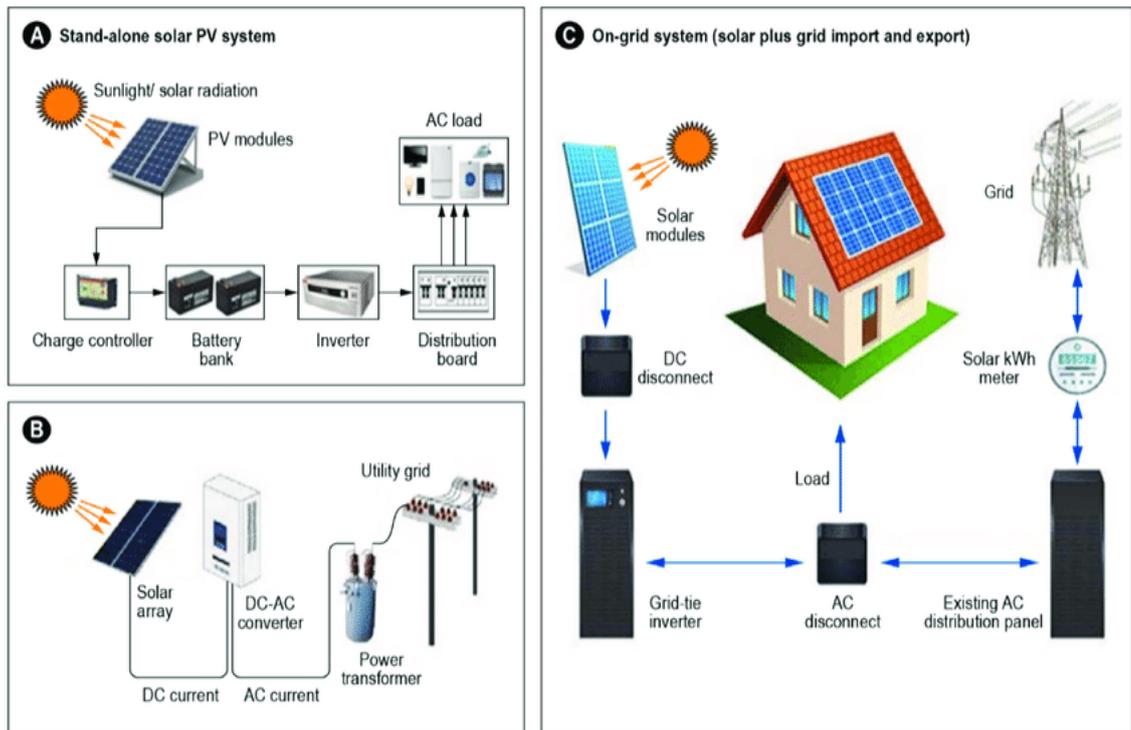


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem PV

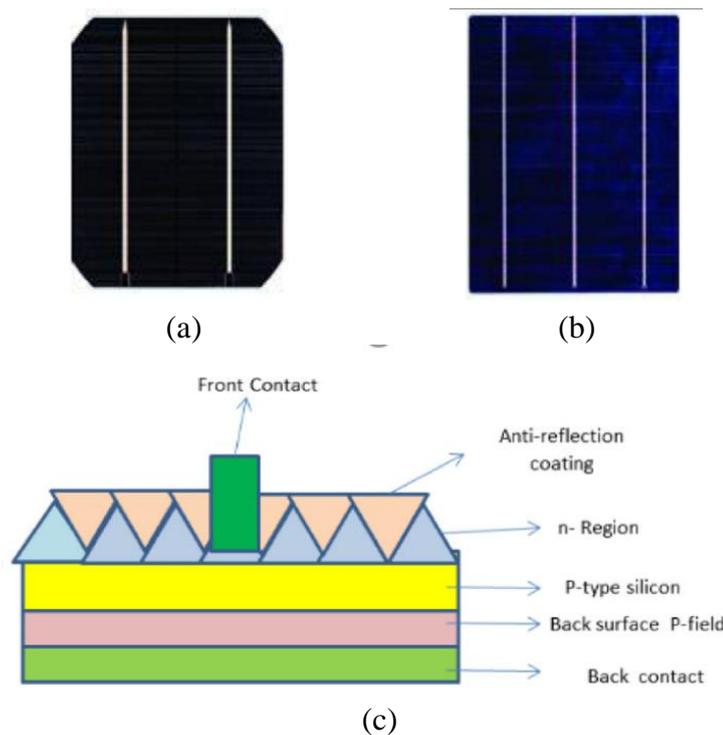
Komponen-komponen yang mendukung pembangkitan listrik, diantaranya *photovoltaic* (PV) yaitu kumpulan modul surya yang terbuat dari bahan semikonduktor yaitu silicon. Panel surya dapat mengubah energi matahari menjadi listrik. Selain itu, PLTS juga mencakup beberapa komponen utama yaitu, modul surya sebagai generator, inverter yang mengubah sistem tegangan Direct Current (DC) menjadi sistem tegangan Alternating Current (AC) dan pengontrol pengisi daya yang mempertahankan status pengisian.

Sistem photovoltaic (PV) dapat diklasifikasikan dalam tiga jenis utama berdasarkan konfigurasi dan mode pengoperasiannya. Arsitektur stand-alone solar PV system merupakan sistem PV yang bekerja secara independen tanpa terhubung ke jaringan listrik, biasanya digunakan di lokasi terpencil yang tidak memiliki akses ke jaringan listrik utama. Arsitektur standalone/off grid PV system juga tidak terhubung ke jaringan listrik utama, namun sering kali dilengkapi dengan penyimpanan energi seperti baterai untuk menyediakan daya secara berkelanjutan saat tidak ada sinar matahari. Arsitektur OnGrid system adalah sistem yang terhubung langsung ke jaringan listrik utama, memungkinkan impor dan ekspor energi antara sistem PV dan grid, yang memungkinkan pengguna untuk mengirimkan energi berlebih ke jaringan atau mengambil energi dari grid saat produksi energi PV tidak mencukupi [31–33], terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Arsitektur Sistem PV
 (a) Stand-alone solar (b) Standalone/off grid (c) OnGrid [29]

Panel *fotovoltaic* adalah salah satu semikonduktor perangkat yang berfungsi sebagai alat untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik, merupakan sumber energi terbarukan. Konversi ini terjadi pada sel PV sebagai lapisan tipis silikon murni dan bahan semikonduktor lainnya. Jika bahan memperoleh energi foton, elektron akan dilepaskan dari ikatan atomnya sebagai elektron yang bergerak bebas, dan pada akhirnya akan dipancarkan tegangan DC. Sekelompok sel *fotovoltaic* yang dihubungkan secara seri atau paralel atau kombinasi seri dan paralel membentuk modul PV terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Modul PV

