

**IDENTIFIKASI KESEHATAN BATERAI BERBASIS CITRA TERMAL
DENGAN METODE LOGIKA *FUZZY***

(Tesis)

Oleh

**PERDANA AGUNG NUGRAHA
NPM 2225031016**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**IDENTIFIKASI KESEHATAN BATERAI BERBASIS CITRA TERMAL
DENGAN METODE LOGIKA *FUZZY***

**Oleh
PERDANA AGUNG NUGRAHA**

TESIS

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

Identifikasi Kesehatan Baterai Berbasis Citra Termal dengan Metode Logika Fuzzy

Oleh

Perdana Agung Nugraha

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan energi yang ramah lingkungan telah mendorong pemanfaatan teknologi penyimpanan energi seperti baterai semakin meningkat. Baterai litium-ion menjadi salah satu pilihan utama karena memiliki keunggulan dalam hal daya tahan, kepadatan energi yang tinggi, serta memiliki ukuran yang ringan. Namun, baterai ini sangat sensitif terhadap kondisi ekstrem seperti suhu tinggi dan proses pengisian atau pengosongan berlebihan, yang dapat berdampak pada kesehatan dan masa pakai baterai. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi kesehatan baterai litium-ion berdasarkan karakteristik suhu yang diperoleh dari citra termal menggunakan metode logika *fuzzy*, serta mengevaluasi akurasi sistem logika *fuzzy* dalam memprediksi status Kesehatan baterai. Sistem logika *fuzzy* digunakan karena mampu mengatasi masalah ketidakpastian pada rentang data suhu yang bervariasi pada saat baterai digunakan. Parameter *input* berupa suhu operasional baterai dan selisih antara suhu baterai dengan suhu lingkungan sedangkan *output* berupa persentase State of Health (SoH), yang diklasifikasi dalam tiga kategori yaitu Sehat, Waspada, dan Tidak Sehat. Evaluasi sistem dilakukan menggunakan confusion matriks dengan membandingkan hasil prediksi kondisi kesehatan baterai terhadap data aktual baterai. Dari total 50 citra baterai yang diuji, sistem berhasil memprediksi dengan benar sebanyak 42 citra, dengan tingkat akurasi sebesar 84%. Nilai precision pada kategori Sehat, Waspada, dan Tidak Sehat masing-masing sebesar 84%, 75%, dan 88,24%, sedangkan nilai recall masing-masing sebesar 91,30%, 54,55%, dan 93,75%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode logika *fuzzy* cukup efektif dalam memprediksi kondisi kesehatan baterai, terutama untuk kategori kondisi Sehat dan Tidak Sehat, meskipun masih diperlukan penyempurnaan pada kategori Waspada.

Kata Kunci : Baterai Litium Ion, Logika *fuzzy*, Citra Termal, Confusion Matriks

ABSTRACT

Battery Health Identification Based on Thermal Imaging Using Fuzzy Logic Method

By

Perdana Agung Nugraha

In recent decades, the increasing demand for environmentally friendly energy has driven the widespread adoption of energy storage technologies such as batteries. Lithium-ion batteries have become a primary choice due to their durability, high energy density, and lightweight design. However, these batteries are highly sensitive to extreme conditions such as high temperatures and overcharging or deep discharging, which can negatively affect their health and lifespan. This study aims to identify the health condition of lithium-ion batteries based on temperature characteristics obtained from thermal images using a fuzzy logic method, as well as to evaluate the accuracy of the fuzzy logic system in predicting battery health status. Fuzzy logic is employed because it effectively handles uncertainty in the varying temperature data observed during battery operation. The input parameters include battery operating temperature and the temperature difference between the battery and the surrounding environment, while the output is the State of Health (SoH) percentage, which is classified into three categories: Healthy, Caution, and Unhealthy. System evaluation was conducted using a confusion matrix by comparing the predicted battery health conditions with actual battery data. Out of a total of 50 battery thermal images tested, the system correctly predicted 42 cases, achieving an overall accuracy of 84%. The precision values for the Healthy, Caution, and Unhealthy categories were 84%, 75%, and 88.24%, respectively, while the recall values were 91.30%, 54.55%, and 93.75%, respectively. These results indicate that the fuzzy logic method is effective in predicting battery health conditions, particularly for the Healthy and Unhealthy categories, although further refinement is needed for better performance in the Caution category.

Keywords : Lithium Ion Battery, Fuzzy Logic, Thermal Image, Confusion Matrix

Judul Tesis

: **Identifikasi Kesehatan Baterai
Berbasis Citra Termal dengan Metode
Logika Fuzzy**

Nama Mahasiswa

: **Perdana Agung Nugraha**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2225031016

Program Studi

: Magister Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



Pembimbing I

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing II


Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.

NIP 19651021 199512 2 001


Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.

NIP 19691219 199903 1002

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro


Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.

NIP 19651021 199512 2 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji 1

Ketua Komisi Penguji

(Pembimbing I)

: **Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.**



Sekretaris Komisi Penguji

(Pembimbing II)

: **Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.**



Anggota Komisi Penguji

(Penguji I)

: **Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**



Anggota Komisi Penguji

(Penguji II)

: **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

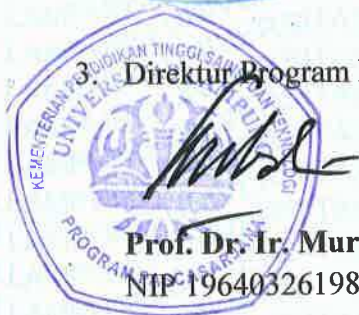
NIP 197509282001121002



3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 196403261989021001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : **31 Juli 2025**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa sesungguhnya tesis yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik dan Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro seluruhnya merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan tesis yang saya kutip dari hasil karya hasil orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Tesis dengan judul “Identifikasi Kesehatan Baterai Berbasis Citra Termal Dengan Metode Logika Fuzzy” dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu:

1. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.
2. Dr. Eng. F.X. Arinto Setyawan, S.T.,M.T.

Saya ucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan dan motivasi.

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 3 Agustus 2025



Perdana Agung Nugraha

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, 07 Mei 1990. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Rahmadi S. dan Ibu Lely Surati. Mengenai riwayat pendidikan penulis, penulis lulus dari Sekolah Dasar (SD) di SD Al-Kautsar Bandar Lampung pada tahun 2003, Sekolah Lanjutan Tingkat Pertama di SLTP Al-kautsar Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2005, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Al-kautsar Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2008. Penulis melanjutkan pendidikan strata satu di Universitas Lampung pada Jurusan Teknik Elektro, Selama menjadi mahasiswa strata satu penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Teknik Digital Universitas Lampung dan Tim Unila Robotika dan Otomasi (URO) serta mengikuti kompetisi dibidang robotika. Pada bulan Januari 2012 penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Dusun V Margosari, Desa Pesawaran Indah, Kabupaten Pesawaran. Kemudian pada bulan Juli Tahun 2012 penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Gegha Power Lestari dan menghasilkan sebuah laporan Kerja Praktik dengan judul “Sistem Kontrol Rectifier EATON SC200 Pada Base Transceiver Station (BTS) Area Kerja PT. Gegha Power Lestari”. Penulis melakukan penelitian sebagai syarat untuk meraih gelar sarjana dengan judul “Rancang Bangun Electric Load Controller (ELC) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) 10kW Menggunakan Beban Komplemen Berbasis Mikrokontroler”. Penulis meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Tahun 2014. Pada Tahun 2022 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung. Pada Tahun 2023 dan 2024 penulis ikut membantu dalam penjurian pada Kompetisi Robot Terbang Indonesia (KRTI). penulis melakukan penelitian pada bidang pengolahan citra dengan judul tesis “Identifikasi Kesehatan Baterai Berbasis Citra Termal Dengan Metode Logika Fuzzy” di bawah bimbingan Ibu Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T. dan Bapak Dr. Eng. F.X. Arinto Setyawan, S.T.,M.T.



PERSEMBAHAN

Dengan Ridho Allah SWT, teriring sholawat kepada Nabi Muhammad SAW
Karya Tulis ini ku persembahkan untuk:

Papa dan Mama Tercinta

Rahmadi S. dan Lely Suryati

Istri Tersayang

Inggit Sagita

Serta Adik-adik Tercinta

Wahyu N.S.D. Rani, Vito Savero G.G., dan M. Farid A.

Anak-anak Tersayang

M. A, Farras, M. Syathir A., dan M. Rayyan R.

Dosen Teknik Elektro

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran, baik secara akademis maupun non akademis.

Teman-teman kebanggaan

Rekan-rekan Jurusan Teknik Elektro

Sahabat-sahabat

Yang selalu membantu, memberikan saran, mendukung menuju keberhasilan

Keluarga Besar MTE 2022,

*Yang selalu memberi semangat, dukungan dalam proses yang sangat panjang,
dan selalu berdiri bersama dalam perjuangan menuju kesuksesan*

Almamaterku,

Universitas Lampung



MOTO

"Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 6)

"Barang siapa bersungguh-sungguh, maka ia akan berhasil."

(Hadis riwayat Bukhari dan Muslim, makna dari "Man jadda wa jada")

***"Janganlah engkau menuntut ilmu untuk berbangga, tetapiuntutlah ilmu
untuk menghilangkan kebodohan dalam dirimu."***

(Imam Malik)

"Ilmu tanpa amal adalah sia-sia, amal tanpa ilmu adalah buta."

(Al-Ghazali)

SANWACANA

Assalamu'alaikum, Wr.Wb.

Alhamdulillahirobbil'alamiin. Puji syukur Penulis haturkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis ini dengan baik. Tidak lupa, shalawat dan salam senantiasa penulis ucapkan kepada junjungan kita, Rasulullah SAW, yang menjadi suri teladan mulia yang membawa kita kepada cahaya kehidupan dan iman.. Tesis dengan judul “Identifikasi Kesehatan Baterai Berbasis Citra Termal Dengan Metode Logika Fuzzy” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Elektro di Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama masa perkuliahan dan penelitian, penulis telah mendapatkan banyak hal berharga, baik berupa dukungan, bimbingan, semangat, motivasi maupun kontribusi dari berbagai pihak. Sehingga Tesis ini dapat terselasaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Progam Pascasarjana, Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan selaku Penguji utama penulis yang senantiasa memberikan bimbingan, ilmu, saran, dan kritik dalam penyelesaian tesis ini.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.
5. Ibu Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Lampung, dan selaku dosen Pembimbing Utama tugas akhir penulis atas kesediannya dalam membimbing, memberikan nasehat,

serta dorongan motivasi kepada penulis sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

6. Bapak Dr. Eng. F.X. Arinto Setyawan, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan masukan dan arahan untuk penyelesaian tesis ini.
7. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen Penguji Kedua atas kesediaannya dalam memberikan saran dan motivasi yang bermanfaat kepada penulis.
8. Segenap dosen dan pegawai di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang tak terlupakan oleh penulis.
9. Untuk kedua orangtua penulis Bapak Rahmadi S. dan Ibu Lely Suryati yang telah membesarkan dan memberi kasih sayang. Terima kasih atas kerja keras dan selalu mendukung penulis berupa doa dan memberi semangat, sehingga penulis dapat mencapai titik yang tidak bisa penulis bayangkan tanpa bantuan dan doa kedua orangtua penulis.
10. Kepada istri tercinta, Inggit Sagita yang telah menjadi sumber kekuatan, ketenangan, dan semangat dalam setiap langkah perjalanan ini. Terima kasih atas kesabaran, pengertian, dan doa yang tak henti mengiringi proses panjang ini. Kehadiranmu adalah anugerah yang tak ternilai.
11. Kepada anak-anak tercinta Farras, Syathir, dan Rayyan terima kasih karena telah menjadi cahaya dalam hidup saya. Senyuman dan kebahagiaan kalian adalah sumber motivasi yang luar biasa, yang menguatkan saya untuk terus berjuang dan menyelesaikan tanggung jawab ini. Semoga kalian kelak tumbuh menjadi pribadi yang berilmu dan berakhlak mulia.
12. Rani, Vito, Kia, dan Farid selaku saudara penulis yang senantiasa memberikan support tanpa henti.
13. Kepada Sahabat-sahabat yang selalu hadir dalam setiap proses, jatuh bangun, dan perjuangan ini. Terima kasih atas waktu, dukungan, serta saran yang kalian berikan dengan tulus.
14. Teman-teman Magister Teknik Elektro 2022, yang saling memberikan support selama perkuliahan.

