BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Listrik sekarang merupakan sudah menjadi kebutuhan masyarkat umum, baik mau gunakan untuk pribadi maupun umum. Dalam menjaga keandalan dan kestabilan dalam pendistribusian listrik PT PLN (Persero) tentunya telah melakukan skema pencegahaan terhadap gangguan apa saja yang bisa terjadi. Untuk pendistribusian tegangan tinggi terdapat dua metode yaitu dengan SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) dan SKTT (Saluran Kabel Tegangan Tinggi) Untuk SKTT diperlukan lapisan isolasi yang baik karena kabel berada di dalam tanah dengan ambience yang cukup ekstrem. Kabel ini dilengkapi dengan duct sebagai penopang jalur kabel. Sistem penyaluran transmisi antar Gardu Induk yang bisa disebut dengan Bay Line yang kemudian masuk ke dalam Busbar Gardu Induk. Bus Bar adalah suatu tempat atau wadah tegangan berkumpul sebelum melewati rangkaian peraltan Gardu Induk dan mengisi beban gardu induk. Untuk pengamanan jalur yang SKTT maupun SUTT menggunakan relay differential yang mempunya jarak < 10 km yang tertera di Surat Direksi PT PLN (Persero). Adapun kelengkapan proteksi antara lain : Circuit Breaker, Current Transformator, Potential Transformator, Transformator, Relay (disatance, differential, over current, ground fault, dll), wiring, dan catu daya AC & DC. Untuk Catu daya AC menggunakan Rectifier 380 V dan Sumber DC menggunakan Bateria 110 Vdc. Dalam melakukukan proteksi ada beberapa syarat yang harus dipenuhi, antara lain :

- **Sensitif :** Mempu mendeteksi gangguan sekecil apapun.
- **Andal :** Siap bekerja bila diperlukan (dependability) dan tidak akan bekerja bila tidak diperlukan (security).
- **Selektif :** Mampu memisahkan daerah/jaringan yang terganggu saja.
- **Cepat :** Mampu bekerja cepat (sesuai settingnya)

2.1 Current Transformator

Current Transformator adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi sebagai alat transformasi arus listrik dari arus primer ke arus sekunder sehingga besaran arusnya berada dalam jangkauan alat ukur dan alat proteksi. [6][7]

Prinsip kerja trafo arus adalah sebagai berikut:

Gambar 2.1 Current Transformator

Fungsi dari trafo arus adalah:

- Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi
- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.

- Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Amp dan 5 Amp

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu:

a). Trafo arus pengukuran

o Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.

o Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan cos φ meter.

b). Trafo arus proteksi

- Trafo arus untuk proteksi, memiliki tingkat kejenuhan cukup tinggi.
- Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.
- Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi dibawah

Pada rancangannya, sebuah Current Transformer (CT) memiliki satu atau lebih gulungan pada sisi sekunder, sehingga sebuah current transformer memilki satu atau lebih output yang masing-masingnya bisa dimanfaatkan sekaligus sesuai dengan kebutuhan, seperti untuk metering, proteksi over current, differential dan lain-lain.

Seperti halnya transformator secara umum, current transformer juga memliki ratio belitan antara sisi primer dan sekunder untuk menghasilkan

perbandingan antara arus yang melewati sisi primer dan arus yang dikeluarkan pada sisi sekunder. Lebih mudahnya, dapat dilihat pada contoh dibawah ini :

Sebuah Current transformer dengan ratio 1000 : 5 , menyatakan bahwa apabila arus yang melewati sisi primer sebesar 1000 A, maka output current transformer (sisi sekunder) adalah sebesar 5 Ampere. Hal ini sesuai dengna ratio perbandingannya yaitu 1000 : 5. Sehingga bila arus yang melewati sisi primer sebesar 500 A, maka sisi sekunder akan mengeluarkan arus sebesar 2,5 A.

