

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dalam penyusunan penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Jalaluddin Muhammad Akbar (2023) berjudul "Analisis Hotspot pada Konduktor dan Material Transmisi Utama Menggunakan Metode Thermovisi di Gardu Induk Taliwang" menjelaskan bahwa kualitas dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh kondisi peralatan transmisi. Oleh karena itu, kegiatan pemeliharaan perlu dilakukan secara berkala untuk mencegah terjadinya gangguan, salah satunya berupa hotspot yang umumnya muncul pada sambungan antara klem dan konduktor. Deteksi dini terhadap kondisi tersebut dapat dilakukan melalui inspeksi thermovisi menggunakan alat thermal imager [3].

Penelitian Muhammad Nur Azikin Akib (2023) yang berjudul "Analisis Perbaikan Hotspot pada SUTT 150 kV New Rancakasumba–Ujungberung T.13 Penghantar I Fasa S Metode PDKB" mengemukakan bahwa hotspot mengakibatkan sebagian energi listrik berubah menjadi energi panas sehingga meningkatkan rugi-rugi daya. Apabila dibiarkan, kondisi tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan transmisi akibat temperatur yang berlebihan. Oleh sebab itu, penanganan hotspot perlu dilakukan sesegera mungkin, baik melalui pekerjaan dengan pemadaman maupun tanpa pemadaman jaringan [4].

Penelitian Siti Aminah Rukmana (2022) berjudul "Studi Analisa Kenaikan Temperatur Konduktor Akibat Arus Beban dan Suhu Lingkungan (Aplikasi Gardu Induk Singkarak)" menjelaskan bahwa kemampuan hantar arus konduktor dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain besarnya arus beban, temperatur lingkungan, radiasi panas, serta kecepatan angin. Temperatur konduktor merupakan hasil keseimbangan antara panas yang dihasilkan oleh arus listrik dengan proses pelepasan panas ke lingkungan melalui radiasi maupun konveksi [5].

Menurut penelitian Lelono Santoso (2022) berjudul "Analisis Pengaruh Suhu Pengujian Thermovisi terhadap Rugi-Rugi Daya pada Lightning Arrester di GI 150 kV Poncol Baru", kenaikan temperatur pada peralatan gardu induk terjadi karena adanya hambatan saat arus listrik mengalir melalui konduktor. Kondisi tersebut meningkatkan rugi-rugi daya dan paling sering ditemukan pada terminal maupun sambungan penghantar, terutama pada sambungan dua jenis logam yang berbeda atau konduktor yang mengalami korosi sehingga luas penampang efektifnya berkurang [6].

Penelitian Anjani dan Marpaung (2022) berjudul "Perbandingan Metode Fuzzy Tsukamoto, Mamdani dan Sugeno dalam Penentuan Jumlah Pemasukan Beras Optimum pada Perum Bulog Divisi Regional Sumatera Utara" membandingkan kinerja tiga metode logika fuzzy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Fuzzy Tsukamoto memperoleh nilai MAPE sebesar 1,26%, lebih rendah dibandingkan metode Mamdani sebesar 3,34% dan Sugeno sebesar 3,34%. Nilai kesalahan yang lebih kecil menunjukkan bahwa metode Tsukamoto menghasilkan tingkat akurasi yang lebih baik pada studi tersebut. Meskipun objek penelitiannya berbeda, penelitian tersebut memiliki kesamaan dalam pemanfaatan logika fuzzy untuk mengolah beberapa variabel masukan menjadi dasar pengambilan keputusan. Atas dasar tersebut, metode Fuzzy Tsukamoto dipilih pada penelitian ini karena setiap aturan menghasilkan α -predikat dan nilai crisp sehingga hasil klasifikasi lebih mudah disesuaikan dengan kategori kondisi hotspot peralatan [7].

