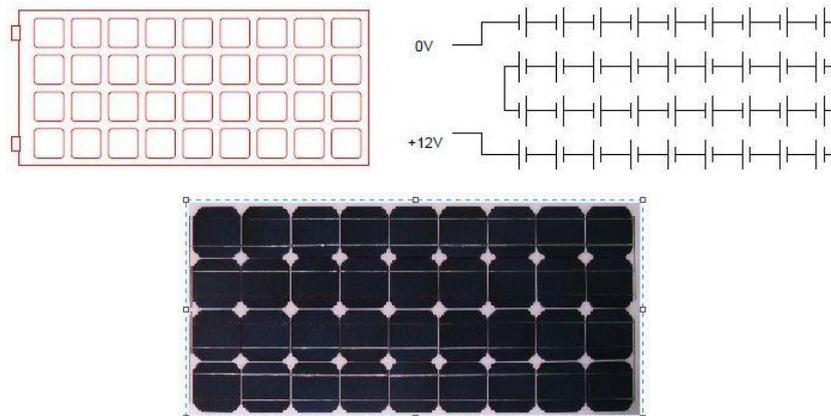


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

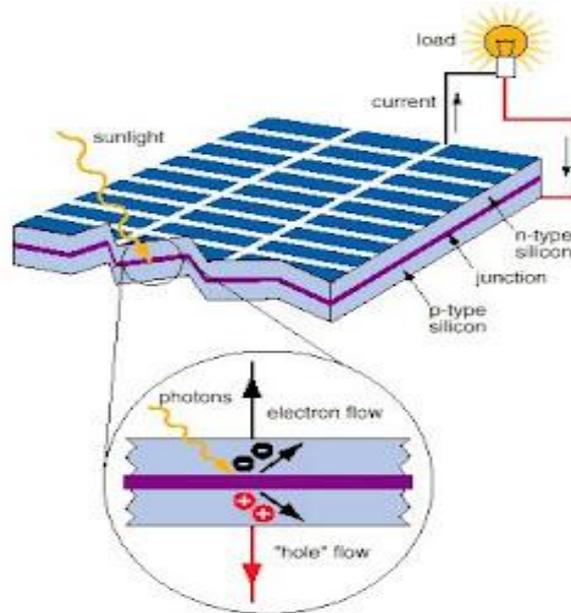
### 2.1 *Photovoltaic*

Panel surya adalah perangkat yang dirancang untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Juga dikenal sebagai modul *photovoltaik*, panel surya terdiri dari sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor seperti silicon. Proses konversi energi pada panel surya terjadi Ketika cahaya matahari mengenai sel surya yang mana akan direspon oleh elektron, kemudian electron yang terlepas dari ikatan atom akan menghasilkan arus listrik yang dapat dikumpulkan dan digunakan sebagai sumber energi.[12]

Sel surya memiliki lapisan-lapisan silicon yang bersifat semikonduktor, metal, lapisan anti reflektif, dan strip konduktor metal. Lapisan-lapisan inilah yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik, dan semakin banyak sel surya yang tersusun pada panel surya maka semakin banyak energi listrik yang dapat dihasilkan oleh panel surya. Untuk energi yang dihasilkan oleh satu sel sel surya menghasilkan 0.5 sampai 1 *volt*. Didalam modul surya biasanya terdiri dari 28-36 sel surya yang dimana sel surya tersebut disusun secara seri untuk mendapatkan tegangan DC sebesar 12 *Volt*. Dibawah ini merupakan gambaran untuk struktur rangkaian seri pada sebuah modul surya.



**Gambar 2.1** Struktur Rangkaian Seri Pada Modul Surya



**Gambar 2.2** Cara Kerja Panel Surya

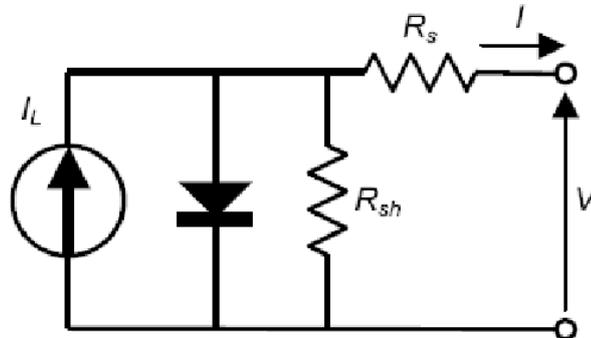
Gambar 2.2 diatas merupakan cara kerja panel surya dalam mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Untuk menghasilkan listrik sel surya menggunakan prinsip *p-n junction*, dimana *p-n junction* ini terletak didaerah yang diapit oleh daerah semikonduktor tipe-p dan tipe-n dimana daerah *p-n junction* akan menghasilkan energi yang menyebabkan elektron dan *hole* bergerak berlawanan arah. Elektron bergerak mendekati daerah positif dan *hole* bergerak mendekati daerah negative.

Cahaya matahari memiliki partikel sangat kecil yang disebut dengan foton, Dimana partikel foton dari cahaya matahari menghantam atom semikonduktor silicon sel surya yang menghasilkan energi yang besar sehingga dapat memisahkan electron dari struktur atomnya. Elektron bermuatan negative yang terpisah tersebut akan bergerak menuju daerah pita konduksi. Atom yang kehilangan elektron tersebut mengalami kekosongan, kekosongan tersebut dinamakan "*Hole*" elektron bermuatan positif.