Untuk spesifikasi sebuah current transformer, tidak saja ratio CT saja yang perlu diperhatikan, ada beberapa hal yang mesti dipenuhi agar sebuah current transformer dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan yang dibutuhkan pada sebuah jaringan sistim tenaga lisrik, yaitu :

- turns ratio – perbandingan arus disisi primer dengan arus disisi sekunder
- burden - beban normal dalam satuan VA yang dapat disuplay oleh sebuah current transformer
- accuracy factors - batas akurasi pada kondisi steady dan transient
- physical configuration – jumlah belitan pada sisi primer dan sekunder, ukuran, bentuk, dimensi dll yang disesuaikan dengan kondisi dilapangan.

Kesalahan arus atau kesalahan perbandingan adalah kesalahan yang ditimbulkan oleh transformer dalam melakukan pengukuran disebabkan karena adanya kenyataan bahwa aktual perbandingan transformasi adalah tidak sama dengan *perbandingan transformasi pengenal (Rated Transformation Ratio).*

Kesalahan Arus (Current Error) atau kesalahan perbandingan (Ratio Error) diekspresikan dalam persen (%) dan diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut: [6][7]

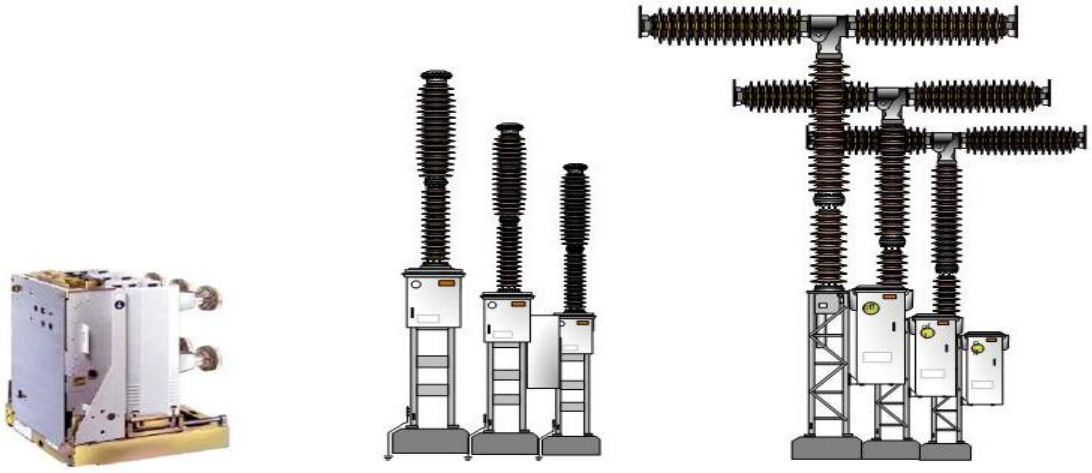
$$Error\ \% = \frac{(Kn\ x\ Is) - Ip}{Ip}\ x\ 100\% \quad \ldots\ldots\ldots\

komunikasi. CVT bersama perangkap gelombang akan digunakan untuk menfilter high-frequency communication signals dari frequency power. Ini akan membentuk jaringan komunikasi

2.3 Circuit Breaker

Gambar 2.3 Circuit Breaker

Circuit Breaker berfungsi sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain. Dalam melakukan pemutusan arus lebih guna menjaga sistem tenaga listrik maupun peralatannya, Circuit Breaker atau Pemutus tenaga menggunakan beberapa media pemutus busur api. Adapaun klasifikasi Pemutus Tenaga dapat dibagi atas beberapa jenis, antara lain berdasarkan tegangan rating/nominal, jumlah mekanik penggerak, media isolasi, dan proses pemadaman busur api jenis gas SF6.[6]



(a) PMT 20KV (b) PMT 150KV (c) PMT 500KV

Gambar 2.4 Macam – macam PMT

. Berdasarkan besar / kelas tegangan (Um) PMT dapat dibedakan menjadi : [6]

- PMT tegangan rendah (Low Voltage)

  Dengan range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3).

- PMT tegangan menengah (Medium Voltage)

  Dengan range tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4).

