5. Debu dan kotoran

Akumulasi partikel pasir, kotoran, dan debu pada modul panel surya memang dapat menyebabkan beberapa masalah serius dalam kinerja dan daya keluaran panel surya. Debu perkotaan sering mengandung partikel kimia dari pabrik dan kendaraan yang dapat mempercepat proses korosi, sementara debu di daerah pesisir membawa partikel garam yang dapat memicu korosi pada permukaan panel surya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

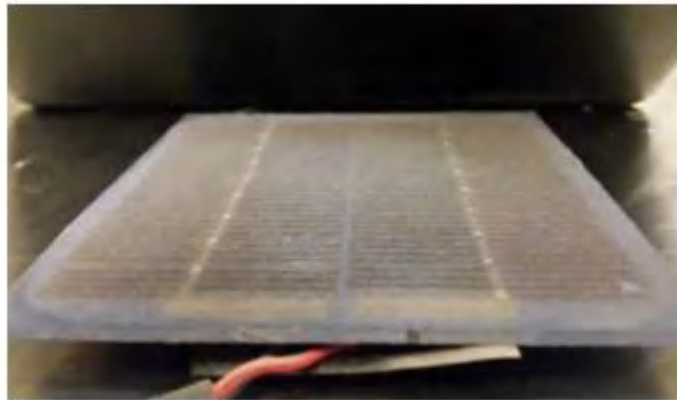
Pertama-tama, debu dan kotoran yang menumpuk pada permukaan panel surya dapat mengurangi produksi energi yang dihasilkan oleh panel. Partikel-partikel ini dapat memblokir cahaya matahari yang seharusnya diabsorpsi oleh sel surya, sehingga mengurangi efisiensi konversi energi matahari menjadi energi listrik. Selain itu, akumulasi debu dan kotoran juga dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada panel surya. Jika panel beroperasi pada suhu tinggi secara terus-menerus, ini dapat merusak komponen internal dan material di dalam panel, yang pada akhirnya dapat mengurangi umur panjang panel tersebut. Endapan debu yang terus-menerus dan tidak dibersihkan juga dapat mengakibatkan pembentukan lapisan isolasi termal yang lebih tebal. Ini dapat menyebabkan panel surya menjadi lebih panas dari seharusnya, yang dapat mengurangi efisiensi dan bahkan merusak komponen elektronik di dalamnya. Meskipun hujan dapat membantu membersihkan sebagian debu dari permukaan panel surya, hujan ringan malah dapat membawa lebih banyak kontaminan dari atmosfer dan membentuk lapisan lumpur yang lebih sulit dibersihkan. Selain itu jika bergantung pada hujan deras sebagai satu-satunya metode pembersihan, ini dapat mengakibatkan penundaan dalam mengambil Tindakan pembersihan yang diperlukan dalam kasus di mana anomali debu mempengaruhi kinerja panel surya dengan cepat, penundaan ini dapat memengaruhi efisiensi dan produktifitas

Penting untuk memahami bahwa penanganan masalah anomali debu ini memiliki dampak yang luas dan kompleks pada kinerja sistem energi, terutama

panel surya. Oleh karena itu, penelitian dan inovasi dalam strategi pendungan dan teknologi pembersihan yang lebih efektif sangatlah penting. memahami dampak ini juga memiliki relevansi besar terhadap tujuan global



keberlanjutan, mengingat kontribusi energi bersih dan lingkungan yang diperoleh dari penggunaan panel surya.



Gambar 5. Debu yang menempel pada permukaan panel surya (Köntges, 1972)

2.3 Artificial Intelligence (AI)

AI berasal dari kata *artificial* yang berarti tiruan atau buatan, dan kata *intelligence* bermakna kecerdasan, sehingga arti AI adalah kecerdasan tiruan atau kecerdasan buatan. *Machine learning* (ML) merupakan bagian dari bidang kecerdasan buatan. *Machine learning* adalah suatu algoritme atau program komputer yang dapat membuat sistem menjadi cerdas dengan mempelajari data-data yang tersedia. *Machine learning* bertujuan untuk memahami atau mengenali struktur suatu data dan mengkonversi data tersebut kedalam suatu model (Kusuma, 2020 dan Permana, 2023). Dimana ML memungkinkan untuk membuat algoritme yang belajar dari dan membuat prediksi data. Tiga komponen untuk pembelajaran mesin (Kurniawan, 2022) ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.