Pada struktur dasar sel surya terdapat daerah semikonduktor tipe-N dan semikonduktor tipe-P. Daerah semikonduktor tipe-N adalah daerah dengan elektron bebas yang bersifat negatif dan sebagai pendonor elektron, dan daerah semikonduktor tipe-P adalah sebagai penerima elektron.

Pada garis yang diapit oleh daerah semikonduktor tipe-N dan tipe-P, akan

menghasilkan energi yang menyebabkan elektron dan *Hole* bergerak berlawanan arah. Elektron bergerak mendekati daerah positif dan *Hole* bergerak mendekati daerah negatif.



**Gambar 2.3** Rangkaian Ekivalen *Photovoltaic*

*Photovoltaic* memiliki rangkaian ekivalen seperti pada gambar 2.3 untuk memahami karakteristik *photovoltaic* yang digunakan dan pemodelan matematis yang diperlukan untuk mengetahui parameter arus dan tegangan *photovoltaic* dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :  $I_L$  = Arus yang dihasilkan oleh cahaya pada *Photovoltaic* (A)

$I_0$  = Arus saturasi diode P-N pada *Photovoltaic* (A)

$R_s$  = Resistor seri pada *Photovoltaic* (W)

$R_{sh}$  = Resistor paralel pada *Photovoltaic* (W)

$a$  = Parameter diode yang memiliki nilai antara 1 – 2

$V_t$  = Tegangan terminal pada *Photovoltaic* (V)

Tegangan pada *photovoltaic* dinyatakan sebagai berikut:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln \frac{I_L - I}{I_0} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:  $n$  = Faktor Idealitas

$k$  = Konstantan Boltzman (  $1.3806 \times 10^{-23}$  C)

$T$  = Temperature (K)

$I^L$  = Arus yang dihasilkan cahaya

$I$  = Arus (A)

$I_0$  = Arus saturasi gelap

$q$  = Muatan elektron ( $1.6021 \times 10^{-19}C$ )

Pada tabel 2.1 dibawah ini merupakan spesifikasi dari panel surya/photovoltaic yang digunakan pada simulasi penelitian:

**Tabel 2.1** Spesifikasi panel surya

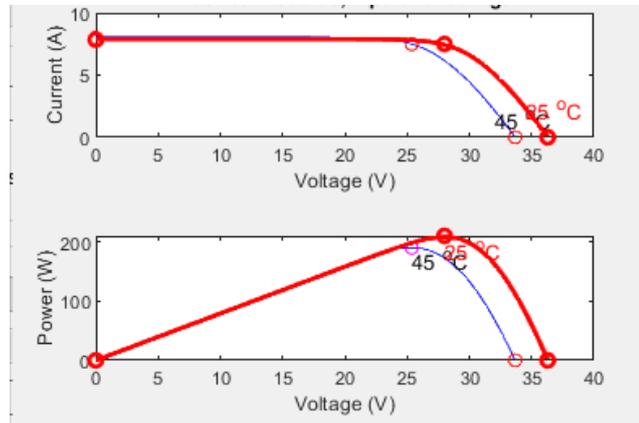
<i>Maximum Power</i>	200W
<i>Tolerance</i>	-+5W
<i>Cells per module</i>	60 Cells
<i>Open Circuit Voltage</i>	35.7V
<i>Short Circuit Current</i>	7.22A
<i>Voltage at Maximum Power Point</i>	30.3V
<i>Current at Maximum Power Point</i>	6.61A

## 2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

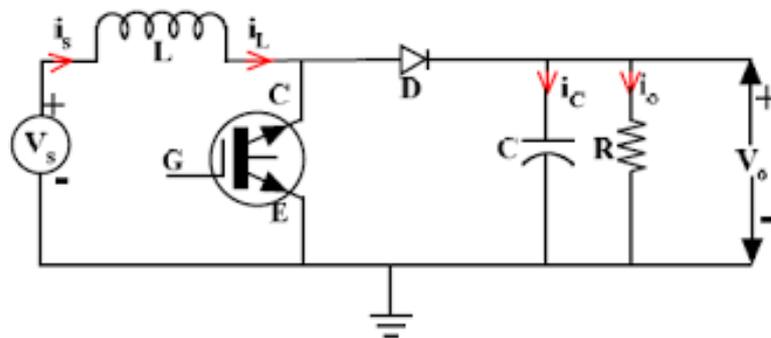
PV merupakan sebuah sistem yang digunakan untuk menangkap energi matahari dan kemudian energi tersebut akan diubah menjadi energi listrik. Dalam aplikasi konvensional, PV memiliki kekurangan terutama pada efisiensi konversi energi surya yang dihasilkan masih rendah, maksimal 20% pada sel PV komersial. Hal tersebut disebabkan karena perbedaan karakteristik antara panel surya dengan beban. Pada daerah yang terisolasi, sistem PV stand-alone mempunyai kelemahan diantaranya rugi baterai dan pada umumnya beroperasi tidak pada titik operasi yang efisien dan maksimum.