(a): *Mono-crystalline*; (b): *Polycrystalline*; (c): *Cross Sectional view of crystalline* [32]

Berdasarkan tipe dan struktur lapisan atom penyusunnya, solar cell atau modul *photovoltaic* (PV) dapat dibedakan menjadi tiga tipe utama. *Monokristal* (*mono-crystalline*) merupakan tipe PV module yang memiliki efisiensi tinggi, yakni antara 14%-17% per satuan luas modul. Modul ini sangat efisien, namun kelemahannya adalah tidak dapat berfungsi dengan baik di lokasi yang kurang terpapar sinar matahari. Polikristal (*poly-crystalline*), di sisi lain, memiliki lapisan kristal acak karena proses pembuatan yang menggunakan pengecoran, yang menghasilkan efisiensi yang lebih rendah, yaitu sekitar 12%-14%. Meskipun demikian, modul polikristal lebih murah dibandingkan monokristal. Sedangkan Amorphous adalah tipe PV module yang terbuat dari bahan non-kristalin, dengan efisiensi yang lebih rendah, hanya sekitar 4%-6%. Modul ini memiliki struktur yang lebih fleksibel dan harga yang relatif lebih murah, namun efisiensinya lebih rendah dibandingkan tipe lainnya [33], [34].

2.2. Decision Support System

Decision Support System (DSS) memiliki beberapa karakteristik yang membedakannya dengan sistem lainnya. DSS memberikan dukungan dalam pengambilan keputusan di area semi-terstruktur dan tidak terstruktur dengan menggabungkan penilaian pengguna dan informasi terkomputerisasi. Sistem ini mendukung berbagai level manajerial, mulai dari eksekutif puncak hingga manajer tingkat bawah. DSS berfungsi dalam seluruh proses pengambilan keputusan, termasuk inteligensia, desain, pemilihan, dan penerapan keputusan. Selain itu, DSS juga memungkinkan pengambilan keputusan yang saling berhubungan, mendukung variasi dalam cara pengambilan keputusan, dan beradaptasi dengan perubahan waktu. Sistem ini dirancang untuk mudah digunakan, sehingga pengguna dapat merasa nyaman saat berinteraksi dengannya. DSS meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan, dengan hasil yang lebih cepat dan dapat diandalkan, meskipun lebih fokus pada kualitas daripada efisiensi biaya. Pengambil keputusan dapat mengontrol setiap proses pengambilan keputusan, dan DSS lebih berfungsi untuk mendukung, bukan menggantikan, pembuat keputusan. DSS memungkinkan pengguna untuk membangun dan memodifikasi sistem dengan mudah dan menggunakan model untuk analisis situasi pengambil keputusan, serta mengakses berbagai sumber data dengan berbagai format dan tipe [4], [35].

Manfaat utama DSS antara lain adalah memperluas kemampuan pengambilan keputusan dalam memproses data, membantu membuat keputusan lebih objektif dan efektif dalam menyelesaikan masalah kompleks, serta menghasilkan solusi yang lebih cepat. Meskipun demikian, DSS juga memiliki keterbatasan, seperti terbatasnya kemampuan berdasarkan pengetahuan dan model yang dimilikinya serta bergantung pada perangkat lunak yang digunakan. DSS memiliki beberapa komponen utama, yaitu: subsistem pengolahan data yang mengelola data relevan dalam database sistem; subsistem pengolahan model yang menggunakan teknik analisis dan strategi pemecahan masalah, termasuk pendekatan matematika, penelusuran buta, dan penelusuran heuristik; subsistem

pengelolaan pengetahuan yang penting dalam mengelola data dan pengetahuan untuk menyelesaikan masalah; subsistem dialog antarmuka yang menyediakan interaksi antara pengguna dan sistem; serta pengguna yang berinteraksi dengan sistem melalui antarmuka untuk memberi perintah atau memanipulasi data [36], [37].

Decision support system juga mempunyai komponen-komponen sub sistem yang menjadi ciri dan karakteristik khusus [40–42]. Sub sistem atau komponen yang dimaksud adalah sebagai berikut:

a. Subsystem pengolahan data (*data management subsystem*)

Pengelolaan data adalah merupakan kumpulan data yang saling berhubungan yang tersimpan dalam database sistem, data yang relevan dengan situasi masalah yang ingin diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak komputer. Pengelolaan data disebut sebagai DBMS (*Database Management Sistem*) yang meliputi sumber data internal, sumber data eksternal dan data personal yang dimiliki oleh satu atau banyak pemakai. Data internal diperoleh dari sistem proses transaksi perusahaan atau organisasi, sedangkan data eksternal diperoleh dari luar organisasi misalnya data pemerintah, data sensus dan lain sebagainya.

b. Subsystem pengolahan model (*model management subsystem*)

Pengelolaan model terdiri atas sekumpulan program atau prosedur untuk teknik analisis dan berbagai strategi penyelesaian masalah. Model tersebut menggunakan beberapa pendekatan teknik penelusuran, antara lain penelusuran analisis, penelusuran buta dan penelusuran heuristic.

Penelusuran analisis menggunakan pendekatan matematika yang sifatnya pasti, namun pendekatan ini sangat terbatas dalam menyelesaikan masalah bersifat kualitatif. Penelusuran secara buta tidak dianjurkan karena tidak terstruktur dan hanya mengandalkan penelusuran sekenanya saja. Salah satu contoh penelusuran buta adalah penelusuran dengan teknik coba-coba atas *trial and error*. Apabila ditemukan suatu solusi, maka solusi tersebut diambil menjadi solusi terbaik,

walaupun sebenarnya masih ada solusi yang lebih baik yang tidak ditemukan pada saat penelusuran.