2.2 Dasar Teori

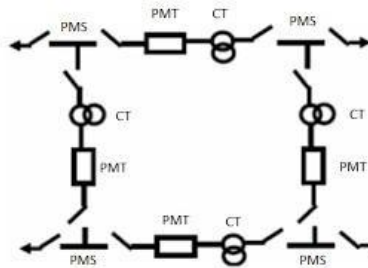
2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan instalasi tenaga listrik yang tersusun atas berbagai peralatan dengan fungsi utama mengatur proses penyaluran energi listrik dalam sistem tenaga. Selain berfungsi sebagai tempat menaikkan maupun menurunkan tingkat tegangan melalui transformator, gardu induk juga digunakan untuk kegiatan pengukuran, pengawasan operasi, pengamanan sistem, serta pengaturan aliran daya menuju gardu induk lain melalui jaringan transmisi maupun distribusi [8].

Sebagai bagian dari sistem tenaga listrik, gardu induk menjadi titik pertemuan antara saluran transmisi dan distribusi yang dilengkapi dengan peralatan hubung bagi beserta fasilitas pendukungnya. Bergantung pada kebutuhan sistem, gardu induk juga dapat dilengkapi transformator sebagai peralatan utama. Secara umum, gardu induk dapat diklasifikasikan berdasarkan tingkat tegangan, fungsi operasional, dan konfigurasi sistem rel. Berdasarkan sistem rel, gardu induk dibedakan menjadi empat jenis [9], [10].:

a. Gardu Induk Sistem *Ring Busbar*

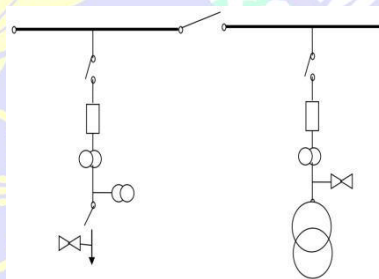
Gardu induk sistem *ring busbar* seperti gambar 2,1, merupakan gardu induk yang menggunakan rel atau *busbar* yang semua rel tersambung satu sama lain dan membentuk *ring* atau cincin



Gambar 2.1 Single line diagram sistem ring busbar[10]

b. Gardu induk Sistem *Single Busbar*

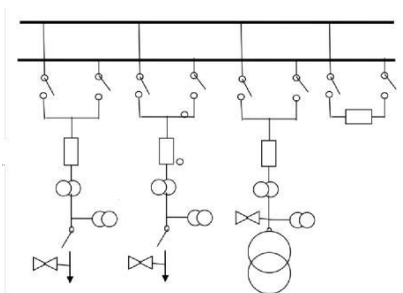
Gardu induk sistem *single busbar* seperti gambar 2.2, merupakan gardu induk yang hanya memiliki satu rel atau *busbar* dan sebagian besar adalah gardu induk yang berada pada ujung suatu sistem transmisi.



Gambar 2.2 Single line diagram sistem *single busbar*[10]

c. Gardu Induk Sistem *Double Busbar*

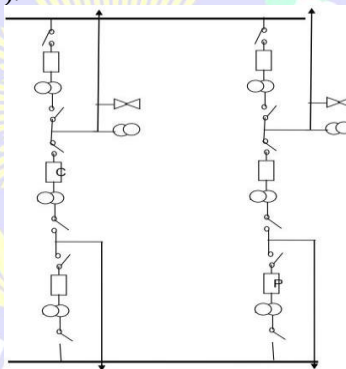
Gardu induk sistem *double busbar* seperti gambar 2.3, merupakan gardu induk yang hanya memiliki dua rel yang sangat efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban dan saat melakukan perubahan sistem (manuver sistem).



Gambar 2.3 Single line diagram sistem *double busbar*[10]

d. Gardu Induk Sistem Satu Setengah (*One Half*) Busbar

Gardu induk sistem satu setengah busbar seperti pada gambar 2.4, merupakan gardu induk yang hanya memiliki dua rel yang biasanya dipasang pada gardu induk di pembangkit tenaga listrik atau gardu induk dengan kapasitas yang besar. Sistem satu setengah busbar ini sangat efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban dan saat melakukan perubahan sistem (*manuver sistem*).