Pada kondisi beban dan kondisi atmosfer yang berbeda, daya output maksimum Panel Surya terjadi pada nilai arus dan tegangan yang berbeda-beda. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Nilai daya maksimum berada pada titik tegangan dan arus tertentu. Grafik karakteristik tersebut bergantung pada dua pengaruh eksternal yaitu suhu panel surya dan irradiansi matahari. Untuk mengkondisikan agar daya tetap berada pada titik tersebut maka digunakan sebuah metode yaitu dengan Maximum Power Point Tracking (MPPT). MPPT adalah suatu metode untuk melacak (track) titik kerja sebuah sumber energi agar menghasilkan

daya maksimum. Hasil dari nilai yang terlacak oleh MPPT akan digunakan untuk mengatur duty cycle dari konverter sehingga tegangan output dari panel akan terkondisi sesuai titik maksimum. Dengan kendali MPPT diharapkan terjadi konversi energi maksimal pada berbagai kondisi beban dan kondisi atmosfer.



**Gambar 2.4** Maximum Power Point Pada Panel



**Gambar 2.5** Rangkaian Elektrikal MPPT

Maximum Power Point Tracking (MPPT) terdiri dari beberapa komponen yang dapat kita lihat pada gambar 2.5. Yang mana komponen Maximum Power Point Tracking (MPPT) terdiri dari Transformator, dioda, igbt, kapasitor dan resistor. Adapula fungsi-fungsi dari komponen pada Maximum Power Point Tracking akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya.

### 2.2.1 Induktor

Induktor adalah salah satu komponen elektronik dasar yang digunakan dalam rangkaian yang arus dan tegangannya berubah-ubah dikarenakan kemampuan induktor untuk memproses arus bolak-balik[13]. Induktor digunakan dalam rangkaian MPPT sebagai bagian dari konverter DC-DC, seperti buck converter atau boost converter. Fungsi-fungsi utama induktor dalam rangkaian

MPPT meliputi:

1. Penyimpanan Energi: Induktor menyimpan energi saat saklar (switch) di dalam konverter ditutup dan arus mengalir melalui induktor. Selama ini, energi diubah menjadi fluks magnetik di sekitar induktor.
2. Melepaskan Energi: Ketika Saklar dibuka, fluks magnetik yang ada disekitar induktor runtuh dan menyebabkan tegangan terinduksi pada induktor. Tegangan ini dapat digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan output konverter.
3. Stabilisasi Tegangan atau Arus: Induktor dapat membantu menstabilkan tegangan atau arus keluaran dari konverter.
4. Penyaringan: Induktor juga berfungsi sebagai elemen penyaring (filter) dalam konverter.
5. Mengatur waktu response: Ukuran dan nilai induktor dapat diatur untuk mempengaruhi waktu response konverter. Ini memungkinkan penyesuaian tanggapan kecepatan MPPT terhadap perubahan kondisi cahaya matahari.

### **2.2.2 Dioda**

Dioda adalah komponen elektronika yang hanya memperbolehkan arus listrik mengalir dalam satu arah sehingga dioda biasa disebut juga sebagai “Penyearah”, dioda terbuat dari bahan semikonduktor jenis silicon dan germanium[14]. Berikut ini adalah beberapa fungsi utama dari dioda dalam rangkaian MPPT.

1. Pengendalian Arah Aliran Arus

Dioda yang terpasang dengan benar pada jalur arus panel surya akan memastikan bahwa arus hanya mengalir dari panel surya ke konverter MPPT, dan tidak sebaliknya. Ini mencegah aliran arus balik dari baterai atau beban ke panel surya saat malam hari atau dalam kondisi cahaya rendah.

2. Perlindungan Terhadap Kejut Arus Balik

Dioda juga melindungi konverter konverter MPPT dari kerusakan akibat aliran arus balik yang berlebihan. Tanpa dioda, kejut arus balik dari baterai atau beban dapat merusak komponen elektronik konverter.

3. Memaksimalkan Daya Masuk

Dioda memastikan bahwa arus dari panel surya dialirkan melalui jalur yang

optimal ke konverter MPPT untuk memaksimalkan daya masuk yang diterima dari panel surya. Dengan cara ini, dioda dapat membantu dalam mencapai titik daya maksimum (MPP) dari panel surya.

#### 4. Mengurangi Kerugian Daya

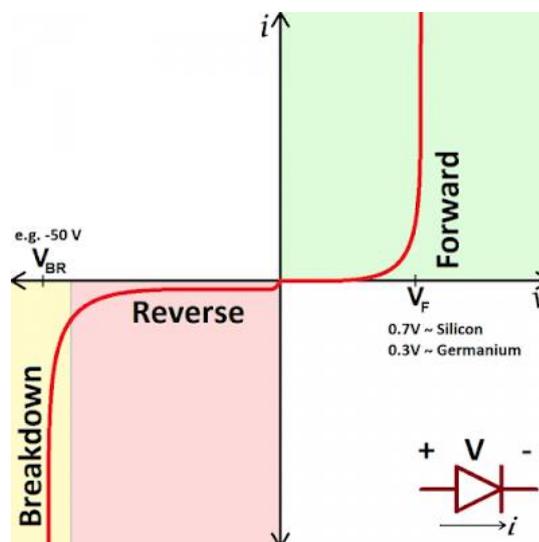
Dioda yang diatur dengan benar dapat membantu mengurangi kerugian daya dalam sistem MPPT dengan memastikan aliran arus yang efisien dan mengurangi tegangan jatuh pada dioda.