- PMT tegangan tinggi (High Voltage)

  Dengan range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 – 3.5).

- PMT tegangan extra tinggi (Extra High Voltage)

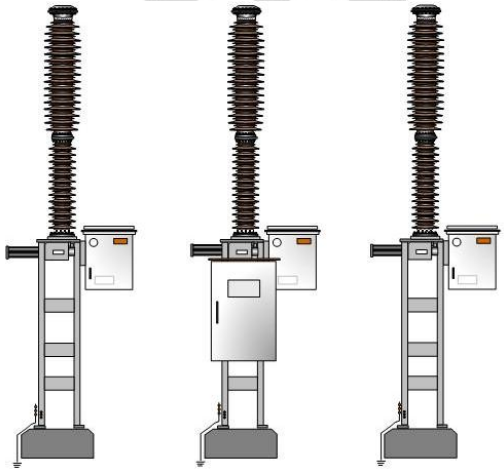
  Dengan range tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6).

Berdasarkan jumlah mekanik penggerak / tripping c*oil*

PMT dapat dibedakan menjadi :

- **PMT *Single Pole***

PMT type ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing *pole*, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar agar PMT bisa reclose satu fasa [6]



Gambar 2.5 PMT *Single Pole*

- **PMT *Three Pole***

PMT jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya di lengkapi dengan kopel mekanik, umumnya PMT jenis ini di pasang pada bay trafo dan bay kopel serta PMT 20 kV untuk distribusi. Fungsi dari PMT ini diharapkan ketika TRIP tidak ada kejadian satu fasa tertinggal dimana hal tersebut menyebabkan ketidak seimbangan bebabn pada system penyaluran tenaga listrik (terdapat pada bay Trafo atau pembangkit) [6]

Gambar 2.6. PMT *Three Pole*

Berdasarkan media isolasiJenis PMT dapat dibedakan menjadi :

- PMT Gas SF6

PMT Gas SF6 (SF6 Circuit Breaker) Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Media gas yang digunakan pada tipe ini adalah gas SF6 (Sulphur hexafluoride). Sifat gas SF6 murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu diatas 150º C, gas SF6 mempunyai sifat tidak merusak metal, plastic dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sebagai isolasi listrik, gas SF6 mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2,35 kali udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan. Sifat lain dari gas SF6 ialah mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, tidak terjadi karbon selama terjadi busur api dan tidak menimbulkan bunyi pada saat pemutus tenaga menutup atau membuka.

Tabel 2.1 Karakteristik gas SF6

Uraian	SATUAN	BATASAN	KETERANGAN
Berat molekol	Gram	146,07	Delle Alsthom
Berat Jenis gas (Gas density) **Pada temp. 20° C.** 1 bar 1 bar 2 bar 6 bar	 Kg/l Kg/l Kg/l Kg/l	 $6,16.10^{-3}$ $6,40.10^{-3}$ $12,50.10^{-3}$ $39,00.10^{-3}$	 IEC 376-1971 Delle Alsthom Delle Alsthom Delle Alsthom
Berat jenis cair (liquit density) Pada temp. 0° C.	Kg/l	1,56	S & S
Suhu kritis (critical temperature)	° **C** ° **C**	45,6 56,5	IEC 376-1971 Delle Alsthom
Berat jenis kritis (critical density)	Kg/l	0,370	Delle Alsthom
Tekanan kritis (critical *pressure*)	Bar	40	Delle Alsthom
Degree of purity, - SF6 - Carbon tetraflouride (CF4)	% % %	Min. 99 max. 0,05 max. 0,05	 S & S IEC 376-1971

Selama pengisian, gas SF6 akan menjadi dingin jika keluar dari tangki penyimpanan dan akan panas kembali jika dipompakan untuk pengisian kedalam bagian/ruang pemutus tenaga. Oleh karena itu gas SF6 perlu diadakan pengaturan tekanannya beberapa jam setelah pengisian, pada saat gas SF6 pada suhu lingkungan. Gas SF6 juga perlu dilakukan berbagai pengujian untuk

memastikan kondisi gas sebagai media pemadam busur api berfungsi dengan baik [6]

Tabel 2.2 Batas tekanan gas SF6 pada pemutus tenaga, pada suhu 20ºC, tekanan atmosphir 760 mmHg.