Gambar 2.4 Single line diagram sistem satu setengah busbar[10]

2.2.2 Peralatan pada Bay Penghantar

2.2.2.1 Pemutus Tenaga

Berdasarkan International Electrotechnical Vocabulary (IEV) 441-14-20, pemutus tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar (*switching device*) mekanis yang dirancang untuk melakukan operasi penyambungan dan pemutusan rangkaian listrik. PMT mampu menghubungkan, menghantarkan, serta memutus arus

beban pada kondisi operasi normal. Selain itu, peralatan ini juga dirancang untuk tetap dapat menghubungkan, menghantarkan dalam batas waktu tertentu, serta memutus arus pada kondisi tidak normal, seperti saat terjadi hubung singkat.

Dalam sistem tenaga listrik, PMT berfungsi sebagai peralatan proteksi sekaligus pengendali rangkaian. Peralatan ini digunakan untuk membuka maupun menutup rangkaian yang sedang berbeban, serta mengisolasi bagian sistem yang mengalami gangguan agar kerusakan tidak menyebar ke peralatan lain maupun jaringan listrik secara keseluruhan [11].

2.2.2.2 Pemisah

Disconnecting switch atau pemisah (PMS) merupakan peralatan pada sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengisolasi suatu rangkaian dari sumber tegangan. Pengoperasian PMS dilakukan pada kondisi tanpa arus beban, baik saat rangkaian masih bertegangan maupun tidak bertegangan. Pada gardu induk, PMS umumnya dipasang di sisi antara sumber dan pemutus tenaga (PMT) sebagai PMS bus, serta di antara PMT dan sisi beban sebagai PMS line. Selain itu, instalasi PMS juga dilengkapi dengan earthing switch (PMS tanah) sebagai pengaman selama kegiatan pemeliharaan [12]. Berdasarkan fungsinya, PMS dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sebagai berikut.

- a. Pemisah Peralatan
Pemisah peralatan digunakan untuk mengisolasi suatu peralatan listrik dari peralatan atau instalasi lain yang masih bertegangan. Pengoperasiannya hanya diperbolehkan ketika rangkaian tidak sedang dialiri arus beban.
- b. Pemisah Tanah
Pemisah tanah (earthing switch) berfungsi menghilangkan tegangan sisa maupun tegangan induksi yang masih muncul setelah saluran tegangan tinggi diputuskan. Penggunaan PMS tanah bertujuan meningkatkan keselamatan personel selama proses pemeriksaan maupun pemeliharaan peralatan instalasi.

2.2.2.3 Transformer Tegangan

Transformator tegangan (*voltage transformer*/VT) merupakan peralatan yang digunakan untuk menurunkan tegangan sistem menjadi tegangan yang lebih rendah sehingga dapat digunakan oleh peralatan ukur, indikator, maupun relai

proteksi. Prinsip kerjanya sama dengan transformator tenaga, namun transformator tegangan memiliki karakteristik yang berbeda karena hanya melayani beban berdaya kecil, yaitu sekitar 10–150 VA. Oleh sebab itu, transformator ini dirancang dengan tingkat ketelitian yang tinggi, serta salah satu terminal sisi tegangan tingginya selalu dihubungkan ke tanah (*grounding*) untuk menjamin keamanan dan keandalan pengukuran [13].

2.2.2.4 Transformator Arus

Transformator arus (*current transformer/CT*) merupakan peralatan yang digunakan untuk menurunkan arus pada sistem tenaga listrik dari sisi primer yang bernilai besar menjadi arus sekunder dengan nilai yang lebih kecil secara akurat. Peralatan ini diterapkan pada instalasi tegangan ekstra tinggi, tegangan tinggi, maupun tegangan menengah agar proses pengukuran dan sistem proteksi dapat dilakukan dengan aman serta memiliki tingkat ketelitian yang tinggi.