#### 5. Stabilitas Sistem

Dioda membantu menjaga stabilitas sistem MPPT dengan melindungi komponen lainnya dari kerusakan akibat kondisi operasional yang tidak diinginkan.

### 2.2.2.1 Karakteristik Dioda

Karakteristik dioda yaitu meneruskan arus menjadi searah dan menghambat arus yang arahnya berlawanan sehingga arus yang mengalir menjadi arus yang searah atau dc dan memiliki dua sifat yaitu forward bias dan reverse bias[15]. Gambar 2.6 dibawah ini merupakan karakteristik dari dioda.



**Gambar 2.6** Karakteristik Dioda

#### 1. Forward Bias

*Forward* bias terjadi ketika tegangan positif diterapkan pada terminal anoda dioda dan tegangan negatif diterapkan pada terminal katoda dioda. Kondisi ini memungkinkan arus mengalir melalui dioda, dan dioda beroperasi dalam keadaan konduktif atau kondisi on. Pada saat *forward* bias, energi elektron

di lapisan N dapat mengalir ke lapisan P, sedangkan energi lubang di lapisan P dapat mengalir ke lapisan N. Dalam kondisi ini, dioda memiliki resistansi yang rendah dan arus dapat mengalir melalui dioda dengan mudah.

## 2. *Reverse Bias*

*Reverse bias* terjadi ketika tegangan negatif diterapkan pada terminal anoda dioda dan tegangan positif ditetapkan pada terminal katoda dioda. Kondisi ini mencegah arus mengalir melalui dioda dan dioda tidak mengalir dalam kondisi konduktif atau kondisi off. Pada saat *reverse bias*, energi elektron di lapisan N tertarik menuju terminal anoda, sementara energi lubang di lapisan P tertarik menuju terminal katoda. Sehingga menciptakan daerah deplesi yang lebar dan menghalangi arus yang mengalir melalui dioda. Dalam kondisi *reverse bias*, dioda memiliki resistansi yang sangat tinggi sehingga arus hambatan hampir tidak ada atau sangat kecil.

### 2.2.3 *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)*

*IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* adalah semikonduktor yang setara dengan gabungan antara sebuah BJT dan Mosfet. IGBT merupakan jenis alat baru yang berfungsi sebagai komponen saklar untuk aplikasi daya [16]. Berikut ini adalah beberapa fungsi dari IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dalam rangkaian MPPT.

#### 1. Pengendalian Aliran Arus

*IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* berfungsi sebagai saklar daya yang dapat diaktifkan dan dimatikan secara cepat. Dengan mengontrol aliran arus ini, IGBT membantu dalam menyesuaikan tingkat daya yang diterima dari panel surya ke konverter MPPT.

#### 2. *Pulse Width Modulation (PWM)*

*IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* sering digunakan dalam *Pulse Width Modulation (PWM)* untuk mengatur tingkat daya yang masuk ke konverter MPPT. Dengan mengatur lebar pulsa sinyal, IGBT mengendalikan rata-rata daya yang diteruskan ke konverter, sehingga meningkatkan efisiensi konversi daya.

#### 3. Mengurangi Kerugian Daya

IGBT memiliki kerugian daya yang lebih rendah dibandingkan dengan

dioda konvensional, sehingga membantu mengurangi kerugian daya dalam sistem MPPT dan meningkatkan efisiensi keseluruhan.

#### 4. Perlindungan Arus Balik

Sama seperti dioda konvensional, IGBT juga melindungi konverter MPPT dari kerusakan akibat aliran arus balik yang berlebihan.

#### 5. Regulasi Tegangan dan Arus

IGBT memungkinkan kontrol tegangan dan arus yang lebih presisi, memungkinkan penyesuaian daya masuk yang lebih baik untuk mencapai titik daya maksimum (MPP) dari panel surya.

### 2.2.4 Kapasitor

Kapasitor adalah komponen elektronik yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik, dan secara sederhana terdiri dari dua konduktor yang dipisahkan oleh bahan penyekat (di elektrik) tiap konduktrok disebut keping[17]. Berikut ini adalah beberapa fungsi utama kapasitor dalam rangkaian MPPT.

#### 1. Penyimpanan Energi

Kapasitor bertindak sebagai komponen penyimpan energi sementara dalam sistem MPPT. Ketika panel surya menghasilkan lebih banyak daya daripada yang dibutuhkan oleh konverter MPPT atau beban saat itu, kapasitor dapat menyimpan energi ekstra ini untuk digunakan kemudian hari saat kebutuhan daya meningkat atau cahaya yang kurang optimal

#### 2. Penyaring Tegangan

Kapasitor berfungsi sebagai penyaring untuk menyamakan dan menstabilkan tegangan dalam rangkaian MPPT. Ini akan membantuk menghilangkan fluktuasi tegangan yang mungkin terjadi karena perubahan intensitas cahaya atau ketidakseimbangan daya dari panel surya.