Merk PMT	**Tekanan Gas SF6 sudah terisi dari pabrik**	**Tekanan Normal (Rate *Pressure*)**	**Tekanan Gas SF6 Pemutus Tenaga pada Pengoperasian**	
			Alarm tahap 1 (SF6 harus ditambah)	**Alarm Tahap 2 (PMT Trip/block)**
	(Bar)	(Bar)	(Bar)	(Bar)
Merlin Gerin	0,03	6	5,2	5
Delle Alsthom	0,203	5,065 + 0,05	4,7	4,58 + 4,62

- PMT Minyak

PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 10 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV. Pada saat kontak dipisahkan, busur api akan terjadi didalam minyak, sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api, karena panas yang ditimbulkan busur api, minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hydrogen yang bersifat menghambat produksi pasangan ion. Oleh karena itu, pemadaman busur api tergantung pada pemanjangan dan pendinginan busur api dan juga tergantung pada jenis gas hasil dekomposisi minyak.

Gas yang timbul karena dekomposisi minyak menimbulkan tekanan terhadap minyak, sehingga minyak terdorong ke bawah melalui leher bilik. Di leher bilik, minyakini melakukan kontak yang intim dengan busur api. Hal ini akan menimbulkan pendinginan busur api, mendorong proses rekombinasi dan

menjauhkan partikel bermuatan dari lintasan busur api. Minyak yang berada diantara kontak sangat efektif memutuskan arus. Kelemahannya adalah minyak mudah terbakar dan kekentalan minyak memperlambat pemisahan kontak, sehingga tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat [6]

- PMT minyak terbagi menjadi 2 jenis, yaitu :

Tabel 2.3 Batas-batas pengusahaan minyak pemutus tenaga

Sifat - Sifat dari minyak Circuit Breaker (1)	Minyak Terpakai (2)	Minyak baru (3)	Tindakan bila kolom 2 & 3 tidak terpenuhi (4)	Standar yang dipakai (5)
Kekuatan dielektrik (tegangan tembus) untuk tegangan kerja : ≤ 60 KV 150 KV ≥ 150 KV 380KV	80 KV/cm 110KV/cm 140KV/cm 180KV/cm	≥200KV/cm	Difilter	IEC 156/1963 IEC 296/1969 IEC 148/1997
Kadar asam (mgKOH/g)	Maks. 1	0,02 - 0,04	0,4 s/d 1 difilter >1 diganti	ASTM D877
Kadar air	Maks. 30	Nol	-	
Viscosity (est) pada 30°C	22	18	Difilter	BS 148/1999 JISe 2320/78
Kadar endapan (%)	0,1	Nol	Difilter	IEC 296/1969
Flash Point	146,1°C (295°F)	-	-	BS 148/1999
Warna Mineral oli Warna Askarela	3,5 max 2,0 max	3,5 max 2,0 max	Difilter Difilter	ASTM D877

1. Sakelar PMT dengan banyak menggunakan minyak (Bulk Oil Circuit Breaker), pada tipe ini minyak berfungsi sebagai peredam loncatan bunga api listrik selama terjadi pemutusan kontak dan sebagai isolator antara bagian-bagian yang bertegangan dengan badan, jenis PMT ini juga ada

yang dilengkapi dengan alat pembatas busur api listrik.
2. Sakelar PMT dengan sedikit menggunakan minyak (Low oil Content Circuit Breaker), pada tipe ini minyak hanya dipergunakn sebagai peredam loncatan bunga api listrik, sedangkan sebagai bahan isolator dari bagian-bagian yang bertegangan digunakan porselen atau material isolasi dari jenis organic.