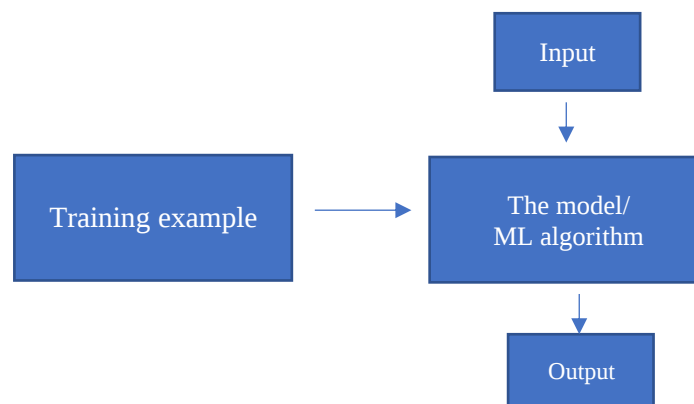
- *Dataset*/kumpulan data
Sistem pembelajaran mesin dilatih pada koleksi khusus sampel yang disebut *dataset*. Sampel dapat mencakup angka, gambar, teks atau jenis data lainnya.
- *Features*/fitur
Fitur adalah bagian penting dari data yang berfungsi sebagai kunci solusi tugas, dengan menunjukkan kepada mesin apa yang harus diperhatikan.
- *Algorithm*/algoritme



ritme dimungkinkan untuk menyelesaikan tugas yang sama menggunakan itme yang berbeda, untuk mencapai kinerja yang lebih baik ygabungkan berbagai algoritme, seperti dalam pembelajaran *assemble*.



Gambar 6. Komponen *machine learning* (Kurniawan, 2022)



Gambar 7. Kinerja algoritme (Kurniawan, 2022)

2.4 Algoritme *Random Forest*

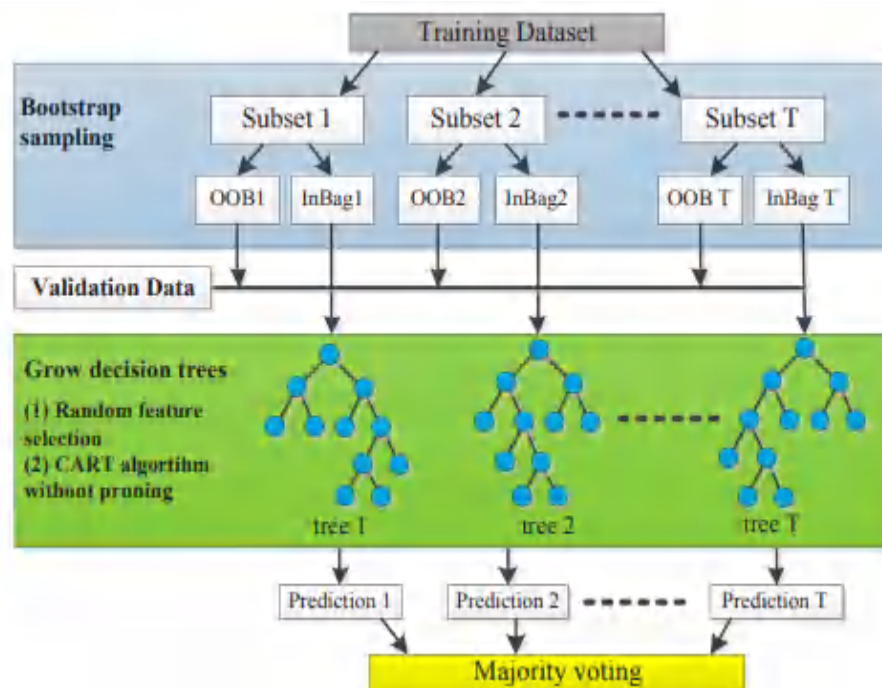
Algoritme *Random Forest* (RF) adalah salah satu jenis algoritme *machine learning* yang dikembangkan oleh Leo Breiman pada tahun 2001. RF termasuk dalam kategori *supervised learning*, yang memiliki banyak kelebihan yang telah dilaporkan dalam literatur (Winston, 2018). Kelebihan tersebut meliputi akurasi klasifikasi yang tinggi, kinerja generalisasi yang baik, ketahanan terhadap *outlier*, kemampuan untuk menangani data dimensi tinggi tanpa menghapus variabel, serta pelatihan paralel langsung dari *decision trees* (DT) yang menghasilkan hasil dengan *noise* rendah (*low-bias dan low-variation*) (Fernandez, 2014).