Penulis menyampaikan permohonan maaf atas segala kekurangan dan ketidaksempurnaan yang mungkin terdapat dalam penulisan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak serta turut berkontribusi dalam memperkaya khazanah ilmu pengetahuan. Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih.

Bandar Lampung, 03 Agustus 2025
Penulis,

Perdana Agung Nugraha

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
SURAT PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
MOTO.....	ix
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. 1. Latar Belakang.....	1
1. 2. Rumusan Masalah.....	3
1. 3. Tujuan Penelitian	3
1. 4. Manfaat Penelitian	3
1. 5. Batasan masalah.....	3
1. 6. Hipotesis	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2. 1. Penelitian Terdahulu	5
2. 2. Baterai.....	9
2. 3. Resistansi Internal Baterai	10
2. 4. State of Health	12
2. 5. Neraca Energi Termal.....	13
2. 6. Pengolahan Citra.....	15
2. 7. Grayscale	16

2. 8. Deteksi tepi	16
2. 9. Logika Fuzzy	18
2. 10. Confusion Matriks	21
BAB III METODE PENELITIAN	24
3. 1. Waktu dan Tempat Penelitian	24
3. 2. Alat dan Komponen Penelitian	24
3. 3. Prosedur Penelitian	25
3. 4. Metode yang Diusulkan	26
3. 5. Perangkat Keras dan Perangkat Lunak	30
3. 6. Prosedur Pengujian	31
3. 7. Prosedur Pengolahan Citra.....	32
3. 8. Perancangan Logika Fuzzy	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4. 1. Hasil Data Set	35
4. 2. Hasil Pengambilan Citra	38
4. 3. Hasil Pengolahan Citra	40
4.4. Hasil Sistem Logika Fuzzy	48
4.5. Pembahasan	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Confusion Matriks.....	22
Tabel 3.1 Instrumen Pendukung Penelitian	24
Tabel 3.2 Perancangan data set	32
Tabel 4.1 Hasil pengujian resistansi internal	36
Tabel 4.2 Hasil perancangan data set.....	38
Tabel 4.3 koordinat objek hasil pengolahan citra visual.....	43
Tabel 4.4 Hasil identifikasi suhu pada area lingkungan	45
Tabel 4.5 Hasil identifikasi suhu pada citra termal.....	48
Tabel 4.6 Aturan Fuzzy.....	50
Tabel 4.7 hasil perbandingan hasil prediksi dan aktual baterai	52
Tabel 4.8 Hasil evaluasi tiap kategori	52
Tabel 4.9 Hasil pengujian baterai sampel	54

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Rangkaian Baterai	11
Gambar 2.2 Diagram Blok Proses Logika Fuzzy.....	19
Gambar 2.3 Kurva Himpunan Fuzzy	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian	25
Gambar 3.2 Tulang Ikan Tahapan Penelitian.....	29
Gambar 3.3 Diagram blok perancangan data set	32
Gambar 3.4 Diagram blok pengolahan citra visual.....	33
Gambar 3.6 Diagram blok sistem logika fuzzy.....	34
Gambar 4.1 Mini studio pengujian baterai litium ion	39
Gambar 4.2 Citra hasil tangkapan kamera flir	39
Gambar 4.3 Hasil konversi citra RGB ke grayscale	41
Gambar 4.4 Hasil pengolahan citra visual	43
Gambar 4.5 Implementasi koordinat area lingkungan citra termal.....	44
Gambar 4.6 Hasil potongan citra dan sebaran suhu area lingkungan	45
Gambar 4.7 hasil implementasi koordinat baterai pada citra termal.....	46
Gambar 4.8 Hasil potongan citra baterai dan histogram suhu	47
Gambar 4.9 Kurva himpunan fuzzy	49

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1. Latar Belakang

Teknologi energi dalam beberapa dekade terakhir telah berkembang pesat untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat sekaligus mengurangi dampak terhadap lingkungan. Teknologi yang ramah lingkungan seperti baterai telah mengambil peran penting dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi efek rumah kaca. Sebagaimana fungsinya, baterai digunakan pada sistem penyimpanan energi yang dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti transportasi, gawai, perkakas portabel dan energi terbarukan [1]

Baterai memiliki beragam jenis dan bentuk, mulai dari komposisi material, ukuran fisik dan kapasitas penyimpanan energi. Bahan pembentuk baterai yang umum digunakan antara lain litium-ion, nikel-metal hidrida, dan timbal-asam, masing-masing dengan keunggulan, karakteristik serta aplikasi yang berbeda. Selain itu, baterai dirancang dalam beragam bentuk, seperti silinder, prisma, dan *pouch*, yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan berbagai jenis perangkat. Keandalan pengoperasian perangkat tersebut sangat bergantung pada kesehatan baterai, yang mencakup kapasitas penyimpanan energi, efisiensi pengisian daya, dan ketahanan terhadap kondisi suhu lingkungan [2]. Baterai yang sehat dan handal merupakan keharusan untuk memastikan sistem dapat berfungsi secara optimal, efisien, dan aman. Sebaliknya, baterai dengan kondisi Kesehatan yang buruk akan berisiko *overheat* dan berpotensi terbakar [3].

Baterai litium-ion memiliki keunggulan dalam hal ketahanan masa pakai yang lama, kemudahan dalam perawatan, memiliki kepadatan energi yang tinggi

sehingga dapat menyimpan energi listrik dalam jumlah yang besar dan memiliki ukuran yang relatif kecil dan ringan, serta tidak mudah kehilangan daya atau kapasitas baterai meskipun baterai tidak digunakan [4]. Baterai litium-ion juga memiliki kekurangan yaitu sensitif terhadap kondisi ekstrem seperti pengisian atau pengosongan daya secara berlebihan, suhu lingkungan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah saat pengoperasian dapat berdampak signifikan. Kemampuan untuk menyimpan energi listrik akan menurun akibat berbagai mekanisme degradasi, seperti penggunaan terus menerus pada proses pengisian dan pengosongan daya, dan reaksi kimia yang terjadi di dalam baterai. Degradasi ini terjadi secara bertahap dan tidak selalu bersifat linier, penurunan kapasitas dapat terjadi lebih cepat atau lebih lambat pada tahap tertentu, tergantung pada interaksi antara faktor-faktor tersebut [5], [6]. Pemakaian baterai dalam kondisi normal juga akan mengalami pertumbuhan lapisan *Solid Electrolyte Interphase* (SEI) pada sisi anoda seiring bertambahnya usia baterai, yang secara bertahap dapat menggerus bahan aktif dalam baterai. Ketika lapisan SEI terus tumbuh selama penggunaan baterai, terutama pada operasional suhu tinggi, lapisan ini menjadi lebih tebal. Kondisi-kondisi ini dapat menyebabkan peningkatan resistansi internal baterai, hal ini juga akan meningkatkan suhu kerja baterai yang pada akhirnya akan menurunkan kapasitas baterai dan mengurangi kinerja serta keamanan pada jangka panjang [2], [7]. Pemantauan dan identifikasi status kesehatan baterai secara berkala merupakan aktivitas preventif untuk menjaga kinerja optimal dan mencegah kerusakan dini baterai [8].

Penelitian ini melakukan pendeteksian suhu pada permukaan baterai yang disebabkan oleh aliran arus melalui resistansi internal baterai. Dalam proses ini, kamera termal digunakan untuk menangkap sebaran suhu pada permukaan baterai dan memvisualisasikannya dalam bentuk citra termal. Pemanfaatan sistem Logika *fuzzy* digunakan untuk mengidentifikasi kesehatan baterai yang mengintegrasikan suhu lingkungan dan suhu kerja baterai berdasarkan parameter arus dan resistansi internal baterai sehingga dapat memprediksi kondisi kesehatan baterai secara tepat, cepat dan efisien.

1. 2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diangkat pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana cara mengidentifikasi karakteristik kesehatan baterai berdasarkan citra termal ?
2. Bagaimana metode logika *fuzzy* dapat digunakan untuk mengklasifikasikan kesehatan baterai berdasarkan data citra termal yang diperoleh, dan seberapa akurat metode ini dalam memprediksi kondisi kesehatan baterai ?

1. 3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah

1. Mengidentifikasi kondisi kesehatan baterai litium ion berdasarkan karakteristik suhu pada citra termal menggunakan logika *fuzzy*.
2. Menghitung tingkat akurasi metode logika *fuzzy* dalam memprediksi kondisi kesehatan baterai.

1. 4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan menambah wawasan ilmiah mengenai karakteristik kesehatan baterai berdasarkan citra termal, dapat memberi kemudahan dalam mengidentifikasi kesehatan baterai serta mengklasifikasi kondisi kesehatan baterai untuk mendeteksi penurunan kinerja baterai dan mengurangi risiko kerusakan dini baterai.

1. 5. Batasan masalah

Adapun batasan terhadap masalah pada penelitian ini adalah

1. Penelitian dilakukan dalam lingkungan laboratorium dengan suhu ruang pada rentang 27—30° C.
2. Pengukuran suhu baterai terbatas pada permukaan luar baterai menggunakan kamera termal yang ditempatkan di sisi atas baterai pada posisi statis.
3. Penelitian fokus pada kondisi operasional pengosongan daya normal. kondisi operasional di luar spesifikasi normal tidak dipertimbangkan.

1. 6. Hipotesis

Merancang sistem Logika *fuzzy* untuk mengidentifikasi kesehatan baterai dengan mengintegrasikan hubungan antara suhu lingkungan dan suhu kerja baterai berdasarkan parameter resistansi internal dan arus. hal ini memungkinkan dapat memprediksi kondisi kesehatan baterai secara tepat, cepat dan efisien.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1. Penelitian Terdahulu

Sebelum melakukan penelitian, dibutuhkan peninjauan terhadap penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian sebelumnya digunakan sebagai sarana pencarian referensi seputar topik permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu diagnosis kesalahan pada rangkaian kombinasional. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi utama dalam menulis adalah sebagai berikut :

Penelitian [9] dilakukan untuk memperkirakan *State of Health* (SoH) baterai litium-ion dengan menekankan pada pemantauan degradasi baterai melalui hubungan antara peningkatan resistansi internal *ohmik* dan penurunan kapasitas. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan model *Thevenin* dan algoritma *Recursive Least Squares* (RLS) untuk menyimulasikan dinamika baterai serta mengidentifikasi parameter model secara efisien. Metode ini mengestimasi resistansi internal pada berbagai tahap penuaan baterai dengan memanfaatkan dua siklus pelepasan arus secara acak. Untuk memvalidasi akurasi pendekatan tersebut, peneliti melakukan serangkaian eksperimen pada kondisi arus dinamis. Hasilnya menunjukkan bahwa kesalahan estimasi SoH maksimum berada dalam kisaran $\pm 4\%$, yang mencerminkan tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi. Metode ini tidak hanya mempertimbangkan degradasi akibat peningkatan resistansi internal, tetapi juga mempertimbangkan penurunan kapasitas secara bersamaan.