Pendekatan terakhir adalah pendekatan yang paling sering digunakan yaitu heuristic karena pendekatan ini mengacu pada bagaimana suatu masalah harus diselesaikan. Pendekatan heuristic mencoba melakukan penelusuran secara terstruktur dan berulang – ulang samapi ditemukannya suatu solusi yang optimal atau minimal solusi yang mendekati solusi terbaik.

c. Subsistem pengelolaan pengetahuan (*knowledge management subsystem*)

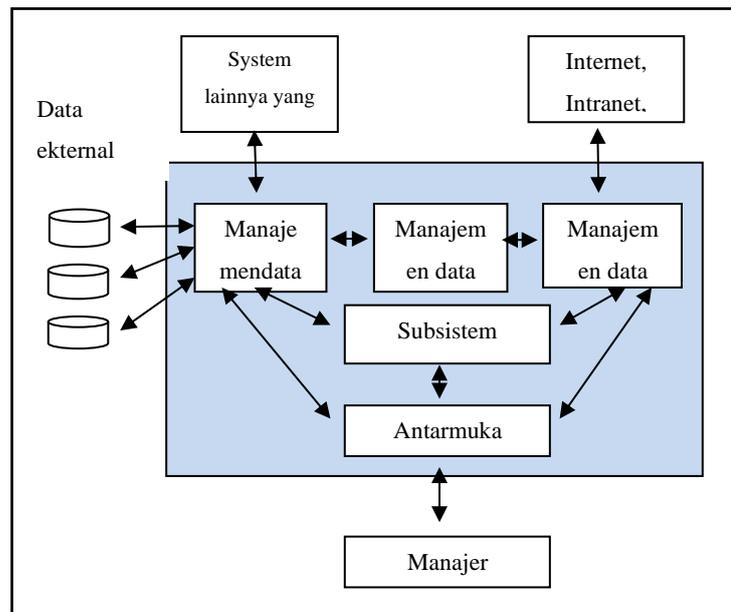
Pengelolaan pengetahuan merupakan bagian terpenting dalam pengelolaan database dengan DBMS. Pengelolaan pengetahuan umumnya menyediakan sarana untuk menyelesaikan berbagai aspek masalah yang ingin dipecahkan, misalnya sistem yang terintegrasi di dalamnya tersedia sarana penambahan data, penjelasan sistem, navigasi data dan seterusnya.

d. Subsistem dialog antarmuka (*user interface subsystem*)

Pengolahan dialog dari *decision support system* adalah perangkat lunak dan perangkat keras yang menyediakan sarana interaksi antara user dan sistem. Dalam membangun dialog harus diperhatikan faktor kemudahan akses, kemampuan sistem dalam memberikan bantuan dan penjelasan, tampilan dan bentuk grafis dan lain sebagainya. Tujuan pembangunan dialog adalah membantu mengarahkan penelusuran masalah sampai ditemukannya keputusan.

e. Pengguna (*user*)

Subsistem antar muka pengguna adalah fasilitas yang mampu mengintegrasikan sistem terpasang dengan pengguna secara interaktif. Melalui sistem dialog inilah sistem diartikulasikan, sehingga pengguna dapat berkomunikasi dengan sistem yang dirancang atau pemakai dapat berkomunikasi dengan *decision support system* dan memerintah *decision support system* melalui sistem ini. Komponen-komponen *decision support system* , dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skematik *decision support system*

2.3. Internet of Things

Monitoring adalah proses pemantauan suatu objek yang dikendalikan dari jarak jauh melalui infrastruktur jaringan yang ada, yang membuka peluang untuk mengintegrasikan perangkat fisik dengan sistem komputer. Pemantauan besaran listrik, seperti tegangan, arus, daya, dan faktor daya, umumnya dilakukan dengan memasang sensor pada panel listrik sebelum energi masuk ke beban. Salah satu teknologi yang sangat sesuai untuk proses pemantauan ini adalah *Internet of Things* (IoT), sebuah konsep yang memperluas konektivitas dengan memanfaatkan jaringan internet. Sistem pemantauan dapat dibagi menjadi dua kategori utama: terpusat dan terdesentralisasi. Kedua konfigurasi ini bertujuan untuk memantau data meteorologi dan kelistrikan guna mengontrol dan mengawasi instalasi. Pada instalasi *photovoltaic* (PV) besar, pemantauan dilakukan untuk memeriksa efisiensi dan ketersediaan, serta mendeteksi kondisi kesalahan atau efisiensi yang rendah. Namun, untuk sistem PV perumahan kecil, solusi pemantauan dan deteksi kesalahan yang hemat biaya masih belum banyak diterapkan [41].

2.3.1. Baterai

Baterai adalah perangkat yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dengan mengubah energi kimia menjadi energi listrik, yang memiliki terminal positif (katoda) dan terminal negatif (anoda) serta elektrolit yang berperan sebagai penghantar. Arus listrik yang dihasilkan oleh baterai berupa arus DC (direct current). Berdasarkan proses kerjanya, baterai dibagi menjadi dua jenis, yaitu: Baterai primer, yang hanya dapat digunakan sekali dan tidak dapat diisi ulang, karena material elektroda tidak dapat kembali ke posisi semula setelah dilepas, dan Baterai sekunder, yang dapat diisi ulang dengan proses kimia yang dapat berlangsung dua arah (reversible), sehingga bahan aktif dalam baterai dapat kembali ke kondisi semula setelah pengisian. Baterai sekunder ini terdiri dari beberapa jenis, antara lain Baterai Ion Litium (Li-ion atau LIB), Baterai Lithium Polymer (Li-Po), Baterai Lead Acid (Accu), dan Baterai Nickel-Metal Hydride atau Ni-MH [42], [43].

2.3.2. Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk mengubah tegangan DC (Direct Current) menjadi tegangan AC (Alternating Current). Output dari inverter dapat berupa tegangan AC dengan berbagai bentuk gelombang, seperti gelombang sinus (sine wave), gelombang kotak (square wave), dan sinus modifikasi (modified sine wave). Sumber tegangan input inverter bisa berasal dari baterai, tenaga surya, atau sumber tegangan DC lainnya. Dalam proses konversi dari tegangan DC ke tegangan AC, inverter memerlukan penaik tegangan yang disebut step-up transformer untuk meningkatkan tegangan sesuai dengan kebutuhan sistem [44], [45].

2.3.3. Solar Charge Controller

Solar Charge Controller adalah perangkat elektronik yang digunakan dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya untuk melindungi baterai dengan cara mencegah arus balik ke modul surya, melindungi terhadap terjadinya hubung

singkat pada beban listrik, serta mengatur arus DC yang mengalir ke baterai dan arus yang menuju ke beban dari baterai. Dengan fungsi ini, solar charge controller memastikan agar baterai tidak mengalami overcharging dan overvoltage, yang dapat mempercepat kerusakan pada baterai. Terdapat dua jenis utama dari solar charge controller, yaitu PWM (Pulse Width Modulation) dan MPPT (Maximum Power Point Tracking) [46].

PWM (Pulse Width Modulation) adalah teknik modulasi yang mengubah lebar pulsa dengan nilai frekuensi dan amplitudo yang tetap. PWM bekerja dengan menghasilkan sinyal analog dari perangkat digital dan berfungsi untuk mengatur pengisian baterai dengan memodulasi lebar pulsa dari sinyal pengisian sesuai kebutuhan, yang lebih sederhana namun lebih efisien pada kondisi tertentu [47].