RF adalah metode pembelajaran *ensemble*, yang membangun sejumlah DT untuk menghasilkan prediksi akhir. Proses pembuatan model RF melibatkan beberapa diantaranya:

- pengambilan sampel bootstrap dari *dataset* pelatihan asli untuk membentuk set pelatihan $T(2)$.



- b. Pemilihan acak m fitur dari *subset* pelatihan pada setiap pembagian node non-daun dalam pohon keputusan.
- c. Pembangunan pohon keputusan untuk setiap subset pelatihan menggunakan algoritme *Classification and Regression Tree* (CART) tanpa pemangkasan.
- d. Penggunaan pohon keputusan terlatih untuk memprediksi sampel validasi *Out-of-Bag* (OOB). Prediksi akhir sampel validasi OOB ditentukan oleh mayoritas suara dari prediksi semua DT yang ditumbuhkan tanpa menggunakan sampel tersebut.
- e. Estimasi kesalahan OOB dengan persentase data OOB yang diprediksi salah, dan akurasi pelatihan model RF dihitung sebagai persentase sampel data OOB yang diprediksi dengan benar.



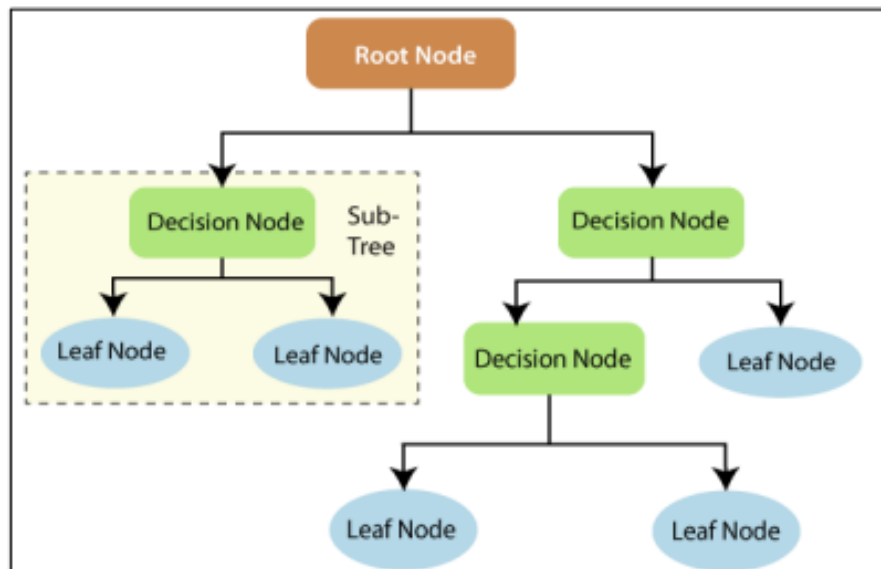
Gambar 8. Flowchart algoritme random forest (Chen, 2018)

2.4 Algoritme Decision Tree

Model pohon keputusan (*Decision Tree*) dirancang untuk menggabungkan serangkaian pengujian dasar secara efisien dan koheren. Dalam model ini, fitur-fitur numerik dibandingkan dengan ambang batas nilai pada setiap tahap pengujian.



Salah satu keunggulan utama dari pohon keputusan adalah kemampuannya untuk menghasilkan konsep yang lebih sederhana dibandingkan dengan bobot numerik yang kompleks dalam jaringan saraf yang menghubungkan *node-node* (Priyanka, 2020).