Penelitian [10] membahas permasalahan utama dalam memperkirakan *State of Health* (SoH) baterai litium-ion, karena SoH berkaitan langsung dengan keandalan

dan keselamatan baterai, khususnya dalam aplikasi seperti kendaraan listrik dan perangkat elektronik. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, digunakan dua pendekatan, yaitu model degradasi empiris dan model kompensasi kesalahan. Model degradasi empiris dikembangkan berdasarkan data historis baterai untuk menangkap pola penurunan kapasitas selama pemakaian, sedangkan model kompensasi kesalahan berfungsi memperbaiki kesalahan prediksi yang mungkin muncul dari model empiris. Dalam penelitian ini, algoritma optimasi konveks digunakan pada tahap praproses data guna mengurangi kesalahan atau derau pada data pengukuran baterai. Kemudian data tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi parameter dalam model degradasi. Optimasi konveks sendiri merujuk pada teknik optimasi di mana fungsi objektif bersifat konveks dan batasan-batasannya berada dalam himpunan konveks, sehingga dapat diselesaikan secara efisien. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi model tersebut mampu meningkatkan akurasi prediksi SoH secara signifikan dibandingkan metode konvensional. Beberapa temuan penting dari penelitian ini mencakup: pertama, integrasi model empiris dan pendekatan *data-driven* menghasilkan prediksi SoH yang lebih presisi karena mampu menangkap kondisi operasional aktual baterai. kedua hasil validasi menggunakan data uji dari NASA menunjukkan bahwa pendekatan gabungan ini memiliki tingkat kesalahan rata-rata sekitar 2% dan kesalahan maksimum 10%.

Penelitian [11] bertujuan untuk menganalisis suhu operasional baterai litium-ion ketika diberikan beban tertentu. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah analisis laju perpindahan panas dengan pendekatan konveksi. Penelitian dilakukan melalui eksperimen langsung terhadap baterai litium-ion dengan variasi beban arus, yang kemudian dilanjutkan dengan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa suhu permukaan baterai meningkat seiring dengan bertambahnya arus, dengan distribusi panas lebih dominan pada bagian tengah baterai. Selain itu, laju perpindahan panas diketahui meningkat secara polinomial terhadap kenaikan arus keluaran baterai. Simulasi menggunakan ANSYS Fluent menghasilkan nilai yang mendekati hasil

eksperimen, dengan tingkat kesalahan kurang dari 7%, yang menandakan validitas dan akurasi dalam kondisi baik.

Penelitian [12] berfokus pada identifikasi karakteristik suhu telur ayam dengan menggunakan kamera termal untuk mendeteksi perubahan suhu sebagai parameter utama yang ditangkap menggunakan kamera termal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membedakan antara telur *fertile* dan *infertile* melalui analisis citra termal. Proses pengolahan citra dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB, melalui beberapa tahapan yaitu *cropping*, *grayscale*, dan penentuan *region of interest* (ROI). Hasil penelitian menunjukkan dua karakteristik yaitu telur yang mengalami peningkatan suhu yang relatif stabil dikategorikan sebagai telur *fertile*, sedangkan telur dengan suhu yang tidak stabil atau fluktuatif dikategorikan sebagai telur *infertile*. Penelitian ini menunjukkan penggunaan teknologi termografi inframerah dalam proses seleksi telur secara efisien.

Penelitian [13] dilakukan untuk membahas estimasi *State of Health* (SoH) dan resistansi internal sebagai parameter dalam menentukan masa aktif baterai litium-ion, dengan memanfaatkan metode jaringan saraf tiruan melalui pendekatan *Long Short-Term Memory* (LSTM). Model LSTM dipilih karena kemampuannya dalam mengingat pola jangka panjang dari data historis baterai, sehingga efektif digunakan untuk mengestimasi SoH dan resistansi internal. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tegangan, arus, dan suhu yang didapat dari tiga siklus pengisian, pengosongan, serta pengukuran impedansi. Penelitian ini menggunakan dua tahap pemodelan LSTM dengan dua sampel baterai bertipe sama. LSTM pertama digunakan untuk mengestimasi nilai SoH, sementara hasil estimasi SoH beserta data operasional digunakan sebagai *input* untuk LSTM kedua dalam mengestimasi resistansi internal baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode LSTM menghasilkan akurasi estimasi yang lebih tinggi dibandingkan metode *Feedforward Neural Network* (FNN), dengan nilai metrik evaluasi MAPE, MPE, dan RMSE masing-masing sebesar 0.20812, 0.0034315, dan 0.0082006 untuk LSTM, sedangkan FNN menunjukkan nilai 0.57408, 0.0096357, dan

0.03264. Perbedaan ini menunjukkan keunggulan model LSTM dalam akurasi estimasi memperkirakan masa aktif baterai.

Penelitian [14] membahas tentang sistem pemantauan kesehatan baterai atau *State of Health* (SoH). Sistem pemantauan SoH dirancang menggunakan sensor INA219 untuk mengukur tegangan dan arus, serta sensor DS18B20 untuk mengukur suhu. Data dari sensor diproses pada mikrokontroler yang ditanamkan kecerdasan buatan dengan metode logika *fuzzy* dan juga dilakukan simulasi tambahan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Parameter tegangan dan arus digunakan untuk menghitung nilai kapasitas baterai, yang kemudian dijadikan sebagai variabel *input* bersama dengan parameter suhu dalam proses fuzzifikasi. Hasil dari logika *fuzzy* menghasilkan *output* berupa kondisi kesehatan baterai yang diklasifikasikan ke dalam tiga kategori: *damage* (<50%), *weak* (40—80%), dan *good* (>70%). Hasil estimasi SoH dari tiga sampel baterai yang berasal dari alat dan hasil simulasi MATLAB, yaitu: Baterai 1 (2200 mAh) dengan estimasi SoH 90% dari alat dan 87,6% dari MATLAB, Baterai 2 (1500 mAh) dengan hasil yang sama 60% pada keduanya, dan Baterai 3 (2200 mAh) dengan estimasi SoH 90% dari alat dan 87,6% dari MATLAB. Sistem pemantauan yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi tinggi dan kesalahan kurang dari 5%.

Secara garis besar, penelitian mengenai pemantauan dan prediksi kesehatan baterai telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan. Penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi penting bagi pengembangan di masa depan, khususnya dalam bidang pemantauan kesehatan baterai. Namun demikian, penerapan kecerdasan buatan dalam menganalisis suhu operasional baterai, suhu lingkungan, serta nilai *error* berbasis citra termal dapat meningkatkan efisiensi waktu, karena mampu menggantikan proses pengecekan *Kesehatan baterai* pada umumnya menggunakan metode *Coulomb Counting* yang memerlukan waktu lebih lama. Selain itu juga, berpotensi menghemat penggunaan komponen jika dibandingkan dengan metode berbasis resistansi internal.

2. 2. Baterai

Baterai merupakan komponen elektronika yang memiliki kemampuan menyimpan energi listrik melalui reaksi kimia, untuk mendukung proses tersebut baterai memerlukan beberapa komponen yang tersusun dan saling berkaitan seperti material aktif anoda dan katoda, elektrolit, lapisan *Solid Electrolyte Interface* (SEI), dan separator. Komponen-komponen tersebut dirancang sesuai dengan spesifikasi baterai, seperti tegangan, kapasitas dan arus maksimal. Baterai memiliki banyak jenis, seperti litium-ion (Li-ion), nikel-metal hidrida (NiMH), nikel-kadmium (NiCd), lead-acid, dan alkaline. Pada penelitian ini baterai yang digunakan adalah litium-ion (Li-ion) 18650, karena beberapa pertimbangan, seperti :

1. Baterai Li-ion banyak digunakan dalam perangkat elektronik portabel, seperti smartphone, laptop, portable power tools dan kamera, sehingga hasil penelitian ini memiliki potensi aplikasi yang luas.
2. Baterai Li-ion mudah ditemukan di pasar lokal, sehingga memudahkan dalam pengadaan sampel baterai untuk penelitian.
3. Baterai Li-ion memiliki *datasheet* dan spesifikasi yang tersedia secara luas, sehingga memudahkan dalam proses analisis karakteristik baterai dengan akurat dan terstruktur.
4. Baterai Li-ion memiliki siklus hidup yang lebih Panjang dibandingkan baterai jenis lain seperti (NiCd) atau (NiMH).

Dalam proses pengisian, baterai diberikan energi listrik dalam bentuk tegangan dan arus yang menciptakan beda potensial antara anoda dan katoda. Hal ini menyebabkan katoda mengalami reaksi oksidasi, yaitu melepaskan ion litium dan elektron. Elektron di katoda bergerak melalui sirkuit luar (rangkaian *charger*) menuju anoda, sementara ion litium berpindah dari katoda ke anoda melalui elektrolit. Di anoda, elektron dan ion litium bertemu kembali dan mengalami reaksi reduksi. Ion litium kemudian disimpan di dalam struktur grafit melalui proses interkalasi, yaitu proses integrasi ion litium ke dalam lapisan-lapisan karbon pada anoda selama pengisian baterai [15], [16], Sebaliknya dalam proses pelepasan energi baterai yaitu mengubah energi kimia menjadi energi listrik.

2. 3. Resistansi Internal Baterai

Seiring bertambahnya usia pakai baterai Li-ion yang ditandai dengan siklus pengisian dan pengosongan energi listrik, baterai Li-ion mengalami degradasi mekanisme atau penurunan kemampuan dalam menyimpan dan mensuplai energi listrik kedalam sistem perangkat. Dampak dari degradasi mekanisme tersebut menyebabkan peningkatan resistansi internal dalam tubuh baterai itu sendiri [17]. Resistansi internal merupakan hambatan alami yang timbul akibat reaksi kimia dalam baterai dan berpengaruh terhadap aliran arus listrik. Berikut adalah beberapa komponen baterai yang berperan sebagai penentu degradasi mekanisme, seperti:

1. Material Katoda dan anoda

Material pendukung katoda yaitu logam oksida dan grafit untuk anoda. Material ini memiliki nilai konduktivitas yang terbatas, terutama Ketika material ini mengalami degradasi fungsi. Semakin besar hambatan dalam aliran elektron atau ion litium di dalam material ini, semakin tinggi resistansi internal baterai

2. Elektrolit

Elektrolit adalah larutan garam litium sebagai media untuk ion litium melakukan pergerakan bebas di antara katoda dan anoda. Elektrolit bersifat konduktif terhadap ion litium dan isolator terhadap elektron. Ketika elektrolit mengalami degradasi karena reaksi kimia atau pembentukan gas di dalam baterai, hal ini dapat mempengaruhi konduktivitas ionik dan meningkatkan resistansi. Semakin sulit ion litium bergerak melalui elektrolit, semakin tinggi resistansi internal.

3. Lapisan SEI

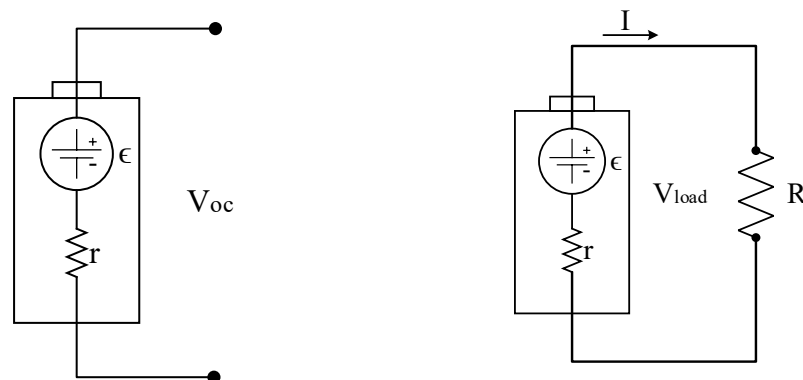
Lapisan SEI adalah lapisan pelindung yang terbentuk pada sisi permukaan anoda baterai litium. Lapisan ini diperoleh dari reaksi elektrokimia antara ion litium dengan elektrolit sejak pertama kali baterai mengalami proses pengisian dan pengosongan daya [18]. Reaksi kimia tersebut menghasilkan litium fluoride (LiF) yaitu material anorganik yang bersifat isolator listrik yang menghambat aliran elektron dari anoda ke elektrolit namun dapat melewatkan ion litium dari anoda menuju elektrolit atau sebaliknya. Kehadiran LiF yang

berlebihan pada lapisan SEI dapat mempengaruhi konduktivitas dan meningkatkan resistansi internal sel baterai yang menyebabkan penurunan performa [21].