- PMT Udara Hembus *(Air Blast)*

PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. PMT udara hembus dirancang untuk mengatasi kelemahan pada PMT minyak, yaitu dengan membuat media isolator kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi pemisahan kontak, sehingga pemisahan kontak dapat dilaksanakan dalam waktu yang sangat cepat. Saat busur api timbul, udara tekanan tinggi dihembuskan ke busur api melalui nozzle pada kontak pemisah dan ionisasi media diantara kontak dipadamkan oleh hembusan udara tekanan tinggi itu dan juga menyingkirkan partikel-partikel bermuatan dari sela kontak, udara ini juga berfungsi untuk mencegah restriking voltage (tegangan pukul ulang).

Kontak pemutus ditempatkan didalam isolator, dan juga katup hembusan udara. Pada sakelar PMT kapasitas kecil, isolator ini merupakan satu kesatuan dengan PMT, tetapi untuk kapasitas besar tidak demikian halnya.[6]

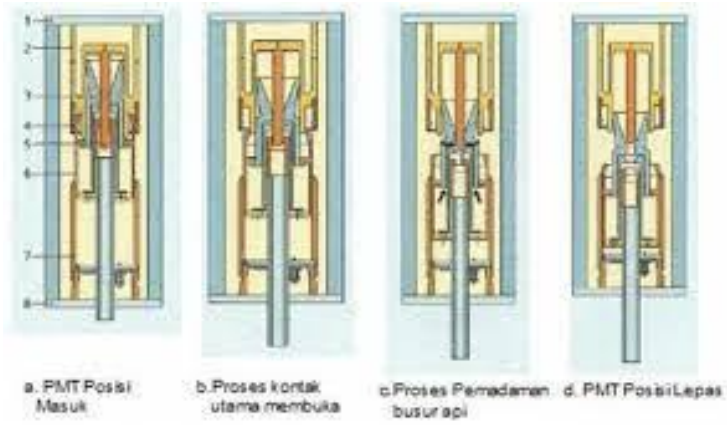
- PMT Hampa Udara *(Vacuum)*

PMT vakum (Vacuum Circuit Breaker) Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus rangkaian bertegangan sampai 38 kV. Pada PMT

vakum, kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum. Untuk mencegah udara masuk kedalam bilik, maka bilik ini harus ditutup rapat dan kontak bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam.

Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi thermis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi proses ionisasi. Akibatnya, tidak ada penambahan elektron bebas yang mengawali pembentukan busur api. Dengan kata lain, busur api dapat dipadamkan.

Cara kerja PMT terisi gas SF6 dengan tekanan kira-kira 5 Kg / cm2, selama terjadi proses pemisahan kontak – kontak, gas SF6 ditekan *(fenomena thermal overpressure)* ke dalam suatu tabung/cylinder yang menempel pada kontak bergerak selanjutnya saat terjadi pemutusan, gas SF6 ditekan melalui *nozzle* yang menimbulkan tenaga hembus/tiupan dan tiupan ini yang memadamkan busur api. [6]



Gambar 2.7 Interupting *chamber* PMT SF6

1. Fixed contacts rod (Rod Kontak diam)
2. Valve (katup)
3. Main contacts (Kontak Utama)
4. Insulating Nozle
5. The Moving Contact suport

Vt. Themal Pressure

Vp.The Compression of the Volume

2.4 Catu Daya

Untuk memenuhi kebutuhan sendiri sebuah GI umumnya membutuhkan sumber tenaga listrik tersendiri. Sumber AC yang berasal dari trafo pemakaian sendiri (PS) yang kapasitasnys relative kecil, tergantung dari besar kecilnya kapasitas GI tersebut (200 kVA, 315 kVA). Sumber tenaga listrik sangat penting sekali demi kelangsungan operasi gardu induk. Dari tingkat kepentingan (urgency) GI yang berbeda-beda terhadap keandalan sistem menyebabkan terdapat sebuah GI yang mempunyai lebih dari satu sistem catu daya.[6]

2.4.1 Catu daya AC

Pasokan catu daya untuk kebutuhan pemakaian sendiri diperoleh dari Trafo Pemakaian Sendiri (PS), dimana sisi primer 20 kV dipasok dari Trafo daya melalui busbar 20 kV. Tegangan sisi sekunder 380 V dari PS-1 masuk ke rel panel pembagi AC sebagai pasokan Utama.Tegangan dapat diatur melalui tap pada trafo PS, dengan catatan apabila dikehendaki perubahan tap, harus dilakukan dalam kondisi padam (Offload tap changer).