Gambar 9. Flowchart algoritme decision tree (Charbuty, 2021)

Pohon keputusan sering digunakan terutama dalam tujuan pengelompokan. Terlebih lagi, dalam bidang Penambangan Data, pohon keputusan biasanya digunakan sebagai model klasifikasi. Struktur pohon terdiri dari *node* dan cabang-cabang yang menghubungkannya. Setiap *node* merepresentasikan fitur-fitur dalam kategori yang akan diklasifikasikan, dan setiap cabang mendefinisikan nilai-nilai yang mungkin diambil oleh *node* (Mahesh, 2020).

Dikarenakan analisis yang sederhana dan kemampuannya yang kuat dalam berbagai jenis data, pohon keputusan telah diterapkan dalam berbagai bidang. Metode ini telah menemukan banyak penggunaan di berbagai sektor karena kemampuannya yang efisien dalam menghadapi beragam permasalahan dan jenis data yang berbeda.

2.4 Algoritme *K-nearest Neighbors*

Algoritme *K-Nearest Neighbors* (K-NN) adalah sebuah algoritme klasifikasi yang bekerja dengan prinsip tetangga terdekat. Algoritme ini melibatkan dua langkah utama dalam proses klasifikasi:

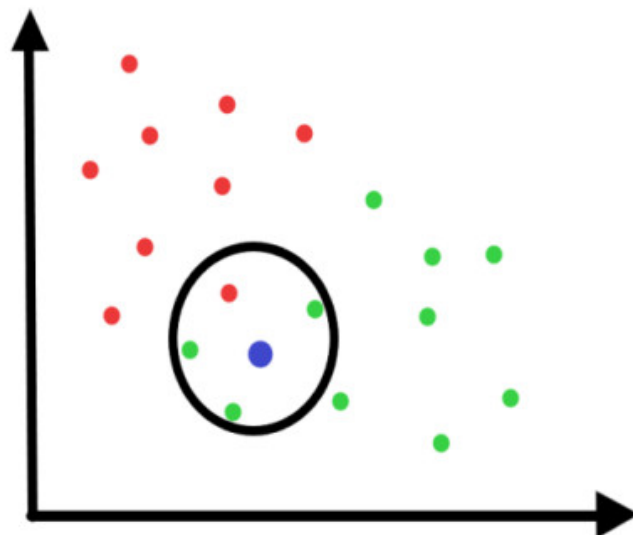
1. Langkah Pembelajaran: Pada langkah ini, algoritme menggunakan data latih untuk membangun pengklasifikasi. Data latih ini terdiri dari contoh-contoh sudah memiliki label kelas yang diketahui.

Langkah Pengklasifikasi: Setelah pengklasifikasi dibangun, algoritme akan mengklasifikasikan data baru yang tidak memiliki label kelas. Proses ini



melibatkan konsep tetangga terdekat, di mana algoritme mencari data dengan karakteristik yang mirip dengan data baru dan telah memiliki label kelas.

Pada algoritme K-NN, nilai K telah ditentukan sebelumnya. Nilai K ini menentukan berapa banyak tetangga terdekat yang akan dipertimbangkan dalam mengklasifikasikan data baru. Ketika ada data baru yang tidak berlabel, algoritme K-NN melakukan dua operasi. Pertama, algoritme mengidentifikasi K tetangga terdekat dari data baru dengan menghitung jarak Euclidean antara data baru dan setiap data pelatihan. Kedua, dengan menggunakan kelas dari tetangga-tetangga tersebut, algoritme menentukan kelas mana yang akan diberikan pada data baru (Pan, 2020). Gambar 10 menunjukkan struktur K-NN sederhana



Gambar 10. Struktur algoritme *K-nearest Neighbors* (Taunk, 2019)