Fungsi utama transformator arus adalah mengubah besaran arus primer menjadi arus sekunder yang sesuai dengan kebutuhan peralatan metering dan relai proteksi. Selain itu, transformator arus juga memberikan isolasi antara rangkaian primer dan rangkaian sekunder sehingga keselamatan operator maupun peralatan ukur tetap terjaga selama proses pengukuran [14].

2.2.2.5 Lightning Arrester

Lightning arrester (LA) merupakan peralatan proteksi yang berfungsi membatasi tegangan lebih (*surge voltage*) agar tidak merusak peralatan pada sistem tenaga listrik. Tegangan surja dapat berasal dari sambaran petir maupun proses switching pada sistem, sehingga diperlukan suatu peralatan yang mampu mengalihkan energi surja sebelum mencapai peralatan utama [15]. Surja pada sistem tenaga listrik dapat terjadi akibat beberapa kondisi, antara lain:

- a. kegagalan sudut perlindungan petir sehingga arus petir masuk ke konduktor fasa;
- b. *backflashover* yang disebabkan oleh tingginya nilai tahanan pentanahan pada gardu induk maupun saluran transmisi;
- c. proses pengoperasian PMT atau PMS (*switching*);
- d. gangguan hubung singkat antarfasa maupun antara fasa dengan tanah pada gardu induk atau saluran transmisi.

Ketika surja terjadi, gelombang berjalan (*travelling wave*) akan merambat sepanjang penghantar dengan kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya. Apabila tegangan surja yang diterima peralatan melebihi nilai *Basic Insulation Level* (BIL), maka isolasi peralatan berpotensi mengalami kegagalan. Oleh karena itu, lightning arrester dipasang untuk mengalirkan arus surja ke tanah dalam waktu yang sangat singkat sehingga tegangan lebih dapat dibatasi tanpa mengalirkan *follow current* ke sistem [15].

2.2.3 Kawat Penghantar

Kawat penghantar merupakan komponen utama pada saluran udara transmisi yang berfungsi sebagai media penyalur arus listrik. Agar mampu beroperasi secara andal, kawat penghantar harus memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, ketahanan terhadap temperatur, serta kekuatan mekanis yang memadai untuk menahan beban selama pengoperasian [16].

Material penghantar yang umum digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dan aluminium. Tembaga memiliki konduktivitas listrik sekitar 100% (Cu 100%), sedangkan aluminium memiliki konduktivitas sekitar 61% (Al 61%). Meskipun konduktivitas tembaga lebih tinggi, material ini memiliki massa yang lebih besar dan harga yang lebih mahal dibandingkan aluminium untuk nilai tahanan yang sama. Oleh karena itu, aluminium lebih banyak digunakan sebagai penghantar pada jaringan transmisi. Pada saluran transmisi tegangan tinggi, penghantar umumnya tidak dilengkapi lapisan pelindung dan menggunakan konduktor berbahan aluminium atau tembaga yang diperkuat dengan inti baja guna meningkatkan kekuatan mekanis tanpa mengurangi kemampuan menghantarkan arus listrik [17].

Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut:

AAC : “*All Aluminium Conductor*”, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

AAAC : “*All Aluminium Alloy Conductor*”, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR : “*Aluminium Conductor Steel Reinforced*”, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

ACAR : “*Aluminium Conductor Alloy Reinforced*”, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran [17].

2.2.4 Hotspot

Selama peralatan gardu induk menghantarkan arus listrik, maka akan muncul suhu panas atau titik panas karena kerugian arus yang mengalir didalam konduktor yang terjadi karena adanya hambatan. Bagian yang sering mengalami *hotspot* atau titik panas adalah titik sambungan seperti pada klem maupun konduktor pada switchyard terutama jika menghubungkan dua bagian dengan bahan logam yang berbeda serta penampang konduktor yang mengecil karena terjadi korosi. *Hotspot* juga bisa terjadi pada titik sambungan dengan kualitas sambungan yang tidak memenuhi standar[18].