#### 3. Mengurangi osilasi arus

Kapasitor dapat mengurangi osilasi arus yang mungkin terjadi dalam rangkaian MPPT. Osilasi arus dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam sistem, dan kapasitor membantu menghaluskannya untuk menjaga aliran arus yang lebih konsisten.

#### 4. Meningkatkan Efisiensi Konversi

Dengan menggunakan kapasitor yang tepat, efisiensi konversi daya dari

panel surya ke konverter MPPT dapat ditingkatkan. Kapasitor membantu mengurangi kerugian daya dan meningkatkan faktor daya, sehingga memaksimalkan energi yang diperoleh dari panel surya.

#### 5. Pemulihan Energi

Kapasitor dapat membantu dalam pemulihan energi yang terbuang akibat kerugian daya atau osilasi arus, sehingga meminimalkan pemborosan daya.

### **2.2.5 Resistor**

Resistor adalah salah satu komponen elektronika yang berfungsi untuk mengatur serta menghambat arus listrik. Resistor adalah komponen dasar elektronika yang dipergunakan untuk membatasi jumlah arus yang mengalir dalam suatu rangkaian. Sesuai dengan namanya resistor bersifat resistif dan biasanya komponen ini terbuat dari bahan karbon[18]. Berikut ini adalah beberapa fungsi utama resistor dalam rangkaian MPPT.

#### 1. Pembagi Tegangan

Resistor digunakan dalam pembagi tegangan untuk mengukur tegangan keluaran dari panel surya atau tegangan lainnya dalam rangkaian. Pengukuran tegangan sangat penting dalam mengidentifikasi titik daya maksimum (MPP) dari panel surya dan menentukan titik operasi yang optimal.

#### 2. Pengukuran Arus

Resistor juga digunakan sebagai bagian dari rangkaian pengukuran arus. Dengan mengukur arus keluaran dari panel panel surya atau arus dari berbagai titik dalam rangkaian, sistem MPPT dapat menghitung daya yang diproduksi dan mengoptimalkan.

#### 3. Pembatasan Arus

Resistor dapat digunakan sebagai elemen pembatas arus untuk melindungi komponen dalam rangkaian MPPT dari aliran arus berlebih. Pembatasan arus ini membantu mencegah kerusakan pada komponen sensitif dalam situasi tegangan atau arus berlebih.

#### 4. Filter dan Penguat Sinyal

Resistor dapat digunakan dalam kombinasi dengan komponen lain, seperti kapasitor dan induktor, untuk membentuk filter atau penguat sinyal. Ini

membantu dalam meningkatkan kualitas sinyal atau menyaring noise yang tidak diinginkan dalam rangkaian.

#### 5. Kontrol dan Kalibrasi

Resistor digunakan dalam rangkaian kontrol dan kalibrasi untuk menyesuaikan parameter operasional atau melakukan pemrograman pada sistem MPPT.

### 2.3 *Fuzzy Logic* Kontrol

*Fuzzy logic* kontrol adalah metodologi sistem kontrol pemecahan masalah yang cocok untuk diimplementasikan pada sistem. Mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, *embedded system*, jaringan PC, *multichannel* atau *workstation* berbasis akuisisi data dan sistem kontrol. Konsep *fuzzy logic* diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh pada 1962. Kelebihan *fuzzy logic* dapat digunakan pada sebagian besar permasalahan yang terjadi di dunia nyata. Permasalahan di dunia nyata kebanyakan bukan biner dan bersifat non linier sehingga *fuzzy logic* cocok digunakan karena menggunakan nilai linguistik yang tidak linier. Beberapa alasan yang dapat diutarakan mengapa kita menggunakan *fuzzy logic* diantaranya adalah mudah dimengerti, memiliki toleransi terhadap data data yang tidak tepat, mampu memodelkan fungsi-fungsi non linier yang sangat kompleks, dapat bekerja sama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional dan didasarkan pada bahasa alami.

#### 2.3.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy adalah pengelompokan sesuatu berdasarkan variabel bahasa (linguistik variabel) yang dinyatakan dengan fungsi keanggotaan. Dalam logika fuzzy ada dua jenis himpunan, yaitu himpunan crisp (tegas) dan himpunan fuzzy (samar).

- a. Himpunan crisp (tegas) adalah himpunan yang menyatakan suatu obyek merupakan anggota dari satu himpunan dengan memiliki nilai keanggotaan ( $\mu$ ) = ya (1) atau tidak (0), oleh karena itu himpunan crisp disebut himpunan tegas.
- b. Himpunan fuzzy adalah himpunan yang menyatakan suatu obyek dapat menjadi anggota dari beberapa himpunan dengan nilai keanggotaan ( $\mu$ ) yang berbeda. Himpunan fuzzy memiliki 2 atribut yaitu:

1. Linguistik, yaitu penamaan suatu kelompok yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: Lambat, Sedang, Cepat.
2. Numerik, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel, seperti: 40, 50, 60 dan sebagainya.

Hal – hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem fuzzy yaitu:

1. Variabel Fuzzy

Variabel fuzzy merupakan variabel yang dibahas dalam suatu sistem fuzzy. Variabel fuzzy terdiri dari beberapa himpunan fuzzy.