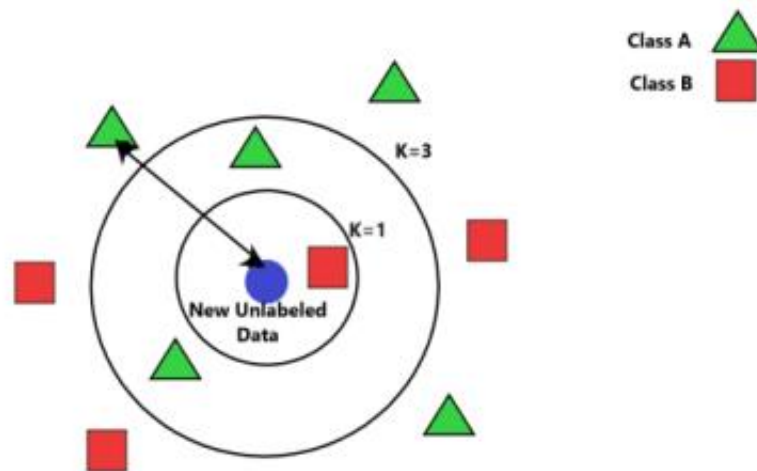
Algoritme K-NN lebih efektif dalam kasus data yang dapat dikelompokkan menjadi *cluster* atau wilayah tertentu dalam ruang fitur. Dalam hal ini, algoritme ini membawa akurasi yang lebih baik dalam memisahkan data ke dalam kelas-kelas yang berbeda secara lebih jelas.

Nilai K memiliki dampak pada performa algoritme. Nilai K yang terlalu kecil dapat menyebabkan sensitivitas yang tinggi terhadap *noise* dalam data, sementara nilai K yang terlalu besar dapat menyebabkan batasan kelas yang terlalu rata. Oleh karena itu, pemilihan nilai K yang tepat sangat penting dan dapat dilakukan dengan metode validasi silang.

Setelah menghitung jarak dan menentukan tetangga terdekat, algoritme K-NN menggunakan mayoritas dari tetangga tersebut untuk memprediksi kelas data baru.



kelas data baru. Faktor-faktor yang memengaruhi performa K-NN termasuk nilai K , perhitungan jarak *Euclidean*, dan normalisasi parameter data.



Gambar 11. Cara kerja algoritme *K-nearest Neighbors* (Taunk, 2019)

Adhyapadi Apoorva, 2023 menyebutkan bahwa algoritme *Random Forest*, *Decision Trees*, dan *K-Nearest Neighbors* (KNN) menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam memprediksi dengan akurasi yang lebih tinggi daripada enam model berbeda dalam evaluasi algoritme pembelajaran mesin. Enam model tersebut meliputi *Support Vector Machine* (SVM), KNN, *Random Forest*, *Naive Bayes*, *Decision Trees*, dan *Regresi Logistik*. Berdasarkan penelitian tersebut, penulis memutuskan untuk mengambil langkah lebih lanjut dengan menerapkan model algoritme *Random Forest*, *Decision Trees*, dan KNN pada sistem untuk memprediksi anomali debu pada permukaan panel surya. Hal ini dilakukan sebagai bagian dari upaya untuk membandingkan performa algoritme-algoritme tersebut dan mencari solusi yang paling tepat.

Dengan demikian, diharapkan bahwa salah satu dari ketiga algoritme yang diimplementasikan pada sistem pemantauan panel surya mampu memberikan hasil yang akurat dan efisien dalam mendeteksi anomali debu pada permukaan panel surya. Tujuan utamanya adalah memastikan bahwa sistem pemantauan ini dapat menghasilkan prediksi yang tepat dan memberikan respons yang efektif terhadap masalah anomali debu yang mungkin terjadi.



2.8 Confusion Matrix

Confusion matrix atau *error* adalah ringkasan hasil prediksi pada permasalahan klasifikasi untuk mengidentifikasi jumlah klasifikasi benar dan salah dan memiliki nilai yang kemudian akan dipecah setiap kelas. *Confusion matrix* digunakan dalam masalah klasifikasi untuk mengevaluasi kinerja model dengan menganalisis hasil prediksi terhadap data sebenarnya. (Ren, 2016). *Confusion matrix* memetakan hasil prediksi menjadi empat kategori: *true positives* (TP), *false positives* (FP), *true negatives* (TN), dan *false negatives* (FN). Penggunaan tabel *confusion Matrix* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan *confusion matrix*

Class	Clarified Positive	Clarified Negative
Positive Object Prediction	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Negative Object Prediction	False Negative (FN)	True Negative (TN)

Dengan demikian, kita dapat mengukur sejauh mana model melakukan prediksi yang benar dan mengidentifikasi jenis eror yang terjadi. Hal ini sangat berguna dalam menganalisis kinerja model dan menentukan metrik evaluasi seperti akurasi, *precision*, *recall*, *F1-score*.