4. Separator

Separator baterai memiliki bentuk membran polimer yang berfungsi sebagai komponen pemisah antara elektroda positif (katoda) dengan elektroda negatif (anoda) guna mencegah hubungan arus pendek antara kedua elektroda. Namun demikian, Separator tetap memungkinkan untuk dilalui ion litium melalui elektrolit ke antara dua elektroda. Faktor yang mempengaruhi korsleting antar kedua elektroda yaitu kontaminasi dengan logam kecil, pengisian daya yang berlebih, dan degradasi material. faktor-faktor tersebut dapat menimbulkan tumbuhnya dendrit pada lapisan separator.

Pengukuran resistansi internal baterai merupakan hal penting untuk mengetahui kualitas dan kondisi baterai, terutama ketika baterai terhubung ke beban. Salah satu metode yang digunakan adalah metode beban DC. Dalam metode ini, tegangan baterai diukur dalam dua kondisi, yaitu ketika baterai tidak terhubung ke beban atau tegangan rangkaian terbuka dan ketika baterai terhubung ke beban atau tegangan rangkaian tertutup, dengan demikian baterai mengalirkan arus ke beban tersebut.



a. Baterai keadaan Rangkaian Terbuka b. Baterai keadaan terhubung ke beban

Gambar 2.1 Rangkaian Baterai

Pada rangkaian terbuka tegangan terminal (V_{oc}) sama dengan Gaya Gerak Listrik (E), hal ini terjadi karena arus (I) bernilai nol. Namun ketika baterai terhubung ke beban (V_{load}), tegangan terminal mengalami penurunan yang disebabkan arus

mengalir melalui resistansi internal baterai (r) dan resistor beban (R) seperti yang direpresentasikan pada Persamaan (2.1).

$$\begin{aligned}\epsilon &= IR + Ir \\ \epsilon &= V_{load} + Ir\end{aligned}\tag{2.1}$$

2. 4. State of Health

State of Health (SOH) adalah ukuran yang menggambarkan kondisi kesehatan baterai secara keseluruhan. Nilai SOH dinyatakan dalam persentase dan menunjukkan seberapa baik atau buruk kemampuan baterai dalam menyimpan energi dibandingkan saat baterai masih baru atau keadaan standar pabrik. Semakin tinggi nilai SOH, semakin baik kondisi baterai tersebut.

Penentuan nilai SOH dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan, di antaranya:

1. Pendekatan kapasitas baterai

Pendekatan dikenal juga sebagai *Coulomb counting*, dilakukan dengan mengamati jumlah muatan Listrik (arus) yang masuk atau keluar selama proses pengisian dari kondisi baterai kosong hingga penuh atau selama proses pengosongan baterai dari keadaan penuh hingga kosong. Nilai SOH dihitung berdasarkan perbandingan antara kapasitas baterai saat ini dengan kapasitas baterai saat masih baru. Persamaan matematisnya ditunjukkan sebagai berikut:

$$SOH = \frac{C_i}{C_0} \times 100\%\tag{2.2}$$

Di mana:

C_0 adalah kapasitas baterai saat masih baru (Ah)

C_i adalah kapasitas baterai saat ini

2. Pendekatan resistansi internal

Pendekatan ini menggunakan perubahan resistansi internal baterai sebagai indikator degradasi. Pengukuran nilai resistansi internal baterai dengan melibatkan nilai resistansi internal saat ini (r_{now}), resistansi internal saat baterai baru atau standar (r_{new}), dan resistansi internal saat mencapai batas maksimal

(r_{eol}). SOH dengan pendekatan resistansi internal dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.3) [19].

$$SOH = \frac{r_{eol} - r_{now}}{r_{eol} - r_{new}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Tingkat kesehatan baterai pada dasarnya ditentukan oleh jenis aplikasi atau penggunaan baterai itu sendiri. Sebagai contoh, ambang batas SOH untuk aplikasi kendaraan listrik umumnya berada pada kisaran 70–80% dari kapasitas normal [20]. Sementara itu, pada penelitian lain menyebutkan bahwa nilai SOH terendah dapat mencapai 60%, dan tertinggi hingga 90% tergantung pada kondisi dan kebutuhan penggunaannya [21]. Dalam penelitian ini, baterai dikategorikan tidak sehat atau memasuki akhir masa pakai (*End of Life*) apabila nilai SOH kurang dari 60%. Jika nilai SOH berada di atas 80%, maka baterai dikatakan dalam kondisi sehat, sedangkan jika SOH berada di antara 60% dan 80%, maka baterai dikategorikan dalam kondisi waspada.

2. 5. Neraca Energi Termal

Dalam penelitian ini, neraca energi termal digunakan untuk menganalisis hubungan antara perubahan suhu baterai terhadap resistansi internalnya. Neraca energi pada sistem termal didasarkan pada hukum kekekalan energi seperti Persamaan (2.4), di mana energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan, akan tetapi energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain.

$$Energi\ Masuk - Energi\ Keluar = Energi\ tersimpan \quad (2.4)$$

Energi termal yang dihasilkan dalam sistem baterai adalah akibat dari aktivitas internal, seperti reaksi kimia dan resistansi listrik saat arus mengalir, yang dikenal sebagai *Joule heating*. *Joule heating* merupakan proses perubahan energi listrik menjadi energi panas berdasarkan hukum ohm, di mana arus listrik mengalir melalui bahan konduktor. Dalam konteks baterai, *joule heating* adalah efek samping dari penggunaan arus listrik, pemanasan yang ditimbulkan dianggap sebagai kerugian resistif yang menyebabkan kehilangan energi[22].

$$Q = I^2 \cdot r \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

Arus (I) yang mengalir di dalam baterai menghasilkan panas. Besarnya nilai energi panas yang dihasilkan dapat dilihat pada Persamaan (2.5) yang terjadi akibat arus mengalir melalui resistansi internal (r) baterai selama proses waktu (t) pengisian atau pengosongan baterai. Energi panas yang dihasilkan dari *joule heating* terjadi di inti baterai kemudian merambat ke permukaan baterai melalui perpindahan panas secara konduksi. Pada baterai litium ion silinder 18650 memiliki perbedaan suhu yang relatif kecil antara suhu inti baterai dengan permukaan baterai hal ini terjadi karena baterai memiliki konduktivitas yang cukup tinggi [11]. pada penelitian ini perpindahan panas secara konduksi diasumsikan sama dengan energi panas yang terjadi di inti baterai.

Ketika panas mencapai permukaan baterai, energi termal tersebut akan dilepas ke udara sekitar melalui perpindahan panas secara konveksi. Mekanisme konveksi ini dipengaruhi oleh perbedaan suhu antara permukaan baterai dan udara di sekitar. Laju perpindahan panas di permukaan baterai dapat dihitung dengan Persamaan (2.6) hukum pendinginan newton.

$$Q = h \cdot A \cdot (T_B - T_L) \Delta t \quad (2.6)$$

Di mana :

Q adalah laju perpindahan panas secara konveksi (J)

h adalah koefisien perpindahan panas konveksi (1,035 W/m²k)

A adalah luas permukaan baterai yang bersentuhan dengan udara (m²)

T_B adalah suhu permukaan baterai (°C/°K)

T_L adalah suhu lingkungan sekitar (°C/°K)

Δt adalah selang perubahan waktu (s)

Selain itu, perubahan energi termal dalam volume material baterai juga diperhitungkan sebagai bagian dari neraca energi, yang mencerminkan akumulasi dari pelepasan energi termal akibat perubahan suhu (ΔT) seperti pada c (2.7). Proses ini dipengaruhi oleh kapasitas panas spesifik material baterai (Cp) yang bernilai 894 W/m.K dan masa (m) baterai seberat 0,045kg [11].

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

Dengan mempertimbangkan semua komponen, yaitu selisih dari energi panas yang dihasilkan oleh *Joule Heating* dan energi yang lepas melalui perpindahan panas secara konveksi yang menghasilkan perubahan energi termal pada volume material baterai akibat perubahan suhu (∂T) dalam selang waktu tertentu (∂t), neraca energi termal pada sistem baterai dapat dihitung secara menyeluruh seperti Persamaan (2.8). Hasil perhitungan neraca energi ini menjadi dasar dalam menentukan nilai resistansi internal baterai, yang kemudian digunakan sebagai parameter dalam proses klasifikasi kondisi baterai.

$$m \cdot Cp \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = I^2 \cdot r - h \cdot A(T_B - T_L) \quad (2.8)$$

2. 6. Pengolahan Citra

Citra adalah representasi visual dari suatu objek yang terkandung informasi di dalamnya, sehingga dapat dianalisis dan diinterpretasikan sesuai tujuan pengamatan. Informasi yang terkandung dalam citra terbagi dua yaitu informasi citra dasar dan informasi citra abstrak. Informasi citra dasar adalah informasi visual yang dapat dikenali dan diolah secara langsung tanpa memerlukan pengetahuan khusus, seperti informasi warna, tekstur dan bentuk. Informasi citra abstrak adalah informasi visual yang memerlukan pengetahuan khusus untuk mendapatkan informasi yang terdapat pada citra tersebut, misalnya menganalisis informasi ekspresi wajah seperti sedih, marah atau gembira, dan menganalisis nilai suhu yang diwakili oleh intensitas warna citra termal [23].

Pengolahan citra merupakan proses manipulasi dan analisis dari informasi visual suatu objek dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas citra dan mengekstraksi informasi penting dari citra tersebut, sehingga dapat dilakukan identifikasi terkait dengan karakteristik dari objek dalam citra yang selanjutnya digunakan dalam menginterpretasikan atau mengklasifikasikan objek tersebut [24].

2. 7. Grayscale

Konversi citra dari kanal warna Merah, Hijau, dan Biru (RGB) ke *Grayscale* merupakan salah satu proses dalam pengolahan citra digital yang bertujuan untuk menyederhanakan informasi warna menjadi bentuk tunggal, yaitu tingkat intensitas aras keabuan. Citra *grayscale* hanya memuat informasi tentang tingkat kecerahan (*brightness*) tanpa menyajikan komponen warna, sehingga dapat mempermudah pada tahapan analisis citra dan mengurangi beban komputasi dalam pengolahan data.

Pada penelitian ini, konversi dari RGB ke *grayscale* dilakukan dengan menggunakan metode pembobotan koefisien berdasarkan standar *Luminosity*, yang mempertimbangkan sensitivitas mata manusia terhadap masing-masing warna. Proses konversi ini dihitung menggunakan formula yang ditunjukkan pada Persamaan (2.9). Di mana nilai Intensitas (I) didapat dari jumlah hasil pengali nilai pembobotan dengan Kanal warna merah (R), hijau(G), dan biru (B) [25].

$$\text{Intensitas warna} = 0,2989 \cdot R + 0,5870 \cdot G + 0,1140 \cdot B \quad (2.9)$$

2. 8. Deteksi tepi

Tepi pada suatu citra merupakan area di mana terjadinya perbedaan signifikan pada nilai intensitas aras keabuan, yang menunjukkan perubahan kontras antara satu piksel dengan piksel di sekitarnya. Perubahan intensitas ini menjadi acuan dalam mengidentifikasi batas antar objek terhadap latar belakang pada suatu citra. Proses deteksi tepi bertujuan untuk mengekstraksi batas-batas objek dengan cara mengidentifikasi lokasi terjadinya perubahan signifikan nilai intensitas tersebut. Dalam konteks penelitian ini, deteksi tepi digunakan untuk mengidentifikasi objek baterai dalam citra, sehingga dapat membantu proses segmentasi dan identifikasi objek dengan lebih akurat pada tahap awal pengolahan citra [24].