2.4.2 Catu daya DC

Sumber tegangan AC 380 Volt diubah oleh rectifier menjadi tegangan DC dan diparalel dengan batere menghasilkan tegangan 110 Vdc dan atau 48 Vdc. Sumber DC digunakan untuk:

• Sumber tenaga untuk alat control, sinyal

• Sumber tenaga untuk motor PMT, PMS, tap changer

• Sumber tenaga untuk differensial/proteksi

• Sumber tenaga untuk penerangan darurat

• Sumber tenaga untuk telekomunikasi Catu Daya dapat diklasifikasikan menurut :

a. Menurut bahan elektrolitnya

1. Batere timah hitam (lead acid strorage battery), elektrolit larutannya asam belerang (H_2SO_4).

• Lead – antimony

• Lead – calcium

2. Batere alkali (Alkaline storage battery) elektrolitnya larutan alkali

b. Menurut kapasitas batere

Kapasitas batere adalah besarnya arus listrik batere (ampere) yang dapat disuplai/dialirkan ke suatu rangkaian luar atau beban dalam waktu tertentu (jam) untuk memberikan tegangan tertentu.

1. Kapasitas rendah/sedang sampai dengan 235 Ah, lama pengosongan 8 jam pada suhu 25oC.

2. Kapasitas tinggi dari 235 s.d. 450 Ah, lama pengosongan 8 jam pada suhu 25oC.

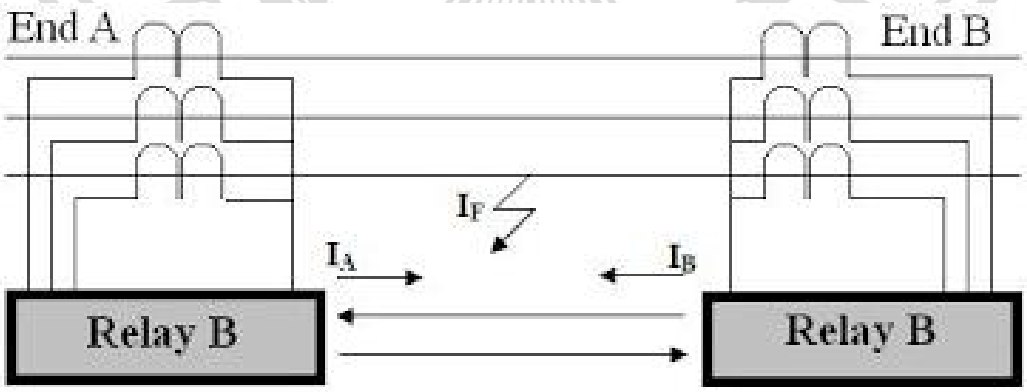
2.5 Relai Differensial

Prinsip kerja dengan cara membandingkan arus dengan Current Transformater Sumber dengan Current Transformator Beban. Relai diffirensial bisa juga dipakai sebagai pengaman saluran transmisi mengadaptasi prinsip kerja differential transformator yang membedakannya adalah daerah yang diamankan cukup panjang sehingga diperlukan : Untuk relay differential line biasanya digunakan dengan jarak < 10 km. [6][8]

- Sarana komunikasi antara ujung-ujung saluran.
- Relai sejenis pada setiap ujung saluran.
- Karena ujung-ujung saluran transmisi dipisahkan oleh jarak yang jauh maka masing-masing sisi dihubungkan dengan kabel pilot
- saluran telekomunikasi : microwave, fiber optic.