2. Himpunan Fuzzy

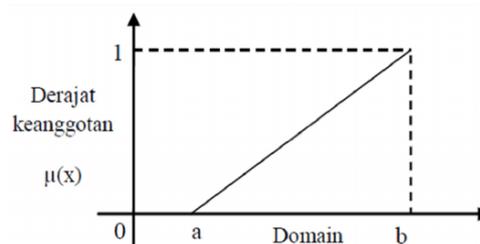
Himpunan fuzzy merupakan suatu kelompok yang mewakili suatu keadaan tertentu dalam suatu variabel fuzzy.

### 2.3.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan suatu himpunan fuzzy dapat ditentukan dengan fungsi linier, fungsi segitiga (triangel), trapesium (trapezoidal) atau fungsi Gauss (Gaussian).

1. Fungsi keanggotaan Linier Naik

Pada fungsi linier, pemetaan input ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai suatu garis lurus. Ada dua keadaan himpunan fuzzy linier, yaitu linier naik dan linier turun. Himpunan fuzzy linier naik, kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6

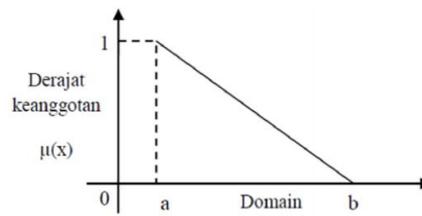


**Gambar 2.6** Grafik fungsi keanggotaan linier (naik)

2. Fungsi Keanggotaan Linier Turun

Himpunan fuzzy linier turun, garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah. Seperti

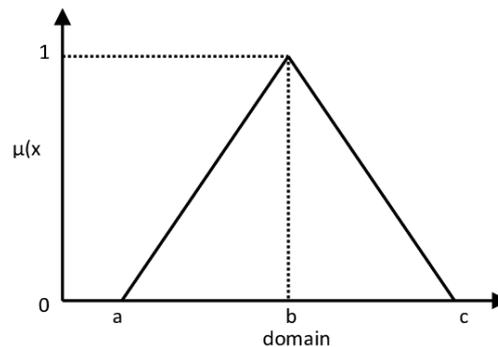
ditunjukkan pada gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Grafik fungsi keanggotaan linier (turun)

### 3. Fungsi keanggotaan segitiga

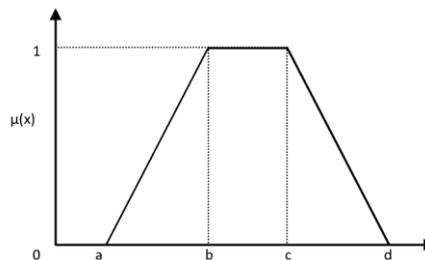
Kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis (linier). Bentuk grafik dari fungsi keanggotaan segitiga akan ditunjukkan pada gambar 2.8



**Gambar 2.8** Grafik fungsi keanggotaan segitiga

### 4. Fungsi keanggotaan Trapesium

Kurva trapesium pada dasarnya berbentuk seperti segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1. Bentuk grafik dari fungsi keanggotaan trapesium dapat dilihat pada gambar 2.9

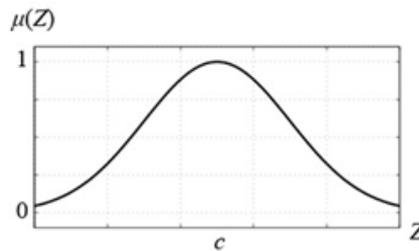


**Gambar 2.9** Grafik fungsi keanggotaan trapesium

### 5. Fungsi keanggotaan Gaussian

Pada kurva yang memiliki representasi gaussian memiliki bentuk yang hampir sama dengan segitiga dengan permukaan yang tumpul. Biasanya kurva gaussian digunakan untuk mengolah data-data yang acak. Bentuk

grafik dari fungsi keanggotaan gaussian dapat dilihat pada gambar 2.10



**Gambar 2.10** Grafik fungsi keanggotaan Gaussian

### 2.3.3 Sistem Berbasis Aturan Fuzzy

Pendekatan logika fuzzy diimplementasikan dalam tiga tahapan yaitu: fuzzifikasi, evaluasi rule (inferensi) dan defuzzifikasi.

#### 1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan fase pertama dari perhitungan fuzzy yaitu mengubah masukan yang nilai kebenarannya bersifat pasti ke dalam bentuk fuzzy input yang berupa tingkat keanggotaan/tingkat kebenaran. Dengan demikian, tahap ini mengambil nilai-nilai crisp dan menentukan derajat dimana nilai-nilai tersebut menjadi anggota dari setiap himpunan fuzzy yang sesuai.

#### 2. Inferensi

Inferensi adalah melakukan penalaran menggunakan *fuzzy input* dan *fuzzy rules* yang telah ditentukan sehingga menghasilkan *fuzzy output*. Secara sintaks, suatu *fuzzy rule* (aturan fuzzy) dituliskan dalam bentuk: *IF antecedent THEN consequent*.