Dalam mendeteksi tepi pada citra, terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan, salah satunya dengan operator *Canny*. Deteksi tepi operator *Canny* dikembangkan oleh John F. Canny pada tahun 1986. Deteksi tepi operator *Canny* merupakan salah

satu teknik pengolahan citra yang digunakan untuk mendeteksi batas objek secara akurat dan efisien. Proses deteksi tepi operator *Canny* terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

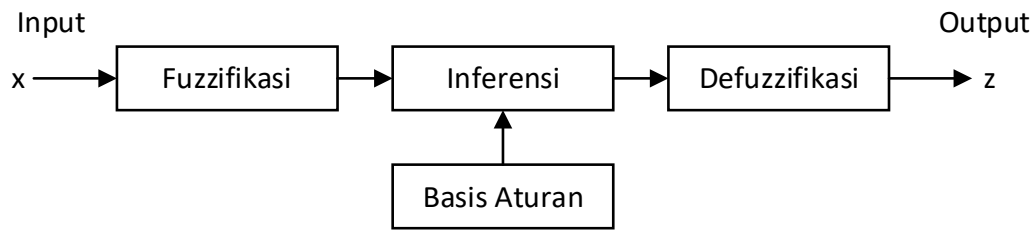
1. Melakukan perbaikan citra dengan mengurangi *noise* menggunakan filter *Gaussian*. Tahapan ini bertujuan untuk mereduksi derau yang dapat mempengaruhi hasil deteksi tepi, sehingga tepi objek yang dihasilkan lebih halus dan stabil [26].
2. Melakukan perhitungan gradien pertama, salah satunya menggunakan operator *Sobel*. Operator ini digunakan untuk menghitung perubahan intensitas piksel dalam arah horizontal (Gx) dan vertikal (Gy), kemudian nilai gradien total dihitung untuk menentukan besar dan arah tepi pada citra [27].
3. Menentukan nilai ambang batas (*thresholding*), yaitu dengan menetapkan nilai ambang batas atas dan batas bawah. Piksel dengan nilai gradien melebihi batas ambang atas dianggap sebagai tepi kuat (*strong edge*), sedangkan piksel dengan nilai gradien kurang dari ambang batas bawah akan diabaikan. Piksel yang berada di antara kedua ambang tersebut akan ditentukan statusnya berdasarkan hubungan terhadap tepi kuat pada tahap selanjutnya [26].
4. Melakukan proses *non-maximum suppression* dan *edge tracking by hysteresis*. *Non-maximum suppression* digunakan untuk menipiskan garis tepi sehingga menyisakan piksel maksimum di sepanjang arah gradien, hal ini bertujuan untuk menebalkan dan mempertajam garis tepi. Sedangkan *edge tracking by hysteresis* bertugas memastikan keberlanjutan tepi dengan memanfaatkan hubungan antar piksel berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan. Piksel yang berada di antara ambang batas akan diputuskan statusnya, apakah menjadi bagian dari tepi atau tidak, bergantung pada hubungan dengan tepi kuat di sekitarnya [26].

2. 9. Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* merupakan suatu metode yang digunakan untuk melakukan perhitungan dengan variabel berupa kata (kecil, sedang, atau besar) yang kemudian diubah ke dalam bentuk bilangan numerik (20, 40, 60 dan seterusnya) untuk tujuan analisis dan pengambilan keputusan. Logika fuzzy didasarkan pada teori himpunan *fuzzy*, di mana keanggotaan suatu elemen dalam himpunan tidak ditentukan secara pasti seperti pada logika klasik yang memproses data dengan nilai biner 1 untuk benar dan 0 untuk salah, melainkan dinyatakan dalam derajat keanggotaan. Fungsi keanggotaan ini digambarkan dalam bentuk kurva yang menghubungkan nilai *input* dengan derajat keanggotaannya, yang bernilai antara 0 hingga 1, sehingga mampu merepresentasikan kondisi samar dalam sebuah permasalahan [28]. Konsep ini memungkinkan merepresentasikan ketidakpastian dalam pengklasifikasian data, seperti pada kasus penilaian terhadap temperatur, kecepatan, kelembapan dan sebagainya

Himpunan *fuzzy* dapat diartikan sebagai sekumpulan objek yang keanggotaannya tidak dapat ditentukan secara mutlak, melainkan dijelaskan menggunakan fungsi keanggotaan yang mencerminkan derajat keanggotaan suatu elemen dalam himpunan tersebut. Dalam implementasinya, sistem *fuzzy* dimanfaatkan untuk memetakan variabel *input* ke variabel *output* berdasarkan aturan-aturan yang telah ditentukan dalam bentuk kaidah *fuzzy*. Sistem ini bertujuan untuk menarik kesimpulan logis dalam kondisi yang tidak pasti, dengan memanfaatkan teori himpunan *fuzzy* dan penalaran *fuzzy*. Dalam pengaplikasian metode *fuzzy*, terdapat tiga model yang umum digunakan, yaitu metode Logika Fuzzy Tsukamoto, Mamdani, dan Sugeno [29].

Logika *fuzzy* memiliki empat tahapan umum yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan seperti yang ditunjukkan pada diagram blok pada Gambar 2.2, yaitu:

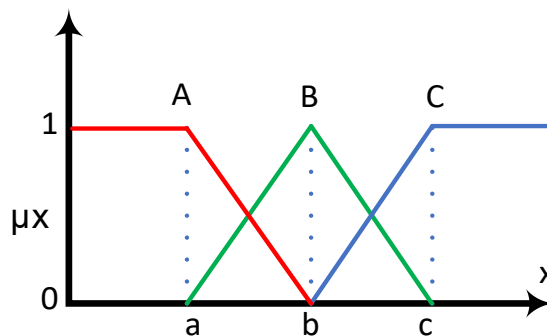
Gambar 2.2 Diagram Blok Proses Logika *Fuzzy*

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah bilangan tegas (*crisp*) sebagai masukan menjadi variabel *linguistic* berupa Bahasa alami yang dapat mudah dipahami pada sistem *fuzzy*. Variabel ini dinyatakan dalam bentuk himpunan *Fuzzy* yang masing-masing memiliki derajat keanggotaan. Misalkan pada proses fuzzifikasi menggunakan kombinasi dua jenis derajat keanggotaan, yaitu kurva bahu dan kurva segitiga yang digambarkan pada Gambar 2.3 dan derajat keanggotaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0 & x \geq b \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x \leq a \end{cases} & \mu_B(x) &= \begin{cases} 0 & x \leq a \text{ or } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 1 & x = b \end{cases} \end{aligned}$$

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0 & x \leq b \\ \frac{x-b}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 1 & x \geq c \end{cases}$$



Gambar 2.3 Kurva Himpunan Fuzzy

Basis aturan dalam sistem logika *fuzzy* merupakan kumpulan aturan yang digunakan untuk memetakan masukan *fuzzy* ke luaran *fuzzy* berdasarkan pengetahuan yang dibuat oleh pakar atau peneliti. Aturan ini dinyatakan dalam bentuk IF–THEN atau jika–maka, yang merupakan inti dari proses inferensi dalam sistem *fuzzy*. Bentuk umum dari aturan *fuzzy* adalah sebagai berikut :

$$\text{IF } X \text{ is } A \text{ THEN } Z \text{ is } B$$

Di mana :

X dan Z adalah skalar

A dan B adalah himpunan *fuzzy*.

Bagian yang mengikuti IF disebut sebagai anteseden, sedangkan aturan yang mengikuti THEN disebut sebagai konsekuen. Aturan *fuzzy* dapat diperluas lebih dari satu variabel *input* menggunakan operator logika *fuzzy* seperti and, or, dan not. Bentuk perluasannya dengan operator and adalah sebagai berikut:

$$\text{IF } (X_1 \text{ is } A_1) \text{ and } (X_2 \text{ is } A_2) \text{ and } (X_n \text{ is } A_n) \text{ THEN } (Z \text{ is } B)$$

2. Inferensi

inferensi adalah komponen utama pada sistem logika *fuzzy* yang berfungsi menggabungkan nilai *input fuzzy* dengan aturan *fuzzy* yang berdasarkan pada basis aturan untuk menghasilkan *output fuzzy*. inferensi mendefinisikan pemetaan dari himpunan *fuzzy input* ke dalam himpunan *fuzzy output* dengan menggunakan logika *fuzzy* sebagai dasar pengambilan keputusan.

Dalam proses kerjanya, inferensi melakukan evaluasi terhadap aturan *fuzzy* menggunakan operator logika seperti AND, OR, dan NOT. Operator AND direpresentasikan dengan mengambil nilai minimum dari derajat keanggotaan tiap anteseden, sedangkan operator OR direpresentasikan dengan nilai maksimum. Salah satu tahap dalam inferensi adalah perhitungan nilai α -predikat, yaitu nilai yang diperoleh dari derajat keanggotaan minimum sebagai tingkat kebenaran dari sebuah aturan pada bagian anteseden. Misalnya, jika yang digunakan adalah operator AND, maka nilai α -predikat seperti Persamaan (2.10).

$$\alpha \text{ predikat} = \mu_{A \cap B}$$

$$\alpha \text{ predikat} = \min(\mu_A(x); \mu_B(x)) \quad (2.10)$$

Di mana $\mu_{A \cap B}$ adalah derajat keanggotaan variabel *input* terhadap himpunan *fuzzy* A dan B. Nilai α -predikat kemudian digunakan untuk mendapatkan nilai derajat keanggotaan pada variabel *output* (Z) yang akan digunakan dalam proses defuzzifikasi.

3. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses mengubah *output* berupa himpunan *fuzzy* yang dihasilkan dari tahap inferensi menjadi sebuah nilai tegas (*crisp*). Proses ini bertujuan untuk menghasilkan luaran yang dapat digunakan dalam pengambilan Keputusan. Dalam defuzzifikasi, terdapat beberapa metode yang umum digunakan, seperti metode *centroid* (pusat massa atau *center of area*) dan metode *average* (rata-rata). Pada Persamaan (2.11) adalah defuzzifikasi menggunakan metode *Average*.

$$Z^* = \frac{\sum \alpha \text{ predikat}_{is} \cdot Z_i}{\sum \alpha \text{ predikat}_{is}} \quad (2.11)$$

2. 10. Confusion Matriks

Confusion matriks merupakan tabel yang tersusun dalam bentuk matriks, di mana di dalamnya terdapat informasi seberapa banyak data yang diprediksi benar dan salah. Confusion matriks digunakan dalam mengevaluasi performa sebuah sistem atau model yang menghasilkan luaran berupa kategori. Tabel ini membandingkan antara data hasil prediksi dengan data sebenarnya atau aktual, sehingga dapat diketahui seberapa banyak model melakukan klasifikasi dengan benar ataupun salah.

Pada penelitian ini confusion matriks digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem *fuzzy* dalam mengklasifikasikan status kesehatan baterai litium ion dalam tiga kategori yaitu sehat, waspada, dan tidak sehat. Confusion matriks yang digunakan berbentuk tabel 3x3 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1, dengan

sumbu horizontal untuk prediksi kesehatan baterai dan sumbu vertikal untuk kesehatan baterai aktual.