2.5 Precision

Precision mengukur sejauh mana prediksi positif dari model yang benar. Ini membantu kita memahami berapa persentase dari prediksi positif yang sebenarnya benar. Nilai presisi dihitung dengan cara membagi total sampel positif yang diklasifikasikan dengan benar dibagi dengan total sampel *false positive* ditambah dengan sampel *true positive* yang diperlihatkan pada rumus seperti Persamaan (1) (Ravipati, 2019)

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive} \quad (1)$$

2.6 Recall



recall atau *sensitivitas*. *Recall* mengukur sejauh mana model dapat mengidentifikasi dengan benar semua contoh positif yang sebenarnya. Ini sangat penting dalam kasus di mana mendeteksi setiap kasus positif sangatlah krusial,

bahkan jika ada beberapa kesalahan dalam mengklasifikasikan negatif. Berikut merupakan Persamaan (2) (Ravipati, 2019).

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative} \quad (2)$$

2.7 F1 Score

F1-Score adalah metrik evaluasi yang memberikan gambaran tentang seberapa baik kinerja suatu model dalam melakukan prediksi dengan mempertimbangkan keseimbangan antara presisi (*precision*) dan *recall*. Presisi mengukur seberapa akurat model dalam mengidentifikasi hasil positif, sementara *recall* mengukur seberapa baik model dalam menemukan semua hasil positif yang sebenarnya. Rumus yang digunakan untuk *F1-Score* merupakan Persamaan (3) (Hand, 2021).

$$F1\ Score = \frac{2 \cdot precision \cdot recall}{precision + recall} \quad (3)$$

2.9 Payback Period (PP)

Payback Period merupakan metode yang digunakan untuk menghitung lama periode yang diperlukan untuk mengembalikan sejumlah uang yang telah diinvestasikan dari aliran kas masuk tahunan yang dihasilkan oleh proyek investasi tersebut. *Payback Period* diukur dalam satuan waktu, seperti tahun atau bulan. Semakin pendek *Payback Period*, semakin cepat investasi tersebut dapat mengembalikan modal yang diinvestasikan. Rumus PP berikut merupakan Persamaan (4) (Carvalho, 2021).

$$PP = \frac{Investasi\ Kas\ Bersih}{Aliran\ Kas\ Masuk} \quad (4)$$

Di mana:

Payback Period (Tahun)



2.10 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) adalah metode analisis keuangan yang digunakan untuk menilai proyek investasi dengan mempertimbangkan nilai waktu dari aliran kas masuk dan keluar dari proyek tersebut. NPV mengukur nilai sekarang dari aliran kas di masa depan setelah memperhitungkan tingkat diskonto yang dipilih. Rumus NPV berikut merupakan Persamaan (5) (Brigham, 2016).

$$NPV = \sum \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (5)$$

Di mana:

CF_t = Aliran kas masuk (positif) atau keluar (negatif) pada tahun ke- t

r = Tingkat diskonto

t = Tahun

C_0 = Investasi awal (biasanya pada tahun 0)

Jika NPV positif, itu menunjukkan bahwa proyek investasi tersebut menghasilkan nilai tambah. Jika NPV negatif, itu menunjukkan bahwa proyek investasi tersebut tidak menghasilkan nilai tambah.