#### 3. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah mengubah *fuzzy output* menjadi nilai tegas berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Sistem inferensi hanya dapat membaca nilai yang tegas, maka diperlukan suatu mekanisme untuk mengubah nilai *fuzzy output* itu menjadi nilai yang tegas. Itulah peranan defuzzifikasi yang memuat fungsi-fungsi penegasan dalam sistem, sehingga defuzzifikasi merupakan metode yang penting dalam pemodelan sistem fuzzy.

### 2.3.4 Metode Mamdani

Fuzzy merupakan salah satu aplikasi logika fuzzy yang telah berkembang amat luas dewasa ini adalah sistem inferensi fuzzy (*Fuzzy Inference System/FIS*)

yaitu kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan fuzzy, aturan fuzzy berbentuk *IF THEN* dan penalaran fuzzy. Misalnya penentuan produksi barang, sistem pendukung keputusan, sistem klasifikasi data, sistem pakar, sistem pengenalan pola, robotika dan sebagainya. Ada tiga metode dalam sistem inferensi fuzzy yang sering digunakan yaitu metode Tsukamoto, metode Mamdani dan metode Takagi Sugeno. Sistem ini berfungsi untuk mengambil keputusan melalui proses tertentu dengan mempergunakan aturan inferensi berdasarkan logika fuzzy. Metode mamdani sering juga dikenal dengan Metode *Max-Min*. Metode ini dikenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan output, diperlukan 3 tahapan:

1. Pembentukan himpunan fuzzy pada metode mamdani, baik variabel input maupun variabel output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan fuzzy.
2. Aplikasi fungsi implikasi (aturan) pada metode mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah Min.
3. Komposisi aturan tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy yaitu: *max, additive dan probabilistic OR*.

a. Metode Max (Maximum)

Pada metode ini, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah fuzzy dan mengaplikasikannya *output* dengan menggunakan operator *OR (union)*. Jika semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan fuzzy yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan mamdani, secara umum dapat dituliskan:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i]) \dots\dots\dots(2.3)$$

Apabila digunakan fungsi implikasi *Min*, maka metode komposisi sering disebut dengan nama *Max-Min* atau *Min-Max* atau Mamdani.

b. Metode Additif (Sum)

Pada metode ini, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara melakukan bounded-sum terhadap semua *output* daerah fuzzy. Secara umum dituliskan:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \min(1, \mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) \dots\dots\dots (2.4)$$

c. Metode Probalistik OR (probor)

Pada metode ini, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara melakukan produk terhadap semua *output* daerah fuzzy. Secara umum dituliskan.

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow (\mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) - (\mu_{sf}[x_i] - \mu_{kf}[x_i]) \dots\dots\dots(2.3)$$

4. Penegasan (Defuzzifikasi)

Input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy. Output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut. Jika diberikan suatu himpunan fuzzy dalam range tertentu, maka dapat diambil suatu nilai crisp sebagai output. Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan mamdani, antara lain:

a. Metode Centroid (*Composite Moment*)

Pada metode ini solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat ( $z^*$ ) daerah fuzzy. Secara umum dirumuskan:

$$z^* = \frac{\int_z z \mu(z) dz}{\int_z \mu(z) dz} \text{ untuk variabel kontinu} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$z^* = \frac{\sum_{j=i}^n z j^\mu(z_j)}{\sum_{j=i}^n \mu(z_j)} \text{ untuk variabel diskrit} \dots\dots\dots(2.5)$$

b. Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain fuzzy yang memiliki nilai keanggotaan separuh dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah fuzzy. Secara umum dituliskan:

$$z_p \text{ sedemikian sehingga } \int_{R_i}^p \mu(z) dz = \int_p^{R_n} \mu(z) dz \dots\dots\dots(2.6)$$

c. Metode *Mean Of Maximum* (MOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

d. Metode *Largest Of Maximum* (LOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

e. Metode Smalles Of Maximum (SOM)

Pada metode ini, Solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

## 2.4 MATLAB

Matlab adalah singkatan dari "MATrix LABoratory" dan merupakan sebuah lingkungan pemrograman komputer dan bahasa pemrograman yang digunakan secara luas dalam pengolahan data, analisis, visualisasi, dan pemodelan matematika.

Dalam Matlab, pengguna dapat memanipulasi array, matriks, dan vektor secara efisien dan efektif, serta melakukan berbagai operasi matematika seperti aljabar linear, analisis statistik, dan optimasi numerik. Matlab juga memiliki berbagai alat bantu untuk pemrosesan sinyal, pemodelan dinamika sistem, serta pemrograman GUI (Graphical User Interface) dan simulasi.

Matlab sangat populer di kalangan akademisi dan industri untuk pengembangan dan penelitian dalam berbagai bidang seperti teknik, fisika, matematika, biologi, kedokteran, dan keuangan. Dalam Matlab, pengguna dapat menulis skrip atau program yang kemudian dapat dijalankan dalam sesi atau sebagai file yang terpisah. Program-program tersebut dapat disimpan dan diubah kembali pada waktu yang berbeda, serta diintegrasikan dengan perangkat lunak lainnya.



**Gambar 2.10** Aplikasi MatLab

### 2.4.1 Fungsi Aplikasi MATLAB

#### 1. Menyelesaikan masalah *engineering*

Karena matematika merupakan bagian penting dari teknik, MATLAB dapat sangat membantu dalam memecahkan berbagai masalah yang dihadapi oleh para pekerja. Karena MATLAB dapat menangani bilangan dan model kompleks, kita dapat merancang, menguji dan masih banyak hal lain yang dapat dilakukan dalam MATLAB.