MPPT (Maximum Power Point Tracking) digunakan untuk mengekstrak energi maksimum dari panel photovoltaic dengan cara menyesuaikan tegangan dan arus secara dinamis sesuai dengan kondisi cahaya dan suhu. MPPT memungkinkan sistem untuk menyimpan kelebihan daya yang dihasilkan oleh panel surya yang tidak digunakan oleh beban ke dalam baterai dan dapat mengambil daya dari baterai jika kebutuhan beban lebih besar dari yang dihasilkan oleh panel surya, memastikan efisiensi optimal dalam pengisian baterai dan penggunaan energi [48].

2.3.1. Sensor Tegangan

Sensor tegangan dalam sistem ini menggunakan transformator tegangan untuk menurunkan tegangan dari 220 Volt AC menjadi 5 Volt AC. Setelah itu, tegangan AC ini diarahkan (di-rectify) menggunakan jembatan diode untuk mengubahnya menjadi tegangan DC. Proses ini kemudian dilanjutkan dengan penyaringan menggunakan kapasitor untuk menghilangkan komponen AC yang tersisa, menghasilkan tegangan DC yang lebih stabil. Selanjutnya, tegangan yang dihasilkan melalui proses penyaringan ini masuk ke dalam kerangkaian pembagi tegangan, yang bertugas untuk merendahkan tegangan hingga tidak lebih dari 5 Volt DC. Tegangan 5 Volt DC inilah yang kemudian menjadi input untuk mikrokontroler, yang digunakan untuk memproses data dan mengontrol sistem lebih lanjut [49].

2.3.2. Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang menuju permukaan bumi melalui atmosfer mengalami beberapa proses, seperti penyerapan (absorpsi), pemantulan, hamburan, dan pemancaran kembali (reradiasi). Intensitas radiasi matahari sangat mempengaruhi energi yang dihasilkan oleh sistem photovoltaic (PV). Semakin tinggi intensitas radiasi matahari yang mengenai sel photovoltaic, semakin besar daya listrik yang dapat dihasilkan. Untuk mengukur intensitas radiasi matahari, digunakan berbagai jenis sensor seperti LDR (Light Dependent Resistor), photodiode, dan phototransistor. Di antara sensor-sensor tersebut, phototransistor memiliki area pengukuran yang lebih besar, memberikan cakupan yang lebih luas dibandingkan LDR dan photodiode. Selain itu, sensor BH1750 memiliki range pengukuran yang hampir sama dengan phototransistor dan memiliki keunggulan berupa kompatibilitas yang tinggi dengan Arduino, sehingga memudahkan penggunaannya. Sensor BH1750 ini juga lebih akurat dan lebih mudah digunakan karena data yang diukur sudah dalam bentuk digital, berbeda dengan sensor lain seperti fotodiode dan LDR yang menghasilkan sinyal analog dan memerlukan perhitungan tambahan untuk memperoleh data intensitas radiasi matahari [50].

2.3.1. Sensor Arus

Sensor arus digunakan untuk memantau penggunaan arus listrik dan memberikan nilai analog, sehingga memungkinkan pengontrolan penggunaan tenaga listrik. Dua jenis sensor yang dapat digunakan untuk mengukur arus listrik adalah sensor ACS712 dan sensor SCT-013. Sensor ACS712 memiliki akurasi yang lebih tinggi, linearitas yang lebih baik, serta dipasok dengan 5V DC. Tegangan output sensor ini adalah 4.5V dan memerlukan lebih sedikit rangkaian untuk pengolahan data. Di sisi lain, sensor arus SCT-013 adalah sensor yang mengukur arus listrik secara non-invasif menggunakan prinsip split core current transformer. Sensor ini tidak mempengaruhi rangkaian elektronika yang diukur, karena pengukuran dilakukan tanpa kontak elektrik langsung melalui cara "penjepitan" atau clamping kabel. Cara kerja sensor ini melibatkan induksi pada coil yang mendeteksi perubahan medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang mengalir di

konduktor. Dengan mengukur jumlah arus yang dibangkitkan oleh coil, sensor ini dapat menghitung arus yang melewati konduktor tersebut. Perbedaan utama antara kedua sensor ini adalah pada cara instalasinya: ACS712 memerlukan pemotongan kabel dan penyambungannya ke kedua terminal sensor, sedangkan SCT-013 hanya perlu mengaitkan kabel tanpa memotongnya [51], [52].

2.3.2. Suhu

Suhu adalah ukuran panas dinginnya suatu benda, yang biasanya diukur menggunakan alat ukur termometer, seperti termometer Celsius, Reamur, dan Fahrenheit. Di antara ketiga jenis termometer tersebut, termometer Celsius adalah yang paling umum digunakan, baik dalam bentuk analog maupun digital. Sensor suhu LM35 adalah komponen elektronika yang mengubah besaran suhu menjadi besaran listrik dalam bentuk tegangan. Sensor ini diproduksi oleh National Semiconductor dan dikenal memiliki akurasi tinggi serta kemudahan dalam perancangan jika dibandingkan dengan sensor suhu lainnya. LM35 memiliki keluaran impedansi rendah dan linieritas tinggi, yang memungkinkan sensor ini dengan mudah dihubungkan dengan rangkaian kendali tanpa memerlukan pengaturan lanjutan untuk aplikasi pengukuran suhu dalam berbagai sistem [53], [54].

2.4. Photovoltaic Fault Detection

Fault detection merupakan aspek penting dalam menjaga performa sistem photovoltaic (PV) karena dapat mempengaruhi efisiensi dan keandalan operasional sistem. Setiap jenis fault yang terjadi dalam sistem PV memiliki karakteristik yang berbeda, yang dapat dilihat pada perubahan pola antara input dan output sistem, seperti tegangan dan arus. Pemantauan yang efektif dapat mendeteksi masalah sejak dini sebelum menyebabkan kerusakan yang lebih besar atau penurunan efisiensi sistem. Di antaranya, fault yang sering terjadi pada sistem PV adalah *Open Circuit* (OC), *Short Circuit* (SC), *Partial Shading* (PSh), dan *degradation*. Masing-masing jenis *fault* ini memiliki dampak yang berbeda terhadap kinerja panel surya dan komponen lainnya dalam sistem [14]

Proses *fault detection* dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu lingkungan dan sistem PV itu sendiri. Faktor lingkungan seperti suhu, radiasi matahari, dan kelembapan dapat mempengaruhi kinerja sistem PV dan berpotensi menyebabkan terjadinya fault, seperti partial shading, di mana sebagian panel surya terhalang oleh objek atau kotoran, sehingga mengurangi produksi daya. Sementara itu, faktor sistem PV meliputi kualitas dan kondisi komponen seperti panel surya, inverter, dan baterai. Open Circuit (OC) dan *Short Circuit* (SC) biasanya terjadi karena masalah pada sambungan atau kabel, sementara degradation merujuk pada penurunan efisiensi panel surya seiring waktu [55].