2.2 Penelitian Terdahulu

Berikut ini merupakan penelitian-penelitian terdahulu dengan masalah:

Tabel 2. *State of the Art*

No.	Penulis dan Tahun	Tujuan Penelitian	Metode	Hasil
1.	Niazii dkk., 2019	Hotspot dalam modul fotovoltaik (PV)	Algoritme pembelajaran mesin, yaitu pengklasifikasi <i>Naive Bayes</i> (nBayes)	Akurasi sekitar 94,1% dicapai untuk 375 sampel
2.	P Sampurna Lakshmia dkk, 2023	Pemprediksi kesalahan untuk pemeliharaan PLTS.	Algoritme DT-LGB (<i>Decision Trees with Light Gradient Boosting</i>)	Hasil model diperoleh 8,74 MSEs (<i>Mean Square Errors</i>), 2,96 RMSEs (<i>Root Mean Square Errors</i>), dan nilai R2 sebesar 0,9939 yaitu 12,8%, 6,8%, dan 11,08%.
3.	Abdallaha dkk, 2023	Untuk mendeteksi bayangan dan kesalahan lain pada panel PV	Teknologi ANN (<i>Artificial Neural Network</i>) mendeteksi bayangan dan kesalahan lainnya, platform IoT pemantauan jarak jauh	Sistem mendeteksi bayangan dan kesalahan lainnya secara akurat dapat meningkatkan efisiensi pembangkitan energi secara signifikan dan mengurangi biaya perawatan.
4.	Malik, 2021	Untuk mengidentifikasi disposisi debu pada panel fotovoltaik secara otomatis	<i>Algoritme State Machine</i> (ASM), membuat pemberitahuan pemeliharaan diperlukan atau tidak	Prototipe berhasil secara otomatis mendeteksi penurunan tegangan yang tidak terduga dari panel PV karena disposisi debu dan melaporkannya.
5.	Pathak, 2022	Pendeteksian hotspot	Model jaringan saraf konvolusional menggunakan RCNN	Akurasi 85,37%. <i>Mean Average Precision Faster R-CNN</i> dengan skor 67%.
6.	Huuhtanen, 2018	Untuk menunjukkan panel yang tidak berfungsi	Metode berbasis <i>Convolutional Neural Networks</i> (CNN)	Metode yang diusulkan mampu memprediksi secara akurat kurva daya panel yang berfungsi.
7	Chen H, 2020	Untuk mendeteksi cacat permukaan, berbagai bentuk, dan bayangan yang banyak.	Metode deteksi cacat berdasarkan <i>multi-spectral deep Convolutional Neural Network</i> (CNN)	Akurasi pengenalan cacat mencapai 94,30%.



jumlah metode dalam pemeliharaan panel surya telah diuji, seperti yang dalam Tabel 2. Model-model ini menggunakan berbagai parameter seperti , daya, gambar visual permukaan panel surya, dan sensor. Penelitian ini mencapai tingkat akurasi deteksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan

beberapa algoritme yang telah diujikan dalam Tabel 2, termasuk Algoritme *Decision Trees with Light Gradient Boosting* (DT-LGB), *Convolutional Neural Network* (CNN), *Naive Bayes* (nBayes), Algoritme *State Machine* (ASM), *Convolutional Neural Network* (CNN), *Faster R-CNN*, dan *Artificial Neural Network* (ANN).

Fokus penelitian ini adalah untuk memprediksi kebutuhan pemeliharaan pada panel surya yang mengalami anomali seperti penumpukan debu dan kotoran yang dapat mengurangi daya yang dikumpulkan oleh panel surya, terutama ketika intensitas radiasi matahari cukup tinggi.

Dalam penelitian ini, pendekatan yang diambil adalah menggunakan metode *random forest* untuk pendeteksian debu dan kotoran pada permukaan panel surya. Metode ini dipilih untuk mengurangi potensi *overfitting* dan untuk meningkatkan akurasi pendeteksian. Dengan menggunakan 10 *decision trees* dalam metode *random forest*, penelitian ini berhasil mengurangi risiko *overfitting* yang umumnya terjadi ketika menggunakan jumlah *decision trees* yang lebih besar, seperti nilai *default* 100 *decision trees* dalam metode *random forest*. Pendekatan ini juga membantu mengurangi kompleksitas model dan ukuran data, sehingga model dapat diimplementasikan pada perangkat terbatas seperti ESP atau Arduino yang memiliki keterbatasan kapasitas.