Tabel 2.1 Confusion Matriks

Prediksi \ Aktual	Sehat	Waspada	Tidak Sehat
Sehat	True Positive	False Negative	False Negative
Waspada	False Positive	True Negative	False Negative
Tidak Sehat	False Positive	False Negative	True Negative

Hasil dari confusion matriks, dapat menghitung seberapa akurat, presisi, dan sensitivitas sistem yang dirancang dalam memprediksi kesehatan baterai.

a. Akurasi

Digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar sistem memprediksi yang benar berbanding dengan total data yang diprediksi. Akurasi dapat dihitung dengan Persamaan (2.12).

$$Akurasi = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2.12)$$

b. Precision

Precision digunakan untuk mengetahui seberapa banyak ketepatan sistem dalam memprediksi kebenaran dalam suatu kategori berbanding dengan total prediksi dalam kategori tersebut. Untuk menghitung tingkat presisi sistem dapat menggunakan Persamaan (2.13), (2.14) dan (2.15).

$$Precision_{Sehat} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (2.13)$$

$$Precision_{Waspada} = \frac{TN}{TN + FN} \times 100\% \quad (2.14)$$

$$Precision_{Tidak\ Sehat} = \frac{TN}{TN + FN} \times 100\% \quad (2.15)$$

c. Recall

Recall (sensitivitas) digunakan untuk mengetahui seberapa banyak data aktual yang dapat diprediksi dengan benar berbanding dengan total prediksi dalam kategori tersebut. Sensitivitas dapat dihitung dengan Persamaan (2.16), (2.17) dan (2.18).

$$Recall_{Sehat} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (2.16)$$

$$Recall_{Waspada} = \frac{TN}{TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2.17)$$

$$Recall_{Tidak\ Sehat} = \frac{TN}{TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2.18)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

3. 1. Waktu dan Tempat Penelitian

Perencanaan, implementasi dan pengujian penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Kendali Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2025.

3. 2. Alat dan Komponen Penelitian

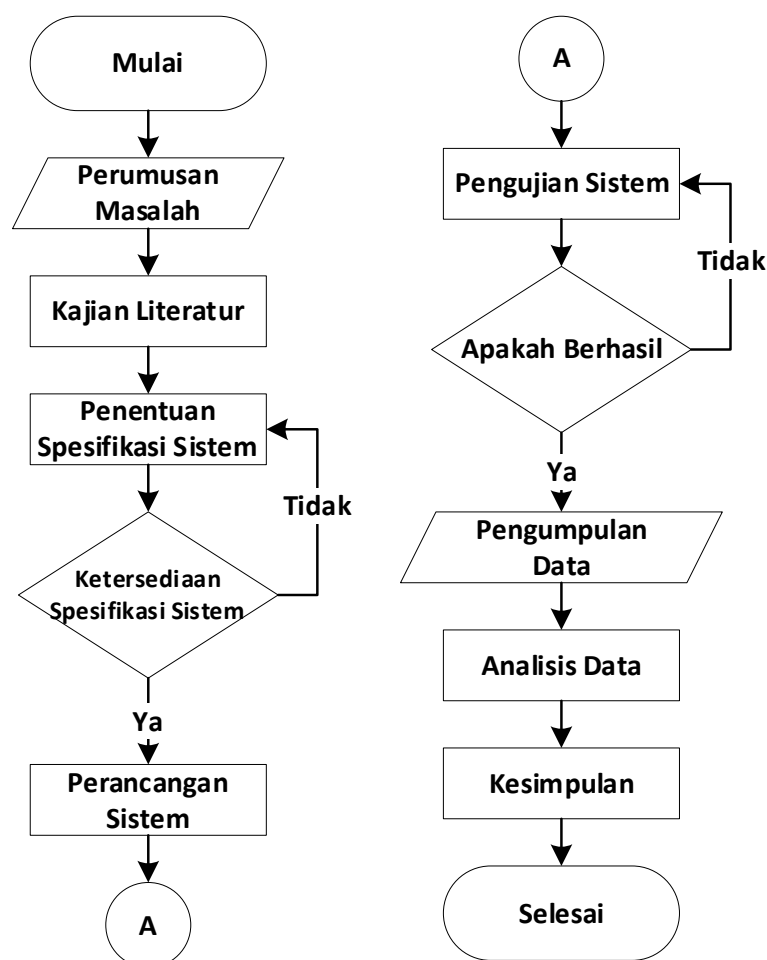
Penelitian ini didukung dengan beberapa instrumen, baik berupa perangkat keras maupun perangkat lunak. Instrumen penelitian tersebut mencakup alat dan bahan serta aplikasi yang menunjang penelitian ini. Instrumen tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Instrumen Pendukung Penelitian

No.	Alat dan Bahan	Jumlah	Keterangan
1	Kamera Flir C3-X	1 Unit	untuk menangkap citra termal
2	Multimeter Digital Hioki DT4253	1 Unit	Untuk mengukur tegangan dan hambatan
3	Amper Meter Digital Fluke	1 Unit	Untuk mengukur arus yang masuk dan keluar dari baterai
4	Resistance Meter RC5363	1 Unit	Untuk Mengukur resistansi internal baterai
5	Thermometer	1 Unit	Sebagai kalibrator
6	Baterai Litium-Ion NCR 18650B	10 Unit	Sebagai objek dalam penelitian
7	Mini Studio	1 Unit	Sebagai tempat pengambilan citra objek
8	Resistor Kapur	8 Unit	sebagai beban untuk mengosongkan kapasitas baterai

3. 3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian diawali dengan perumusan masalah yaitu mengidentifikasi permasalahan pada kesehatan baterai yang relevan untuk diteliti. Selanjutnya dilakukan kajian literatur untuk memahami konsep dan temuan dari penelitian sebelumnya. Berdasarkan kajian literatur tersebut, menjadi landasan untuk merumuskan hipotesis. Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data dengan melakukan penentuan spesifikasi sistem, perancangan sistem, dan pengujian sistem yang digunakan. Data yang telah terkumpul kemudian dilakukan analisis korelasi untuk melihat apakah terdapat korelasi antara kenaikan nilai resistansi internal baterai dan peningkatan suhu kerja baterai. Kemudian hasil analisis penelitian digunakan untuk menjawab hipotesis yang diajukan. Terakhir, kesimpulan ditarik dan rekomendasi diberikan untuk penelitian selanjutnya. Secara umum, diagram alir prosedur penelitian direpresentasikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian

3. 4. Metode yang Diusulkan

Secara keseluruhan, usulan metode dan tahapan penelitian yang dilakukan akan disajikan dalam bentuk diagram tulang ikan seperti pada Gambar 3.2.

1. Material

Persiapan material untuk mendukung pengujian dan pengambilan data pada penelitian ini yang terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut:

- Penentuan Komponen: Memilih komponen yang akan digunakan dalam penelitian seperti baterai litium ion model NCR18650B, kabel penghubung antara baterai dengan beban, resistor sebagai beban, *holder* baterai, serta boks sebagai mini studio untuk pengambilan citra baterai.
- Penentuan R Beban: Menentukan nilai resistansi beban yang digunakan disesuaikan dengan *datasheet* sebagai acuan analisis, dalam hal ini menggunakan resistor sebesar 4,54 Ω .
- Penentuan Baterai Sampel: Memilih baterai sampel yang akan diuji sesuai spesifikasi penelitian.

2. Pengukuran

Pengumpulan data dilakukan sebelum melakukan analisis yang terdiri dari:

- Mengukur Tegangan Baterai Tanpa Beban: Untuk mengetahui kondisi tegangan awal baterai yaitu 3,7 V.
- Mengukur Tegangan & Arus Baterai Saat Berbeban: Untuk mengetahui tegangan turun dan arus saat baterai terhubung ke beban yang kemudian dilakukan analisis.
- Mengukur Temperatur Lingkungan: sebagai data kalibrasi atau faktor koreksi temperatur saat melakukan analisis termal.

3. Perangkat

Menggunakan perangkat sebagai alat bantu dalam melakukan akuisisi dan pengolahan data untuk mempermudah dalam hal analisis, perangkat yang digunakan sebagai berikut:

- Kamera termal: Digunakan untuk mengambil citra visual dan citra termal saat baterai berada di mini studio.

- Komputer: digunakan untuk pemrosesan dan analisis data.
- Ms. Excel: digunakan untuk membantu mengolah data numerik dan pengumpulan data dalam bentuk tabel.
- Ms. Word: digunakan Untuk dokumentasi hasil penelitian.
- Jupyter Notebook: digunakan untuk melakukan pemrograman pengolahan citra dan analisis data berbasis bahasa pemrograman *Python*

4. Akuisisi Data

Melakukan pengumpulan data untuk dapat dilakukan proses analisis. Data-data yang dikumpulkan sebagai berikut:

- Foto Objek Setelah Terhubung Beban: Mengambil citra untuk melihat kondisi panas baterai saat aktif.
- Citra Visual: Untuk mendeteksi lokasi baterai di mini studio yang divisualkan dalam bentuk citra.
- Citra termal: Untuk mendapatkan peta sebaran temperatur lingkungan dan baterai.
- Data Tegangan dan Arus Baterai: mencatat hasil pengukuran untuk digunakan dalam analisis.

5. Pengolahan Citra

Pada proses ini sebagai langkah awal pengolahan citra untuk mendapatkan informasi yang terkandung di dalam citra hasil akuisisi data, langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

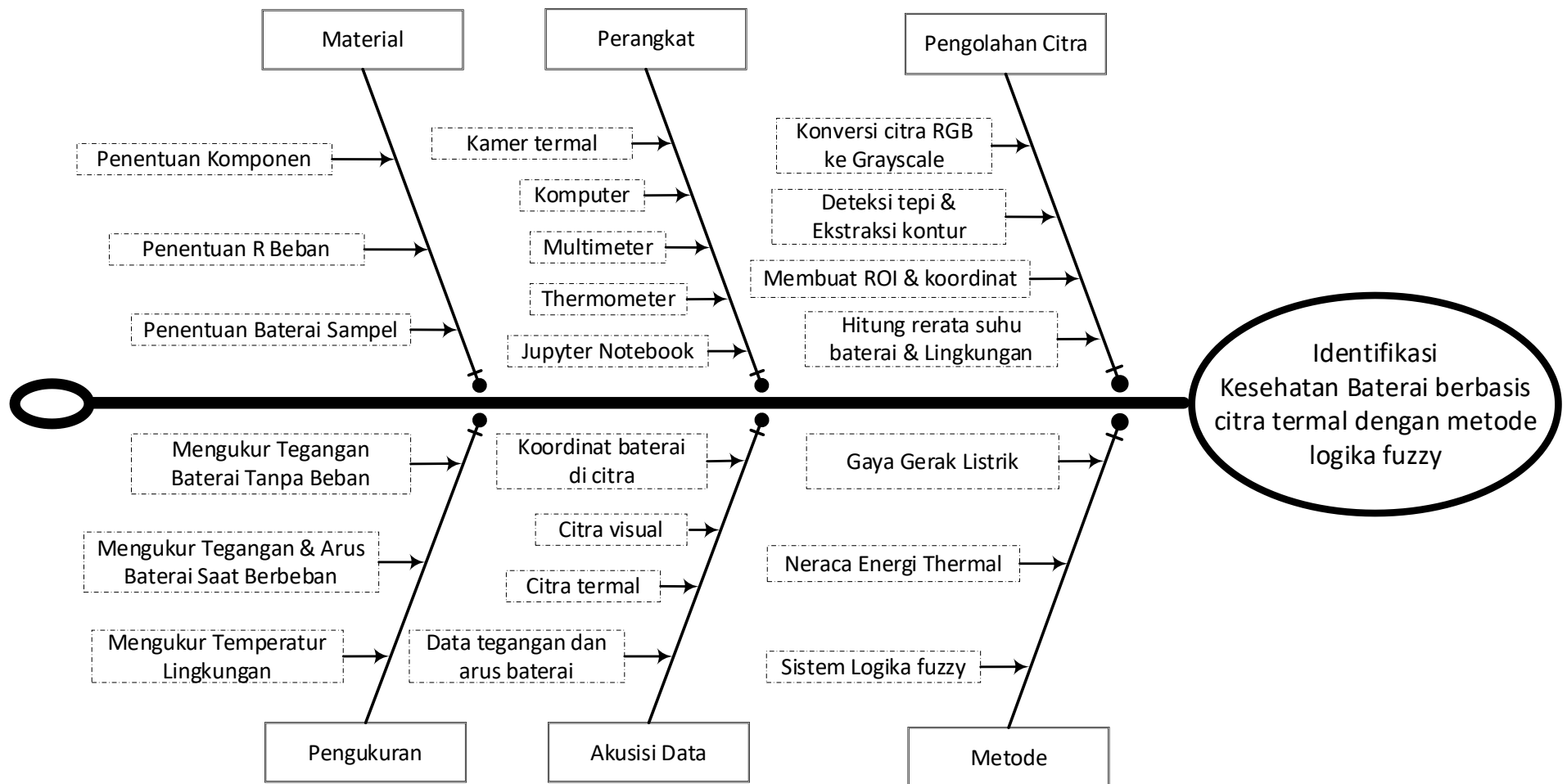
- Konversi Citra RGB ke *Grayscale*: Menyederhanakan informasi warna dari tiga kanal warna menjadi satu kanal warna untuk mempermudah proses komputasi.
- Deteksi Tepi & Ekstraksi Kontur: Menggunakan metode deteksi tepi operator *Canny* untuk mendeteksi batas-batas baterai dengan latar belakang.
- Membuat ROI dan Koordinat: Menentukan lokasi baterai di citra dengan *Region of Interest* berdasarkan hasil proses kontur citra.