2.5. Multiple Linear Regression

Analisis regresi adalah metode statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara satu atau lebih variabel *independen* (X) dan variabel *dependen* (Y). Dalam konteks deteksi kesalahan pada sistem *photovoltaic* (PV), *Multiple Linear Regression* (MLR) sering digunakan untuk menilai bagaimana berbagai variabel independen mempengaruhi kinerja sistem atau indikator kesalahan [27]. Persamaan umum untuk MLR dapat menggunakan Persamaan (2.1).

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (2.1)$$

nilai koefisien regresi

$$\begin{aligned} \sum y_i &= n \cdot b_0 + b_1 \sum x_{i1} + b_2 \sum x_{i2} + \dots + b_k \sum x_{ik} \\ \sum x_{i1}y_i &= b_0 \sum x_{i1} + b_1 \sum x_{i1}^2 + b_2 \sum x_{i1}x_{i2} \dots + b_k \sum x_{i1}x_{ik} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\sum x_{ik}y_i = b_0 \sum x_{ik} + b_1 \sum x_{ik}x_{i1} + b_2 \sum x_{i1}x_{i2} \dots + b_k \sum x_{ik}^2$$

Matriks X dan Y

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_n & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

metode kuadrat terkecil, β (2.4)

$$\beta = (X'X)^{-1}X^{-1}y$$

$$\begin{aligned} &\text{koefisien regresi } \beta \\ y' &= X\beta \end{aligned} \tag{2.5}$$

data historis terukur dari berbagai parameter, y adalah nilai y yang diramalkan dan selisih keduanya adalah kesalahan dalam peramalan. Setelah mengumpulkan matriks variabel independen masa depan X , variabel independen yang diramalkan y dihitung:

$$y_f = X_f\beta \tag{2.6}$$

Dalam persamaan ini, Y mewakili variabel *dependen*, seperti output sistem atau indikator kesalahan, sementara X_1, X_2, \dots, X_n mewakili variabel *independen*, yang dapat mencakup faktor-faktor seperti suhu panel, radiasi matahari, kecepatan angin, dan parameter operasional lainnya yang mempengaruhi kinerja sistem. Variabel b_0 adalah *intercept*, yang mewakili nilai konstan, sementara koefisien b_1, b_2, \dots, b_n menunjukkan kekuatan dan arah hubungan antara masing-masing variabel independen dan variabel dependen [27].

2.6. Fuzzy Logic

Dalam deteksi kesalahan pada sistem photovoltaic, setelah semua proposisi dievaluasi, keluaran terdiri dari himpunan fuzzy yang mewakili kontribusi setiap aturan terhadap keputusan akhir. Keluaran ini biasanya diekspresikan dan direpresentasikan secara matematis dalam Persamaan (2.7).

$$\mu(x_i) = (\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \tag{2.7}$$

Nilai $\mu_{sf}(x_i)$ menunjukkan nilai keanggotaan dari solusi *fuzzy* hingga aturan ke- i , yang mengindikasikan sejauh mana kondisi tertentu sesuai dengan aturan fuzzy yang telah didefinisikan untuk evaluasi kinerja sistem. Nilai ini mencerminkan sejauh mana kondisi input tertentu cocok dengan himpunan *fuzzy* yang ditentukan dalam basis aturan, menggambarkan tingkat kesesuaian antara variabel input dan kondisi pada aturan tersebut. Sementara itu, $\mu_{kf}(x_i)$ menunjukkan nilai keanggotaan dari konsekuen *fuzzy* hingga aturan i -th, yang mencerminkan sejauh

mana respons atau keluaran sistem dipengaruhi oleh aturan yang diberikan. Nilai ini menunjukkan seberapa kuat konsekuensi aturan (output atau keputusan) diterapkan berdasarkan keanggotaan input, yang mempengaruhi keluaran akhir dari sistem inferensi *fuzzy* [56].

Input untuk proses defuzzifikasi dalam deteksi kesalahan photovoltaic adalah himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan *fuzzy*, sementara outputnya adalah nilai numerik yang tegas yang memberikan penilaian pasti terhadap kinerja sistem photovoltaic. Dengan himpunan fuzzy dalam rentang tertentu, output tegas dapat ditentukan menggunakan metode defuzzifikasi. Ketika beberapa aturan berkontribusi pada proses pengambilan keputusan, defuzzifikasi dilakukan dengan menghitung titik pusat (metode *Center of Gravity (CoG)*) untuk menentukan nilai output yang paling representatif. Pendekatan ini membantu dalam mendeteksi kesalahan dengan akurat pada panel photovoltaic, inverter, dan variasi output daya dengan mengubah evaluasi berbasis logika fuzzy menjadi diagnosis sistem yang tepat. Keputusan akhir yang tegas dapat diperoleh dengan menggunakan defuzzifikasi berbasis *Center of Gravity (CoG)*, yang memungkinkan identifikasi kesalahan secara proaktif dan optimisasi pembangkit energi photovoltaic [57].

2.7. Penelitian Terkait

Pengembangan *decision support system* untuk *fault detection photovoltaic* pada wilayah desa terpencil, dilakukan studi literatur tentang monitoring dengan menggunakan komponen IoT (*Internet of Things*) dan pengembangan *decision support system* untuk *fault detection photovoltaic*. Penelitian terkait yang telah dikumpulkan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian terkait DSS untuk *fault detection* pada sistem PV

Author	Judul	Metode	Hasil	Sumber
López-vargas, Ascensión Fuentes, Manuel	IoT Application for Real-Time Monitoring of Solar Home	Monitoring dan data logger pada photovoltaic rumah	Penelitian ini melakukan monitoring arus, tegangan, radiasi matahari dan suhu	[58]