2.2.5 Emisivitas

Emisivitas merupakan salah satu faktor krusial yang menentukan akurasi pengukuran suhu permukaan suatu objek. Emisivitas didefinisikan sebagai kemampuan suatu benda dalam memancarkan energi radiasi termal dibandingkan dengan benda hitam sempurna pada suhu yang sama. Nilai emisivitas berkisar antara nol hingga satu, dimana benda hitam sempurna memiliki emisivitas sebesar satu, sedangkan benda yang memantulkan sebagian radiasi memiliki nilai emisivitas yang lebih rendah. Nilai emisivitas harus dikalibrasi dengan benar agar data suhu yang dihasilkan mewakili kondisi sebenarnya dari objek yang diamati. Persamaan Hukum Stefan - Boltzmann untuk perhitungan energi radiasi termal dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P = e \times \sigma \times T^4 \quad 2.1$$

Dari persamaan ini, nilai emisivitas (e) dapat dihitung dengan mengubah rumus menjadi

$$e = \frac{P}{\sigma \times T^4} \quad 2.2$$

Dimana

P : Energi termal yang dipancarkan oleh suatu permukaan (W/m²)

e : Emisivitas dari bahan atau objek yang diukur

σ : Konstanta Stefan - Boltzmann, dengan nilai 5,672 x 10⁻⁸W/m²K⁴

T : Suhu mutlak benda dalam satuan Kelvin

2.2.6 Thermovisi

Pemeriksaan dengan menggunakan alat *Thermal Imager* disebut dengan Thermovisi. Pengukuran ini menggunakan sinar *infrared* yang dipancarkan dari alat *thermal imager* sehingga pada layar tampilan bisa menampilkan suhu dari peralatan yang diukur. Serta jika *thermal imager* menunjukkan hasil pengukuran suhu yang buruk atau nilai suhu

terlalu tinggi / tidak normal, maka perlu dilakukan penanganan pada peralatan tersebut.

Nilai emissivity yang diamati berkisar antara 0 sampai 1. Emisivitas merupakan kemampuan suatu jenis permukaan material untuk memancarkan panas. *References Standard Material* (RSM) emisivitas untuk aluminium sendiri adalah 0.5[19].

Pengukuran thermovisi dilakukan berdasarkan perbedaan suhu antara dua titik yang dibandingkan atau suhu relatif terhadap lingkungan sekitarnya. Pengukuran thermovisi dilakukan dengan membandingkan suhu konduktor dan suhu pada klem sambungan. Konduktor adalah media penghantar arus listrik dan klem sambungan adalah titik koneksi antara dua konduktor atau dengan perangkat listrik lainnya. Klem merupakan titik paling rentan terjadi peningkatan suhu terutama jika memiliki sambungan atau kualitas bahan yang kurang sempurna.

Pengukuran suhu thermovisi menggunakan standar delta T (ΔT), yaitu perbedaan suhu antara klem sambungan dengan konduktor.

$$\Delta T = \left(\frac{I_{Maks}}{I_{\text{Saat thermovisi}}} \right)^2 \times (T_{\text{Klem}} - T_{\text{Konduktor}}) \quad 2.3$$

Dimana

- ΔT : Selisih suhu antara klem sambungan dengan konduktor dalam satuan Celcius ($^{\circ}\text{C}$)
- I_{Maks} : Arus maksimal yang pernah dicapai oleh peralatan sebelum dilakukan pengukuran suhu
- $I_{\text{Saat thermovisi}}$: Arus yang dicapai saat dilakukan pengukuran suhu
- T_{Klem} : Suhu yang dicapai pada klem saat dilakukan pengukuran
- $T_{\text{Konduktor}}$: Suhu yang dicapai pada konduktor saat dilakukan pengukuran

Setelah nilai ΔT didapatkan, hasilnya dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan komponen tersebut berada dalam kondisi normal atau tidak[20]. Berdasarkan dari hasil perhitungan menggunakan rumus diatas, kondisi peralatan mampu dikategorikan kedalam beberapa kelompok seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Parameter dan rekomendasi thermovisi pada klem dan konduktor[12].