- Hitung rerata Intensitas Baterai & Lingkungan: Menghitung rata-rata intensitas warna dari baterai dan lingkungan untuk mengestimasi temperatur pada citra.

6. Metode

Metode yang digunakan untuk menganalisis data untuk mendapatkan hasil kondisi Kesehatan baterai, metode yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Gaya Gerak Listrik (EMF): digunakan untuk menghitung resistansi internal baterai berdasarkan hubungan tegangan baterai tanpa beban dan terhubung ke beban serta arus yang mengalir ke beban.
- Neraca Energi (Laju Perpindahan Panas): Menghitung panas yang dilepaskan dari baterai ke lingkungan untuk mendapatkan energi panas murni yang dihasilkan baterai.
- Interpolasi Linier: digunakan untuk mengonversi nilai intensitas warna menjadi nilai suhu berdasarkan referensi palet warna pada citra termal.
- Sistem Logika *Fuzzy*: Menggunakan logika *fuzzy* untuk mengidentifikasi kondisi kesehatan baterai dari hasil analisis temperatur dan resistansi internal.



Gambar 3.2 Tulang Ikan Tahapan Penelitian

3. 5. Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Dalam penelitian ini, perangkat keras dan perangkat lunak memiliki peranan penting untuk mendukung akuisisi data, pengolahan citra dan analisis data. Perangkat keras terdiri dari beberapa perangkat yang dapat membantu dalam melakukan pengukuran baterai dan menangkap citra baterai. Berikut merupakan perangkat keras yang digunakan:

1. Multimeter

Multimeter digunakan untuk mengukur tegangan baterai pada kondisi tanpa beban atau saat terhubung beban. Alat ini membantu dalam mendapatkan data awal sebagai data set dan memverifikasi kondisi baterai sebelum dilakukan pengujian.

2. Ampere Meter

Ampere meter digunakan untuk mengukur arus yang mengalir saat baterai diberikan beban. Pengukuran arus berguna untuk menghitung resistansi internal baterai berdasarkan hubungan antara tegangan, arus, dan beban dipakai.

3. Mini Studio Pengujian Baterai

Mini Studio Pengujian berfungsi sebagai penghubung baterai ke beban dan tempat untuk menempatkan baterai selama pengujian berlangsung, serta memastikan setiap baterai pada posisi yang tepat dan aman selama proses pengukuran tegangan, arus, dan saat menangkap citra visual dan termal.

4. Kamera Flir C3-X

Kamera FLIR C3-X digunakan untuk menangkap citra termal dari baterai yang sedang diuji. Kamera ini mampu mendeteksi distribusi suhu pada permukaan baterai dan lingkungan yang menjadi parameter dalam analisis perpindahan panas untuk mendapatkan nilai resistansi internal baterai.

5. Komputer

Komputer digunakan untuk menjalankan perangkat lunak seperti Jupiter Notebook, ms. Exel, ms word, yang mendukung proses pengolahan citra

visual dan termal, melakukan segmentasi objek, dan menganalisis data yang diperoleh dari

Perangkat lunak digunakan untuk pengolahan citra, menganalisis data, dan menampilkan informasi kondisi baterai. Perangkat lunak yang digunakan meliputi

1. Jupyter Notebook

Jupyter Notebook adalah framework interaktif yang digunakan untuk menulis dan menjalankan kode pemrograman Python. Perangkat lunak ini mendukung berbagai pustaka seperti OpenCV, NumPy, dan Matplotlib untuk melakukan segmentasi objek, analisis suhu, serta visualisasi data.

2. Microsoft Excel

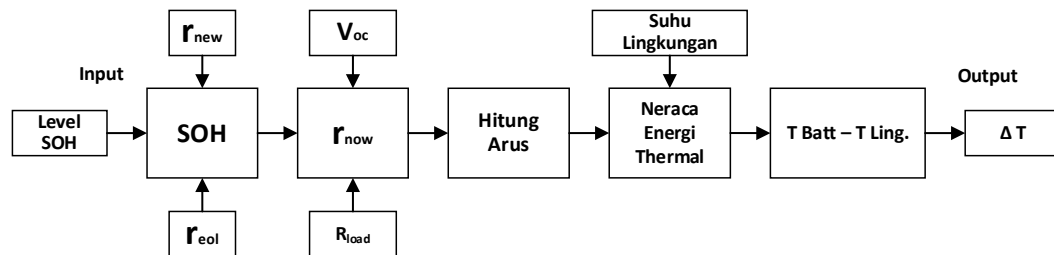
Microsoft Excel digunakan untuk mengolah dan menganalisis data hasil pengukuran, seperti nilai tegangan, arus, serta hasil perhitungan resistansi internal baterai.

3. 6. Prosedur Pengujian

Proses pengujian sampel dilakukan secara sistematis untuk mendapatkan data yang akurat dan dapat dianalisis dengan baik. Langkah awal adalah membuat data set seperti yang disajikan pada Gambar 3.3 dan dicatat pada Tabel 3.2. Tegangan V_{oc} baterai adalah 3,7 V dan resistor beban yang digunakan sebesar $4,54 \Omega$. Selanjutnya menghitung nilai resistansi internal pada sampel baterai baru (r_{new}) dan nilai resistansi internal maksimal (r_{eol}) menggunakan Persamaan (2.1). Tahap perancangan data set adalah sebagai berikut:

1. Menghitung perkiraan nilai SOH terhadap kapasitas maksimal baterai menggunakan Persamaan (2.2), untuk rentang level 0 – 100 % dengan kelipatan 10 %. Hasil perhitungan dicatat pada kolom C.
2. Setelah nilai r_{new} dan r_{eol} diketahui, kemudian menghitung nilai r_{now} pada setiap tingkat nilai SOH dengan Persamaan (2.3). Hasil perhitungan dicatat pada kolom r.
3. Kemudian menghitung nilai arus untuk setiap tingkat nilai SOH menggunakan Persamaan (2.1).
4. Menghitung tegangan jatuh (V_{load}) pada beban R dengan menggunakan hukum ohm.

5. Menghitung nilai perkiraan suhu baterai menggunakan Persamaan (2.8) dengan suhu lingkungan 27 °C. Kemudian menghitung selisih suhu baterai dengan suhu lingkungan.



Gambar 3.3 Diagram blok perancangan data set

Tabel 3.2 Perancangan data set

No.	VOC	V _{load}	% SOH	C	R	I	V _{drop}	r	T. Batt	ΔT
1	3.7	3.68	100	3350	4.62	0.80	0.02	0.025	27.12	0.12
2	3.7									
...	3.7									

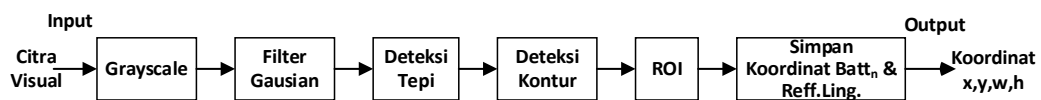
Selanjutnya, pengukuran suhu ruang di dalam mini studio dan memastikan suhu di dalam mini studio stabil terhadap suhu lingkungan. Suhu yang konsisten diperlukan untuk menghindari fluktuasi yang dapat mempengaruhi hasil pengambilan citra termal. Berikutnya memosisikan kamera tegak lurus terhadap baterai sehingga setiap citra yang ditangkap memiliki sudut pandang yang seragam.

3. 7. Prosedur Pengolahan Citra

Proses pengolahan citra pada penelitian ini melibatkan 2 jenis citra yaitu citra visual dan citra termal. Kedua citra ini memiliki ukuran piksel yang sama yaitu 640x480.

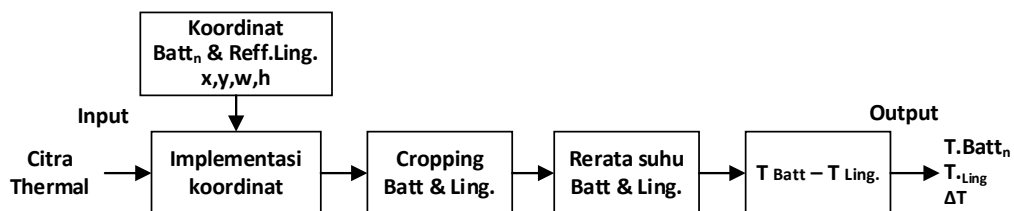
1. Citra visual digunakan untuk mendeteksi lokasi baterai dan area lingkungan pada citra yang kemudian menjadi referensi dalam pengolahan citra termal. Langkah awal dalam pengolahan citra visual adalah mengubah kanal warna RGB pada citra visual menjadi kanal warna *grayscale*. Selanjutnya, dilakukan pembersihan derau menggunakan filter *gaussian* yang bertujuan untuk

menghaluskan citra dan mengurangi *noise* yang dapat mempengaruhi deteksi tepi. Kemudian, melakukan deteksi tepi menggunakan operator *Canny* untuk mengidentifikasi batas tepi baterai berdasarkan ambang batas intensitas yang ditentukan. Selanjutnya, dilakukan deteksi kontur berdasarkan hasil dari deteksi tepi, dengan menerapkan batasan maksimum luas area yang dikategorikan baterai. Kemudian hasil deteksi kontur digunakan sebagai referensi membuat *Region of Interest* (ROI) untuk mempermudah proses analisis selanjutnya. Luaran dari proses ini adalah koordinat lokasi baterai dan lingkungan yang terdeteksi dengan format nilai horizontal (x), vertikal (y), lebar (w) dan tinggi (h). Secara umum pengolahan citra visual ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram blok pengolahan citra visual

2. Citra termal digunakan untuk memperoleh informasi suhu lingkungan dan suhu rata-rata pada setiap baterai yang terdeteksi pada proses pengolahan citra visual. Secara garis besar tahapan ini ditunjukkan pada Gambar 3.5. Proses diawali dengan mengekstraksi citra termal untuk mendapatkan informasi suhu dengan bantuan pustaka *flir extractor*. Kemudian mengimplementasikan koordinat baterai dan lingkungan yang diperoleh dari pengolahan citra visual digunakan untuk menggambarkan ROI dan melakukan pemotongan citra baterai sesuai ROI untuk dilakukan analisis pada area baterai dan lingkungan. Berikutnya, menghitung nilai rata-rata suhu setiap baterai dan lingkungan. Luaran proses ini berupa nilai suhu baterai, suhu lingkungan serta selisih keduanya, yang kemudian menjadi parameter dalam sistem logika *fuzzy*.