Vivar, Marta (2019)	Systems Based on Arduino TM with 3G Connectivity		pada phovoltaic menggunakan Ardunino Uno sebagai mikrokontroler. Platform IoT (<i>Internet of Things</i>) menggunakan <i>ThingSpeak</i> web page.	
Pereira, Renata I.S. Dupont, Ivonne M. Carvalho, Paulo C.M. Jucá, Sandro C.S. (2018)	IoT embedded linux system based on Raspberry Pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant	Monitoring real-time pada renewable energy dengan Rasberry PI	Penelitian ini malakukan monitoring arus, tegangan, radiasi matahari dan suhu pada <i>phovoltaic</i> dengan meggunakan mikrokontroler PIC18Fxx5x, wireless Raspberry. Platform IoT (<i>Internet of Things</i>) menggunakan web page	[59]
Paredes-Parra, José Miguel García-Sánchez, Antonio Javier Mateo-Aroca, Antonio Molina-García, Ángel (2019)	An alternative internet-of-things solution based on Lora for PV power plants: Data monitoring and management	Data monitoring dan management pada photovoltaic dengan LoRa	Penelitian ini melakukan monitoring arus DC, tegangan DC, daya DC dan Radiasi matahari, menggunakan Ardunio Uno, wireless RFM95W LoRa dengan platform web page.	[17]
Sarswat, Shailesh Yadav, Indresh Maurya, Sanjay Kumar (2019)	Real Time Monitoring of Solar PV Parameter Using IoT	Teknologi IoT berbasis metodologi baru untuk mendeteksi kondisi operasi yang uniform (seragam)	Penelitian ini melakukan monitoring arus PV, tegangan PV, daya PV dan Radiasi matahari, menggunakan Ardunio Uno Node MCU ESP8266	[60]

		dan non-uniform (tidak seragam) untuk jaringan yang terhubung ke grid	dengan platform ThingsSpeak. PV diletakkan di <i>Rooftop</i> (atap)	
Nassir Rouibah, Linda Barazane, Mohamed Benghanem, Adel Mellit (2020)	IoT based low cost prototype for online monitoring of maximum output power of domestic photovoltaic systems	Monitoring Online local photovoltaic sistem	Penelitian ini melakukan monitoring arus PV, tegangan PV, tegangan beban, arus beban, daya dan radiasi matahari menggunakan Arduino Mega wireless ESP8266. Web page sebagai platform IoT	[61]
Li, Y. F. Lin, P. J. Zhou, H. F. Chen, Z. C. Wu, L. J. Cheng, S. Y. Su, F. P (2017).	On-line monitoring system of PV array based on internet of things technology	Extreme Learning Machine (ELM)	Penelitian ini melakukan monitoring radiasi matahari, suhu, arus PV dan tegangan, menggunakan mikrokontroler ZigBee, GPS modul sebagai penentuan kordinat dan Raspberry PI3. Private webpage yang dapat menampilkan grafik untuk fault diagnosis dan dapat mengirimkan melalui email dengan akurasi 97,5%.	[20]
Lin, Y. F., et al (2017)	An Intelligent Fault Diagnosis Approach for PV Array	Radial Basis Function-Extreme Learning	Penelitian ini menggunakan artificial intelligen (AI) untuk mengklasifikasikan	[21]

	Based on SA-RBF Kernel Extreme Learning Machine	Machine (RBF-ELM)	PV yang terhubung paralel dengan simulasi aplikasi Matlab untuk fault detection SC (short-circuit), PSh (Partial Shading) dan usia. Pengambilan data dilakukan dengan pengukuran langsung (offline) yang menghasilkan akurasi 93,55%.	
Dhimish, Mahmoud Holmes, Violeta Mehrdadi, Bruce Dales, Mark Mather, Peter (2017)	Photovoltaic fault detection algorithm based on theoretical curves modelling and fuzzy classification system	Fuzzy Logic (FL) Knowledge-based	Penelitian ini menggunakan artificial intelligen (AI), didasarkan pada teori kurva I-V dan pengklasifikasi fuzzy dirancang untuk klasifikasi kesalahan susunan PV dengan kapasitas 1.1 kWp dengan aplikasi LabVIEW Pengambilan data dengan pengukuran langsung (offline)	[22]
Sun, Jiamin Sun, Fengjie Fan, Jieqing Liang, Yutu (2017)	Fault diagnosis model of photovoltaic array based on least squares support vector machine in Bayesian framework	Multi-class least square support vector machine LLSVM & Bayesian Supervised	Kesalahan yang dievaluasi meliputi efek hubung singkat dan bayangan, meskipun metode ini juga dapat mengevaluasi titik panas berdasarkan kurva I-V teoritis dengan tingkat klasifikasi sekitar 95,3%. Multi-class least square support vector machine	[62]

			(LSSVM) multi-kelas dalam teori Bayesian dibangun untuk mengklasifikasikan kesalahan OC, SC dan penuaan abnormal dalam array PV, disimulasikan dalam Matlab	
Chen, Zhicong Han, Fuchang Wu, Lijun Yu, Jinling Cheng, Shuying Lin, Peijie Chen, Huihuang (2018)	Random forest based intelligent fault diagnosis for PV arrays using array voltage and string currents	Random Forest (RF) Supervised	Penelitian ini penulis menggunakan algoritma Random Forest untuk mendeteksi dan mendiagnosis kesalahan, open-circuit, line-to-line, degradation and partial shading dalam susunan PV. Menggunakan rangkaian seri-paralel, secara eksperimental dengan akurasi deteksi dan klasifikasi yang sangat baik masing-masing 99,2% dan 99,1% dengan aplikasi Matlab Simulink.	[63]
Harrou, F., Taghezouit, B., & Sun, Y. (2019).	Improved k-NN-based monitoring schemes for detecting faults in PV systems	k-NN (k-Nearest Neighbours) dan Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) Supervised	Penelitian ini mengembangkan metode deteksi kesalahan dengan metode k-NN (k-Nearest Neighbours) dan Exponentially Weighted Moving Average (EWMA)	[64]

			<p>untuk membuat grafik pengendalian yang berkualitas. Parameter yang digunakan seperti I_{mpp}, V_{mpp}, P_{mpp}, G dan T digunakan sebagai input ke k-NN. Ditunjukkan bahwa k-NN berbasis EWMA mampu mendeteksi open-circuit, short-circuit dan bayangan sementara</p>	
<p>Zhao, Ye Yang, Ling Lehman, Brad De Palma, Jean François Mosesian, Jerry Lyons, Robert (2015)</p>	<p>Decision tree-based fault detection and classification in solar photovoltaic arrays</p>	<p>Monitoring dan Decision Tree (DT)</p>	<p>Penelitian ini menggunakan metode decision tree (DT) untuk deteksi kesalahan pada line to line, shading, open circuit dengan akurasi deteksi 99,98%. Penelitian ini tidak melakukan optimasi dengan data yang ada.</p>	[65]
<p>Sridharan, Naveen Venkatesh Sugumaran, Vaithiyanathan (2021)</p>	<p>Visual fault detection in photovoltaic modules using decision tree algorithms with deep learning features</p>	<p>Metode decision tree dengan algoritma deep learning perbandingan decision stump, hoeffding tree, J48, linear model tree (LMT), random forest, random tree, representative</p>	<p>Penelitian ini menggunakan metode decision tree dengan algoritma deep learning dengan menggunakan data gambar (image) dengan menggunakan pesawat tanpa awak (drone). Banyak metode yang dibandingkan seperti decision tree algorithms such as</p>	[66]