#### 2. Mengolah permasalahan aljabar linear

Aljabar linier tidak hanya diperlakukan untuk menyesuaikan masalah di sekolah. Di tempat kerja, aljabar linier digunakan untuk menghitung tingkat pengembalian investasi (ROI).

Selain itu, ekspresi ini juga berguna dalam kasus berikut:

- Perkiraan penjualan perusahaan
- Kontrol Inventaris
- Membuat rencana keuangan
- Membuat keputusan bisnis yang baik

Tentu saja angka yang diproses biasanya besar, jadi menggunakan MATLAB membuat prosesnya sangat berguna.

#### 3. Analisis numerik

Analisis numerik adalah bagian dari ilmu statistic dan sering membantu membuat keputusan dalam berbagai disiplin ilmu Teknik seperti arsitektur, teknik sipil, dan bahkan teknik industri. MATLAB dapat menyederhanakan pemrosesan data.

#### 4. Mengolah data riset

MATLAB adalah program yang dapat kita gunakan untuk memvalidasi hasil penelitian kita menggunakan berbagai metode. Kita juga dapat dengan jelas memvisualisasikan hasil penelitian.

#### 5. Simulasi

MATLAB memungkinkan kita untuk membuat model atau algoritma untuk memecahkan masalah. Program ini dapat menguji keberhasilan suatu model atau algoritma dengan mensimulasikan hasil akhir.

### 2.4.2 Sistem Aplikasi MATLAB

Sistem aplikasi MATLAB memiliki 5 bagian, kelima bagian tersebut adalah sebagai berikut:

1. *MATLAB Language*

MATLAB menggunakan Bahasa matriks/array tingkat tinggi yang dapat menangani program dan fungsi yang kompleks.

2. *Working environment*

MATLAB working environment adalah kumpulan tool dan fasilitas yang tersedia untuk bekerja di platform ini. Dengan tool dan fasilitas tersebut kita bisa mengelola variable yang digunakan serta mengimpor dan mengeksport data.

3. *Sistem grafis*

Sistem grafis MATLAB adalah bagian yang digunakan untuk mengolah gambar, memvisualisasikan data, membuat animasi, dan menampilkan grafik.

4. *Mathematical function library*

Tentu saja, dalam MATLAB salah satu bagian terpenting adalah fungsi matematika. MATLAB memiliki kumpulan algoritma komputasi, dari yang sederhana hingga yang sangat kompleks. Semua ini dapat dilakukan dengan kecepatan tinggi selama perangkat keras mendukungnya.

5. *Application Program Interface (API)*

API pada MATLAB adalah fitur yang menyediakan akses bagi pengguna untuk menulis program C dan Fortran.

### 2.4.3 Dasar-Dasar pengoperasian MATLAB

MATLAB dapat dioperasikan pada sistem operasi Windows, Linux, maupun macOS. Selain itu, MATLAB juga bisa dihubungankan dengan aplikasi atau bahasa pemrograman eksternal lainnya, seperti C, java, NET, dan microsoft Excel. Dalam MATLAB tersedia pula kotak kakas (toolbox) yang dapat digunakan untuk aplikasi – aplikasi khusus, seperti pengolahan sinyal, sistem kontrol, logika fuzzy, jaringan saraf tiruan, optimasi, pengolahan citra digital, bioinformatika, simulasi dan berbagai teknologi lainnya.

Di dalam MATLAB terdapat dua bagian penting yaitu *MATLAB editor* dan

simulink. *MATLAB editor* berfungsi untuk menuliskan *listing program*, sedangkan simulink berfungsi untuk melakukan simulasi menggunakan diagram blok. Dengan menggunakan simulink yang merupakan kesatuan dalam program, kita dapat melakukan suatu pemodelan sistem kontrol atau suatu *plant* yang akan diatur. Hal itu dapat didesain dengan menggunakan blok-blok yang telah tersedia serta *setting* parameter-parameter akan menjadi lebih mudah. Blok-blok simulink juga dapat dibentuk dengan persamaan matematika dengan menggunakan blok *transfer function* sehingga kita dapat menuliskan persamaan dalam blok tersebut sesuai dengan parameter yang akan dicari.

## 2.5 Simulink MATLAB

Simulink adalah perangkat lunak yang interaksinya dalam lingkungan *block diagram* untuk simulasi multi domain dan *mode-based design*. Simulink dapat mensupport *system level design*, simulasi, *automatic code generation*, dan *continuous test and verification embedded system*. Simulink menyajikan tampilan editor dalam bentuk grafik.

Simulink juga terintegrasi dengan MATLAB sehingga memungkinkan untuk saling bertukar informasi maupun data antara simulink dan MATLAB secara bersamaan. Dengan kata lain kita dapat mengkombinasikan antara *Textual Programming* dan *Graphical Programming* dalam melakukan simulasi dari suatu desain sistem. Ribuan algoritma yang tersedia di MATLAB dapat dengan mudah dimasukkan dalam blok diagram simulink.