Rentang Suhu (°C) (beda suhu pada beban maksimal)	Kategori	Kondisi
0 - 10	A	Kondisi Baik
> 10 - 25	B	Periksa Saat Pemeliharaan
> 25 - 40	C	Rencana Perbaikan (max 30 hari)
> 40 - 70	D	Perbaikan Segera
> 70	E	Kondisi Darurat

2.2.7 Thermal Imager

Dalam penelitian ini, alat yang digunakan untuk mengambil data suhu peralatan adalah *thermal imager* dengan merk Flir E50 seperti pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 *Thermal imager* Flir E50

Spesifikasi dari thermal imager merk Flir E50 yang digunakan sebagai alat untuk mengambil data suhu peralatan ditampilkan pada tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.2 Spesifikasi thermal imager Flir E50

Imaging and optical data	
IR resolution	240 x 180 pixels
MSX resolution	320 x 240 pixels
Thermal sensitivity/NETD	<0.05°C @ +30°C (+86°F) / 50mK
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	25° x 19° / 0.4m (1.31 ft)

Spatial Resolution	1.82 mrad
Image frequency	60 Hz
Focus	Manual
Zoom	2x and 4x digital zoom, including panning
Focal Plane Array (FPA)/Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5 - 13 μ m
Image presentation	
Display	Touch screen, 3.5 in. LCD, 320 x 240 pixels
Auto orientation	Automatic landscape or portrait
Image modes	IR image, visual image, MSX, picture in picture, thumbnail gallery
Multi Spectral Dynamic Imaging	IR image with enhanced detail presentation
Picture in Picture	Scalable IR area on visual image
Measurement	
Object temperature range	-20°C to +120°C (-4°F to +248°F) 0°C to +650°C (+32°F to +1202°F)
Accuracy	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3.6^{\circ}\text{F}$) or $\pm 2\%$ of reading, for ambient temperature 10°C to 35°C (+50°F to 95°F)
Measurement analysis	
Spotmeter	3
Area	3 boxes with max/min/average
Automatic hot/cold detection	Auto hot or cold spotmeter markers within area
Difference temperature	Delta temperature between measurement functions or reference temperature
Emissivity correction	Variable from 0.01 to 1.0 or selected from materials list
External optics/windows correction	Automatic, based on inputs of optics/window transmission and temperature
Measurement corrections	Reflected temperature, optics transmission and atmospheric transmission
Storage of images	

Image storage	Standard JPEG, including measurement data on memory card
Image storage mode	Simultaneous storage of images in IR, visual and MSX
Digital Camera	
Built-in camera	3.1 Mpixel (2048x1536 pixels) and one LED light
Built-in digital lens data	FOV 53° x 41°

2.2.8 Logika Fuzzy

Logika fuzzy diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 melalui teori himpunan fuzzy (*fuzzy set theory*). Berbeda dengan logika klasik yang hanya mengenal dua kondisi, yaitu benar (1) dan salah (0), logika fuzzy memungkinkan suatu nilai memiliki derajat keanggotaan di antara kedua nilai tersebut. Karakteristik ini membuat logika fuzzy mampu merepresentasikan ketidakpastian dan penalaran yang mendekati cara berpikir manusia, sehingga banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang melibatkan data atau kondisi yang tidak pasti [22].