		(REP) tree, best first (BF) tree, extra tree, functional tree (FT), J48 consolidated, J48 graft, least absolute deviation (LAD) tree, naïve bayes (NB) tree and simple cart.	decision stump, hoeffding tree, J48, linear model tree (LMT), random forest, random tree, representative (REP) tree, best first (BF) tree, extra tree, functional tree (FT), J48 consolidated, J48 graft, least absolute deviation (LAD) tree, naïve bayes (NB) tree and simple cart. Semua algoritma yang digunakan random forest menghasilkan akurasi klasifikasi maksimum 98,25%.	
Roberto G. Aragon, M. Eugenia Cornejo, Jesus Medina (2022)	Decision Support System for Photovoltaic Fault Detection Avoiding Meteorological Conditions	Ordered Weighted Averaging (OWA) dan fuzzy logic	Penelitian ini mengembangkan mekanisme matematis berdasarkan himpunan fuzzy untuk mengoptimalkan produksi energi di fasilitas fotovoltaik, mendeteksi perilaku anomali dalam energi yang dihasilkan oleh fasilitas dari waktu ke waktu. Melakukan optimasi produksi energi listrik dengan menggunakan data diperoleh dari perusahaan Grupo	[67]

			Energetico de Puerto Real SA yang bertanggung jawab mengelola 6 (enam) fasilitas PV di kota Puerto Real, Cadiz, Spanyol. DSS dirancang dapat memecahkan masalah "kehilangan produksi energi secara konstan", tanpa mempertimbangkan kondisi meteorologis.	
Iulia Stamatescu, Nicoleta Arghira, Ioana Făgărașan, Grigore Stamatescu, Sergiu Stelian Iliescu and Vasile Calofi (2017)	Decision Support System for a Low Voltage Renewable Energy System	procedural decision algorithm	Penelitian ini pengembangan sistem pendukung keputusan (DSS) untuk jaringan tegangan rendah dengan sumber energi terbarukan (panel fotovoltaik dan turbin angin). yang bertujuan untuk mencapai keseimbangan energi dalam microgrid. sumber energi terbarukan (panel fotovoltaik dan turbin angin).	[68]

Lopez Vargas melakukan monitoring arus, tegangan, radiasi matahari dan suhu pada photovoltaic menggunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler. Platform IoT (*Internet of Things*) menggunakan *ThingSpeak web page*. Dua jenis penyimpanan data diuji: server khusus (metode konvensional) dan platform layanan *cloud* (aplikasi IoT). Kedua alternatif penyimpanan memungkinkan untuk

memantau sistem dari jarak jauh. Penggunaan datalogger mengatasi masalah pemantauan sistem PV yang terletak di daerah terpencil. Eksperimental yang dilakukan menggunakan modul PV yang di letakan pada *Ground Mouted* (dipasang diatas permukaan tanah)[58], tidak melakukan prediksi dan *fault detection*.

Pereira malakukan monitoring arus, tegangan, radiasi matahari dan suhu pada *phovoltaic* dengan meggunakan mikrokontroler PIC18Fxx5x, *wireless Raspberry. Platform IoT (Internet of Things)* menggunakan web page. Eksperimen yang dilakukan menggunakan modul PV sebagai input monitoring yang terhubung ke sensor seperti arus, tegangan radiasi matahari, suhu yang dikirimkan ke *Raspberry*[69]. Penelitian ini tidak melakukan prediksi dan *fault detection*, hanya monitoring dan diagnosis menggunakan grafik untuk tampilan data arus, tegangan, radiasi matahari dan suhu.

Paredes Parra melakukan monitoring arus DC, tegangan DC, daya DC dan Radiasi matahari, menggunakan Arduinio Uno, wireless RFM95W LoRa dengan *platform web page*. Penelitian menggunakan modul PV 5 WP, 22 Volt, 30 Watt. Sistem dirancang tujuan untuk solusi penginderaan, pemantauan, dan transmisi paket data dalam skenario IoT. Modul PV dipasang pada *Rooftop* (atap) Universidad Politecnica de Cartagena, Spain dan melakukan analisis untuk pemetaan peta pembangkit listrik PV masalah propagasi [70], Tidak melakukan prediksi dan prediksi dan *fault detection*.

Sarswat melakukan monitoring arus PV, tegangan PV, daya PV dan Radiasi matahari, menggunakan Arduinio Uno Node MCU ESP8266 dengan *platform Things Speak*, menggunakan modul PV diletkan di *Rooftop* (atap). Aplikasi IoT dirancang pada perangkat lunak *Android App Studio* yang mampu memantau arus tegangan dan suhu serta daya [60], tidak melakukan prediksi dan *fault detection*, penelitian berskala laboratorium.

Nassir Rouibah melakukan monitoring arus PV, tegangan PV, tegangan beban, arus beban, daya dan radiasi matahari menggunakan Arduino Mega *wireless ESP8266. Web page* sebagai platform IoT. Prototipe yang dirancang cocok untuk

aplikasi PV domestik, khususnya di lokasi terpencil. penelitian disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink dan kemudian diimplementasikan dalam mikrokontroler[71]. Sistem pemantauan yang dikembangkan dapat diperluas dengan mengintegrasikan deteksi kesalahan dan algoritma diagnosis.

Li melakukan monitoring radiasi matahari, suhu, arus PV dan tegangan, menggunakan mikrokontroler ZigBee, GPS modul sebagai penentuan kordinat dan Rasberry PI3. *Private webpage* yang dapat menampilkan grafik untuk *fault diagnosis* dan dapat mengirimkan melalui email dengan akurasi 97,5%. Pembangkit listrik PV laboratorium dengan susunan *array* PV dari dari tiga *string* PV secara paralel dan setiap *string* terdiri dari enam modul PV secara seri, tidak dirincikan kapasitas PV yang monitoring dan sistem PV dipasang pada *Rooftop* (atap). Sensor radiasi dipasang di sudut yang sama dari susunan PV untuk memastikan akurasi perolehan radiasi. Sensor suhu diikatkan pada bagian belakang modul PV untuk mengukur suhu. Modul akuisisi data mengumpulkan tegangan dan arus *array* PV. Menggunakan metode Extreme Learning Machine (ELM) untuk *fault diagnosis* pada kondisi kesalahan *Partial Shading* (PSh), *Open Circuit* (OC) dan *Short Circuit* (SC), dan kondisi normal[72]. Lin, Y. F., menggunakan artificial intelligen (AI) dengan metode Radial Basis Function-Extreme Learning Machine (RBF-ELM) untuk mengklasifikasikan PV yang terhubung paralel dengan simulasi aplikasi Matlab untuk fault detection SC (short-circuit), PSh (Partial Shading) dan usia. Pengambilan data dilakukan dengan pengukuran langsung (offline) yang menghasilkan akurasi 93,55% [73].