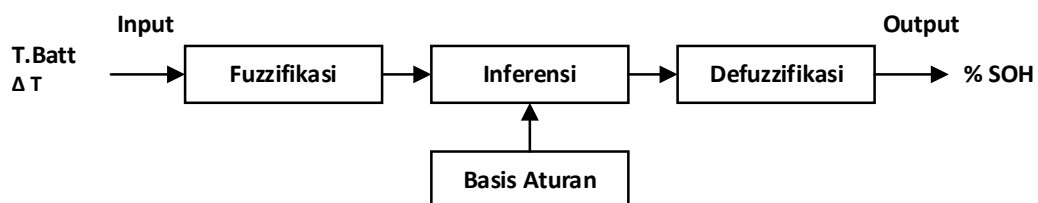
Gambar 3.5 Diagram blok pengolahan citra termal

3. 8. Perancangan Logika Fuzzy

Perancangan logika *fuzzy* pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6, proses diawali dengan *input* berupa nilai suhu baterai dan selisih antara suhu baterai dan suhu lingkungan (ΔT) yang menjadi parameter pada variabel *input* untuk dilakukan fuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, nilai-nilai *crisp* dari suhu baterai dan ΔT diubah menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dan trapesium. Masing-masing variabel *input* dibagi ke dalam tiga himpunan *fuzzy*, yaitu rendah, sedang, dan tinggi untuk suhu, dan kecil, cukup, dan besar untuk ΔT . Sedangkan variabel *output*, yaitu Status of Health (SOH) baterai terdiri dari tiga himpunan *fuzzy*: rusak, waspada, dan normal.

Setelah proses fuzzifikasi, dilakukan penyusunan aturan *fuzzy* yang mendeskripsikan hubungan antara variabel *input* terhadap variabel *output*, berdasarkan data set yang diperoleh. Dalam sistem *fuzzy* Tsukamoto, setiap aturan menghasilkan *output* yang berupa himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan tegas.

Proses selanjutnya adalah *inferensi* menggunakan metode Tsukamoto, di mana untuk setiap aturan *fuzzy* yang aktif, dihitung nilai α -predikat sebagai derajat kebenaran aturan *fuzzy*, lalu digunakan untuk memperoleh *output crisp* (z) dari setiap aturan. Nilai *crisp* dari semua aturan kemudian dikombinasikan menggunakan metode rata-rata terbobot untuk menghasilkan *output* akhir yaitu nilai SOH dalam bentuk *crisp*.



Gambar 3.6 Diagram blok sistem logika *fuzzy*

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis terhadap citra termal baterai litium ion yang telah diklasifikasikan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini telah berhasil mengklasifikasikan kondisi kesehatan baterai litium ion dengan metode logika *fuzzy* berdasarkan pada parameter suhu lingkungan dan suhu operasional baterai litium ion dengan luaran berupa prediksi nilai persentase SOH, sehingga mampu mengklasifikasikan kesehatan baterai dalam tiga kategori yaitu Sehat ($\text{SOH} \geq 80\%$), Waspada ($60\% \leq \text{SOH} < 80\%$), dan Tidak Sehat ($\text{SOH} < 60\%$). Dari 50 data citra termal yang diperoleh, sistem *fuzzy* berhasil memprediksi dengan benar kondisi kesehatan baterai sesuai tiga kategori yang ditentukan yaitu 21 untuk sehat, 6 untuk waspada dan 15 untuk tidak sehat.
2. Evaluasi sistem dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi kondisi baterai terhadap data kondisi baterai aktual menggunakan confusion matriks. Hasil evaluasi menunjukkan Tingkat akurasi secara menyeluruh sebesar 84%. Pada evaluasi tingkat presisi sistem menghasilkan nilai untuk tiap kategori adalah sehat 84%, waspada 75%, dan tidak sehat 93,75%. Pada evaluasi sensitivitas untuk tiap kategori adalah sehat 91,30%, waspada 54,55% dan tidak sehat 93,75%. Hasil evaluasi terbaik pada tingkat presisi dan sensitivitas pada kategori sehat dan tidak sehat, hal menunjukkan bahwa logika *fuzzy* cukup efektif dalam memprediksi kondisi yang kontras dari baterai. Namun, kurang baik pada kategori Waspada menunjukkan bahwa sistem sering gagal memprediksi kesehatan baterai, hal ini menandakan

adanya kelemahan dalam mengenali kondisi menengah yang cenderung memiliki degradasi suhu bertahap.

5.2.Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan yang hadapi pada penelitian ini terdapat beberapa saran yang memungkinkan menjadi acuan dalam melakukan pengembangan penelitian selanjutnya, di antaranya :

1. Melakukan pengembangan pada aturan dan fungsi keanggotaan *fuzzy*, terutama pada rentang kategori waspada. Hal ini mencakup nilai ambang batas antar kategori baterai agar memperhalus proses transisi, memperluas area tumpang tindih antar himpunan *fuzzy*.
2. Melakukan pengkondisian suhu awal baterai terhadap suhu ruang, untuk menghindari perbedaan yang kontras antara suhu baterai dan suhu lingkungan. Hal ini dapat dilakukan dengan menyimpan baterai dalam waktu tertentu agar terjadinya keseimbangan suhu.
3. Memperkaya data set terutama saat kondisi arus dinamis dan perubahan resistansi internal selama waktu pengujian yang berubah berdasarkan besaran arus yang mengalir pada setiap kategori kesehatan baterai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Studi, T. Listrik, P. N. Ketapang, J. Rangga, dan S. D. Ketapang, "Rancang Bangun Sepeda Listrik Self Charging Dengan Memanfaatkan Motor Dc Sebagai Alternator," vol. 03, no. 01, hlm. 7–12, 2024, doi: 10.58466/entries.
- [2] M. Uitz *dkk.*, "Aging of Tesla's 18650 Lithium-Ion Cells: Correlating Solid-Electrolyte-Interphase Evolution with Fading in Capacity and Power," *J Electrochem Soc*, vol. 164, no. 14, hlm. A3503–A3510, 2017, doi: 10.1149/2.0171714jes.
- [3] A. W. Purnadi, "Perancangan Smart Charger Untuk Meghindari Overheat Pada Baterai Lithium-Ion," *Jurnal Repositor*, vol. 3, no. 1, hlm. 143–154, 2020, doi: 10.22219/repositor.v3i1.1104.
- [4] Z. B. Omariba, L. Zhang, H. Kang, dan D. Sun, "Parameter identification and state estimation of lithium-ion batteries for electric vehicles with vibration and temperature dynamics," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, no. 3, Sep 2020, doi: 10.3390/WEVJ11030050.
- [5] C. R. Birkl, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, dan D. A. Howey, "Degradation diagnostics for lithium ion cells," *J Power Sources*, vol. 341, hlm. 373–386, Feb 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [6] P. M. Attia *dkk.*, "Review—'Knees' in Lithium-Ion Battery Aging Trajectories," *J Electrochem Soc*, vol. 169, no. 6, hlm. 060517, Jun 2022, doi: 10.1149/1945-7111/ac6d13.
- [7] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, dan M. Wohlfahrt-Mehrens, "Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries - A Post-Mortem study," *J Power Sources*, vol. 262, hlm. 129–135, Sep 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.03.112.

- [8] J. Zhang dan J. Lee, “A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery,” 1 Agustus 2011. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.101.
- [9] L. Chen, Z. Lü, W. Lin, J. Li, dan H. Pan, “A new state-of-health estimation method for lithium-ion batteries through the intrinsic relationship between ohmic internal resistance and capacity,” *Measurement (Lond)*, vol. 116, hlm. 586–595, Feb 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.016.
- [10] Y. Jiang, J. Zhang, L. Xia, dan Y. Liu, “State of Health Estimation for Lithium-Ion Battery Using Empirical Degradation and Error Compensation Models,” *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 123858–123868, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3005229.
- [11] A. Kurniawan, “Analisis Laju Perpindahan Panas pada Baterai Ion Lithium 18650 terhadap Beban Keluarannya dengan Metode Numerik,” *Journal of Mechanical Design and Testing*, vol. 2, no. 2, hlm. 87–102, 2020, doi: 10.22146/jmdt.v2i2.53752.
- [12] T. Muthia, S. R. Sulistiyanti, F. X. Arinto S, A. Yudamson, S. Purwiyanti, dan H. Fitriawan, “Egg Characteristic Identification System Using Thermal Imaging Camera Based on Image Processing,” *ISESD 2022 - 2022 International Symposium on Electronics and Smart Devices, Proceeding*, 2022, doi: 10.1109/ISESD56103.2022.9980794.
- [13] C. N. Van dan D. T. Quang, “Estimation of SoH and internal resistances of Lithium ion battery based on LSTM network,” *Int J Electrochem Sci*, vol. 18, no. 6, 2023, doi: 10.1016/J.IJOES.2023.100166.
- [14] M. Miao, J. Yu, P. Yang, S. Yue, dan R. Zhou, “Battery health monitoring system,” *2023 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, vol. 9, no. 20, hlm. 0–1, 2023.
- [15] admin, “How do batteries store and discharge electricity,” *Scientific American*. Diakses: 9 Oktober 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.scientificamerican.com/article/how-do-batteries-store-an/>
- [16] F. A. Perdana, “Baterai Lithium,” *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*, vol. 9, no. 2, hlm. 113, Apr 2021, doi: 10.20961/inkuiri.v9i2.50082.

- [17] S. R. Hadi, D. M. Ridho, dan M. Hadi, "Estimation of Lithium-Ion Battery Health in Electric Bicycles Using Internal Resistance Measurement Method," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. Vol. 16 No, no. 1, hlm. 50–55, 2021.
- [18] S. J. An, J. Li, C. Daniel, D. Mohanty, S. Nagpure, dan D. L. Wood, "The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling," 1 Agustus 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.carbon.2016.04.008.
- [19] M. F. Ge, Y. Liu, X. Jiang, dan J. Liu, "A review on state of health estimations and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries," *Measurement (Lond)*, vol. 174, no. January, hlm. 109057, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109057.
- [20] M. Arrinda dkk., "Application dependent end-of-life threshold definition methodology for batteries in electric vehicles," *Batteries*, vol. 7, no. 1, hlm. 1–20, 2021, doi: 10.3390/batteries7010012.
- [21] M. Etxandi-Santolaya, L. Canals Casals, dan C. Corchero, "Extending the electric vehicle battery first life: Performance beyond the current end of life threshold," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, hlm. e26066, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26066.
- [22] Y. Kobayashi, H. Miyashiro, K. Kumai, K. Takei, T. Iwahori, dan I. Uchida, "Precise Electrochemical Calorimetry of LiCoO_2 /Graphite Lithium-Ion Cell," *J Electrochem Soc*, vol. 149, no. 8, hlm. A978, 2002, doi: 10.1149/1.1487833.
- [23] M. Sarifuddin, *Pengolahan Citra & Video Digital*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 2015. [Daring]. Tersedia pada: www.erlangga.co.id
- [24] M. Rinaldi, *Pengolahan Citra Digital dengan Pendekatan Algoritmik*, Pertama. Bandung: Informatika Bandung, 2004.
- [25] F. X. A. Setyawan dan S. R. Sulistiyanti, "Extraction of Moving Objects on Underwater Video Using Method of Subtraction the Background Modeling Results," *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 11, 2017.
- [26] M. Huang, Y. Liu, dan Y. Yang, "Edge detection of ore and rock on the surface of explosion pile based on improved Canny operator," *Alexandria*

- Engineering Journal*, vol. 61, no. 12, hlm. 10769–10777, Des 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.04.019.
- [27] D. Sundani, S. Widiyanto, Y. Karyanti, dan D. T. Wardani, “Identification of image edge using quantum canny edge detection algorithm,” *Journal of ICT Research and Applications*, vol. 13, no. 2, hlm. 133–144, 2019, doi: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2019.13.2.4.
- [28] P. T. Rahayuningsih dan A. M. Abadi, “Penerapan Model Fuzzy Dengan Metode Table Look-Up Scheme Untuk Memprediksi Indeks Harga Saham Gabungan,” *Prosiding Seminar Nasional Matematika dan Pendidikan Matematika 2011*, 2011, [Daring]. Tersedia pada: <http://eprints.uny.ac.id/id/eprint/7319>
- [29] S. Kusumadewi, S. Hartati, A. Harjoko, dan R. Danwardoyo, *Fuzzy Multi – Attribute Decision Making (FUZZY MADM)*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.