Secara umum, logika fuzzy terdiri atas beberapa metode yang memiliki karakteristik dan mekanisme inferensi yang berbeda. Beberapa metode logika fuzzy yang sering digunakan adalah sebagai berikut [23]:

a. Metode Fuzzy Mamdani

Metode mamdani sering disebut sebagai metode min-max. Metode mamdani diperkenalkan oleh ilmuwan yaitu Ebrahi Mamdani pada tahun 1975. Metode max (*maximum*) merupakan metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy yaitu untuk komposisi aturan. Langkah - langkah dalam melakukan fuzzy Mamdani yaitu sebagai berikut:

1). Pembentukan himpunan fuzzy

Pada tahap ini, input yang di awalnya berupa bilangan tegas (crisp) diubah kedalam bentuk fuzzy. Untuk langkah langkahnya sebagai berikut:

- Menentukan variabel fuzzy.
- Menentukan himpunan fuzzy untuk masing masing variabel (misalnya naik-turun, sedikit-banyak, berkurang-bertambah).
- Menentukan fungsi keanggotaan yang sesuai

- Menghitung nilai keanggotaan dari input ke masing masing himpunan fuzzy.

2). Aplikasi Fungsi Implikasi

Pada tahap ini, aturan fuzzy digunakan untuk menentukan nilai keluaran berdasarkan hubungan IF - THEN. Bentuk aturannya yaitu IF (premis 1) AND (premis 2) THEN (konklusi). Untuk langkah - langkahnya sebagai berikut:

- Menyusun aturan fuzzy berdasarkan kondisi input dan output.

- Menggunakan operator AND (min) untuk menentukan nilai *firing strength*.

- Menghasilkan *output* fuzzy untuk setiap aturan

3). Komposisi Aturan

Tahap ini menggabungkan seluruh hasil implikasi aturan menjadi satu himpunan fuzzy *output*. Untuk langkah - langkahnya sebagai berikut:

- Menggabungkan semua hasil implikasi menggunakan operator OR (max)

- Menghasilkan satu himpunan fuzzy komposit sebagai representasi dari seluruh kontribusi aturan.

4). Defuzzifikasi

Tahap ini mengubah himpunan fuzzy hasil komposisi kedalam satu nilai crisp sebagai hasil akhir keputusan. Metode yang dipakai yaitu metode centroid (titik pusat) dengan langkah - langkah sebagai berikut:

- Menghitung luas dari setiap bagian daerah fuzzy

- Menghitung momen setiap daerah fuzzy

- Menghitung titik pusat (z^*) menggunakan rumus

$$Z^* = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz}$$

2.4

Hasil akhir berupa satu angka crisp.

b. Metode Fuzzy Tsukamoto

Metode Tsukamoto ialah pertambahan dari penalaran monoton.

Aturan yang terbentuk *if-then* pada metode tsukamoto, harus direpresentasikan menggunakan himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan yang monoton. Langkah - langkah dalam melakukan fuzzy Tsukamoto. Langkah langkah dalam menggunakan fuzzy Tsukamoto adalah sebagai berikut:

1) Fuzzifikasi

Pada tahap ini, *input* yang di awalnya berupa bilangan tegas (crisp) diubah kedalam bentuk fuzzy.

2) Menyusun aturan (rule base)

Membentuk aturan IF-THEN sesuai permasalahan. Setiap rule menghasilkan satu nilai predikat α -predikat dan satu nilai z .

3) Menentukan fungsi keanggotaan

Menentukan kurva keanggotaan untuk setiap variabel input dan output. Beberapa jenis kurva yang sering dipakai yaitu linear naik, linear turun, segitiga, trapesium. Output harus berupa fungsi keanggotaan monoton agar bisa dihitung nilai z tiap rule.