Dalam penggunaan relay differential, biasanya menggunakan beberapa parameter diferensial yang umumnya dipergunakan adalah:

- Nilai arus kerja minimum, merupakan setelan arus minimal yang akan mengerjakan relai pada nilai arus restrain = 0
- Nilai arus kerja *high set*, merupakan setelan arus kerja *high set* untuk arus gangguan yang besar (bila dilengkapi).
- Nilai *slope*, merupakan perbandingan pertambahan nilai arus diferensial terhadap pertambahan nilai arus *restaint*.
- *2nd harmonic restraint*, merupakan nilai minimal harmonisa ke-2 yang akan memblok kerja diferensial relai. Harmonisa ke-2 ini merupakan parameter ada tidaknya *inrush current*. Karena sifatnya memblok kerja diferensial maka, harus diperhatikan nilai setelan akan memblok kerja diferensial ketika terjadi gangguan.
- *5th harmonic restraint*, merupakan nilai minimal harmonisa ke-5 yang akan memblok kerja diferensial relai. Harmonisa ke-5 ini merupakan parameter ada tidaknya *over* eksitasi pada transformator.



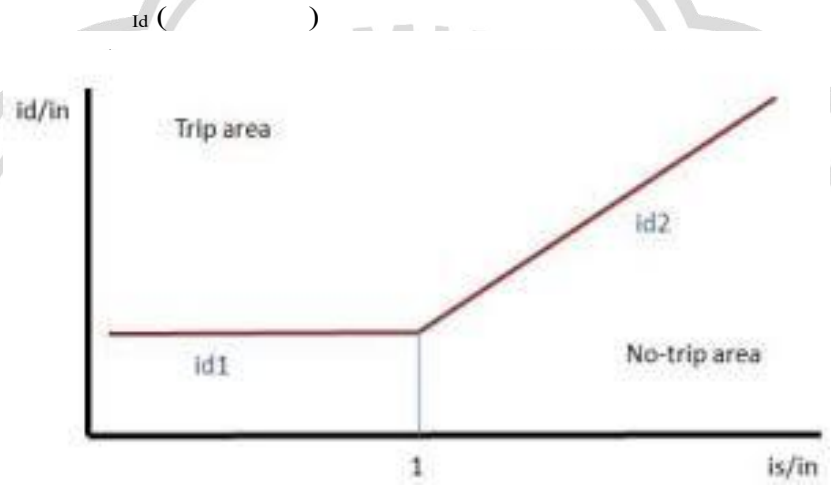
Gambar 2.8 rangakaian pemasangan Line Current Differential

– Tanpa gangguan atau gangguan eksternal : IA + IB = 0

– Keadaan gangguan internal : IA +IB ≠ 0 (= IF)

2.5.1 Perhitungan Matematis *Setting* Rele Diferensial

Perhitungan *setting* rele diferensial tersebut memerlukan rumus untuk mencari nilai *rasio CT* pada trafo dengan memperhitungkan nilai pada arus nominal dan arus rating, selanjutnya menghitung nilai *eror missmatch*, menentukan arus *sekunder* CT, arus *diferensial*, arus *penahan*, *persentase slope*, arus *setting rele diferensial*, serta perhitungan saat terjadi gangguan terhadap rele diferensial.[2]



Gambar 2.9 Karakteristik Relay Differensial

2.5.2 Perhitungan pada Rasio CT

Perhitungan rasio CT, pertama menentukan arus nominal dari sisi primer dan sekunder terlebih dahulu kemudian arus rating. Arus rating digunakan untuk penentuan nilai rasio CT.[2][3]

Rumus arus ratting dan arus nominal :

$$I\ ratting = 110 \times Inominal \tag{2.2}$$

$$Inominal = \frac{S}{\sqrt{3}\ x\ v} \tag{2.3}$$

Dimana :

S : Daya yang disuplai (MVA)