Dhimish melakukan penelitian menggunakan *artificial intelligence* (AI), didasarkan pada teori kurva I–V dan pengklasifikasi fuzzy dirancang untuk klasifikasi kesalahan susunan PV dengan kapasitas 1.1 kWp dengan aplikasi LabVIEW Pengambilan data dengan pengukuran langsung (offline)[22]. Sun melakukan penelitian tentang kesalahan yang dievaluasi meliputi efek hubung singkat dan bayangan, meskipun metode ini juga dapat mengevaluasi titik panas berdasarkan kurva I–V teoritis dengan tingkat klasifikasi sekitar 95,3%. Menggunakan metode *Multi-Class Least Square Support Vector Machine*

(LSSVM) multi-kelas dalam teori *Bayesian* dibangun untuk mengklasifikasikan kesalahan OC, SC dan penuaan abnormal dalam array PV, disimulasikan dalam Matlab[22]. PV sistem dipasangan *Rooftop* (atap).

Chen melakukan penelitian menggunakan algoritma *Random Forest* untuk mendeteksi dan mendiagnosis kesalahan, *open-circuit*, *line-to-line*, *degradation and partial shading* dalam susunan PV. Menggunakan rangkaian seri-paralel, secara eksperimental dengan akurasi deteksi dan klasifikasi yang sangat baik masing-masing 99,2% dan 99,1% dengan aplikasi Matlab Simulink[74]. Harrou mengembangkan metode deteksi kesalahan dengan metode k-NN (*k-Nearest Neighbours*) dan *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) untuk membuat grafik pengendalian yang berkualitas. Parameter yang digunakan seperti I_{mpp} , V_{mpp} , P_{mpp} , G dan T digunakan sebagai input ke k-NN. Ditunjukkan bahwa k-NN berbasis EWMA mampu mendeteksi *open-circuit*, *short-circuit* dan bayangan sementara[75]. Zhao menggunakan *metode decision tree* (DT) untuk deteksi kesalahan pada *line to line*, *shading*, *open circuit* dengan akurasi deteksi 99,98%[76]. Penelitian ini tidak melakukan optimasi dengan data yang ada. Sridharan menggunakan metode *decision tree* dengan algoritma deep learning dengan menggunakan data gambar (image) dengan menggunakan pesawat tanpa awak (drone). Banyak metode yang di bandingkan seperti *decision tree algorithms such as decision stump*, *hoeffding tree*, J48, *linear model tree* (LMT), *random forest*, *random tree*, *representative* (REP) *tree*, *best first* (BF) *tree*, *extra tree*, *functional tree* (FT), J48 *consolidated*, J48 *graft*, *least absolute deviation* (LAD) *tree*, *naïve bayes* (NB) *tree and simple cart*. Semua algoritma yang digunakan random forest menghasilkan akurasi klasifikasi maksimum 98,25% [66].

Roberto mengembangkan mekanisme matematis berdasarkan himpunan *fuzzy* untuk mengoptimalkan produksi energi di fasilitas fotovoltaik, mendeteksi perilaku anomali dalam energi yang dihasilkan oleh PV dari waktu ke waktu. Melakukan optimasi produksi energi listrik dengan menggunakan data diperoleh dari perusahaan Grupo Energetico de Puerto Real SA yang bertanggung jawab mengelola 6 (enam) fasilitas PV di kota Puerto Real, Cadiz, Spanyol. DSS

dirancang dapat memecahkan masalah "kehilangan produksi energi secara konstan"[24], tanpa mempertimbangkan kondisi meteorologis. Iulia Stamatescu pengembangan sistem pendukung keputusan (DSS) untuk jaringan tegangan rendah dengan sumber energi terbarukan (panel fotovoltaik dan turbin angin). yang bertujuan untuk mencapai keseimbangan energi dalam microgrid dengan sumber energi terbarukan (panel fotovoltaik dan turbin angin)[77].

Beberapa penelitian terdahulu dapat terlihat pada **Error! Reference source not found.** menunjukkan telah banyak penelitian yang dilakukan dalam monitoring sistem PV dan modul PV dengan variabel arus, tegangan, radiasi matahari dan suhu[58][59][17][60][61] tetapi masih sedikit yang menggabungkan monitoring sistem PV dengan melakukan prediksi, diagnosis dengan implementasi DSS fault detection. Beberapa penelitian melakukan diagnosis dan prediksi dengan menggunakan metode *artificial intelligence* (AI) seperti *Extreme Learning Machine* (ELM), *Radial Basis Function-Extreme Learning Machine* (RBF-ELM), *Fuzzy Logic* (FL) *Knowledge-based*, *Multi-class least square support vector machine* LLSVM & *Bayesian Supervised*, *Random Forest* (RF) *Supervised*, *k-NN* (*k-Nearest Neighbours*) dan *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) *Supervised*, Metode *decision tree* dengan algoritma deep learning perbandingan *decision stump*, *hoeffiding tree*, *J48*, *linear model tree* (LMT), *random forest*, *random tree*, *representative* (REP) *tree*, *best first* (BF) *tree*, *extra tree*, *functional tree* (FT), *J48 consolidated*, *J48 graft*, *least absolute deviation* (LAD) *tree*, *naïve bayes* (NB) *tree and simple cart* [20][22][63][65], dengan menggunakan aplikasi simulasi *LabVIEW* dan *Matlab Simulink*, terlihat pada Gambar 2.. Penelitian disertasi ini menggunakan dua parameter monitoring yaitu parameter lingkungan seperti intensitas matahari, suhu, hujan dan kecepatan angin. Parameter sistem PV seperti arus, tegangan, daya dan suhu dengan pengguna sensor. DSS dirancang memiliki 4 fungsi seperti monitoring, diagnosis, prediksi dan DSS *fault detection*, dengan pasangan PV array *hybrid* dengan *Rooftop* (atap) dan *floating* (diatas air).