- Fungsi keanggotaan linear naik

Fungsi keanggotaan linear naik digunakan untuk menggambarkan kondisi ketika nilai keanggotaan bernilai nol pada batas bawah, kemudian meningkat secara bertahap sampai bernilai satu pada batas atas. Bentuk umum fungsi linear naik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\mu(x) \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad 2.5$$

Keterangan:

$\mu(x)$ = derajat keanggotaan

x = nilai input

a = batas bawah

b = batas atas

- Fungsi keanggotaan linear turun

Fungsi keanggotaan linear turun digunakan untuk menggambarkan kondisi ketika nilai keanggotaan bernilai satu pada batas bawah, kemudian turun secara bertahap sampai bernilai nol pada batas atas. Bentuk umum fungsi linear naik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\mu(x) \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad 2.6$$

- Fungsi keanggotaan segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga digunakan untuk menggambarkan himpunan fuzzy yang memiliki satu titik puncak. Pada fungsi ini, derajat keanggotaan akan naik dari

batas bawah menuju titik puncak, kemudian turun kembali sampai batas atas. Fungsi segitiga umum digunakan dalam sistem fuzzy karena bentuknya sederhana dan mudah diterapkan dalam perhitungan numerik.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 1, & x = b \end{cases} \quad 2.7$$

Keterangan:

a = batas bawah

b = titik puncak

c = batas atas

4) Menghitung α -predikat

Operator yang digunakan untuk AND adalah MIN, jika operator OR adalah MAX. Nilai α inilah yang menunjukkan seberapa kuat rule tersebut aktif

5) Menghitung nilai z untuk setiap rule

Setiap rule Tsukamoto menghasilkan nilai crisp (z) dengan cara memasukkan α -predikat ke fungsi keanggotaan output (yang monoton) lalu menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai z. Namun, pada penelitian ini output berupa kategori kondisi hotspot, sehingga nilai (Z_i) direpresentasikan menggunakan titik tengah dari rentang skor setiap kategori.

6) Menghitung nilai output akhir (defuzzifikasi)

Menggunakan rata - rata terbobot (*weighted average*) menggunakan persamaan

$$z = \frac{\sum (\alpha_i Z_i)}{\sum \alpha_i} \quad 2.8$$

Hasil akhir adalah nilai crisp yang diperoleh dari gabungan semua rule.

c. Metode Fuzzy Sugeno

Metode Sugeno merupakan metode yang mirip dengan Mamdani, letak perbedaannya yaitu pada output tidak berupa himpunan fuzzy, melainkan suatu persamaan linier atau konstanta. Defuzzifikasi yang digunakan pada metode sugeno yaitu dengan mencari nilai rata - rata. Metode Sugeno terdapat dua model yaitu metode orde nol dan metode orde satu. Langkah - langkah yang dilakukan dalam metode fuzzy sugeno adalah:

1) Fuzzifikasi

Pada tahap ini, input yang di awalnya berupa bilangan tegas (crisp) diubah kedalam bentuk fuzzy.

2) Menyusun aturan

Mendefinisikan aturan IF-THEN. Untuk orde nol yaitu If A And B Then C = k, untuk orde satu yaitu If A And B Then $z = p_1x_1 + p_2x_2 + q$. aturan dibentuk sesuai variabel input dan kondisi permasalahan.

3) Menentukan fungsi keanggotaan

Menentukan kurva keanggotaan untuk variabel input. Beberapa kurva yang sering digunakan adalah linear naik, linear turun, segitiga / trapesium. Output tidak menggunakan himpunan fuzzy, tapi rumus matematis.

4) Menghitung α -Predikat

Untuk setiap rule, hitung nilai α menggunakan operator $\alpha = \min(\mu_A, \mu_B)$ dengan nilai α menggambarkan tingkat aktifnya rule tersebut.

5) Menghitung nilai z untuk setiap rule

Cara menghitung nilai z untuk setiap rule tergantung dengan tipenya, jika menggunakan orde nol, output langsung berupa nilai konstanta. Jika menggunakan orde satu, nilai input dimasukkan ke persamaan linear $z = p_1x_1 + p_2x_2 + q$. Dengan setiap menghasilkan satu nilai z.

6) Menghitung output akhir (defuzzifikasi)

Output akhir diperoleh dengan rata - rata terbobot

$$z = \frac{\alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

2.9

Tidak ada proses defuzzifikasi centroid seperti mamdani karena output tiap rule sudah berupa nilai crisp.