V : Tegangan pada sisi primer dan sisi sekunder (kV)

2.5.3 Perhitungan Error Mismatch

Error Mismatch adalah kesalahan dalam membaca perbedaan arus dan tegangan di sisi primer dan sekunder. Error Mismatch dapat ditentukan dengan membandingkan rasio CT ideal dengan yang ada dipasaran, dengan pertimbangan tidak melebihi 5% dari besar rasio CT yang dipilih (Oxiandra, 2016). Merupakan hasil kesalahan matematis dalam perbandingan arus dan tegangan disisi primer dan sekunder transformator. [2][3]

Rumus menentukan Error Mismatch :

$$\frac{Ratio\ CT2}{Ratio\ CT1} = \frac{Vp}{Vs} \tag{2.4}$$

$$CT1\ (ideal\ ) = Ratio\ CT2\ x\ \frac{Vs}{Vp} \tag{2.5}$$

$$CT2\ (ideal\ ) = Ratio\ CT1\ x\ \frac{Vp}{Vs} \tag{2.6}$$

$$\text{Error mismatch} = \frac{CT\ ideal}{CT\ Terpasang}\ x\ 100\% \tag{2.7}$$

Dimana :

CT Ideal : Trafo arus yang ideal

CT terpasang : Trafo arus beban terpasang

V_p dan V_s : Tegangan sisi Primer dan Sekunder

Pembahasan dari perhitungan yang diperoleh CT ideal dengan nilai standar yang ditentukan yaitu senilai < 5%.

2.5.4 Perhitungan pada Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus keluar dari trafo arus. Dalam perhitungan arus sekunder pada CT dengan perbandingan rasio CT dikalikan dengan arus nominal. [2][3]

Rumus untuk menentukan Arus Sekunder CT :

$$Is = \frac{1}{ratio\ ct}\ x\ I\ nominal \tag{2.8}$$

2.5.5 Perhitungan Arus Diferensial

Arus yang merupakan hasil pengurangan dari arus sekunder CT pada sisi primer dan sisi sekunder. [2][3]

Rumus untuk mencari arus diferensial :

$$Idiff = I2 - I1 \tag{2.9}$$

Dimana :

i_{dif} : Arus Diferensial (A)

i_2 : Arus sekunder CT_2 pada sisi sekunder (A)

i_1 : Arus sekunder CT_1 pada sisi primer (A)

Pembahasan dari perhitungan yaitu arus diferensial (i_{dif}) merupakan hasil pengurangan dari arus sekunder CT pada sisi tegangan sekunder dan tegangan primer.

2.5.6 Perhitungan Arus Penahan

Arus penahan merupakan penambahan dari hasil arus sekunder pada CT_1 dan arus sekunder pada CT_2 dibagi dengan 2 yang telah disetarakan ke harga pu. [2][3]

Rumus untuk menentukan Arus Penahan (i_r):

$$Ir = \frac{I1+I2}{2} \tag{2.10}$$

Dimana :

i_r : Arus Penahan (A)

i_1 : Arus sekunder pada CT_1

i_2 : Arus sekunder pada CT_2

2.5.7 Perhitungan *Persentase Slope*

Merupakan pembagian nilai arus differensial dengan nilai arus restrain dan menghasilkan *persentase slope*, pada *slope 1* dan *slope 2*. Slope 1 akan menentukan arus diferensial dan restrain pada kondisi normal dan memastikan sensitivitas rele pada saat internal fault dengan arus gangguan yang kecil. Slope 2 berguna supaya rele tidak kerja oleh gangguan eksternal yang berarus sangat besar sehingga salah satu CT mengalami saturasi. Di set dengan slope 2 lebih dari 50 % [2][3]

Rumus untuk menentukan *persentase slope 1* :

$$Slope\ 1 = \frac{Id}{Ir}\ x\ 100\% \tag{2.11}$$

Untuk menentuka Slope 2 menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Slope\ 2 = \left(\frac{Id}{Ir}\ x\ 2\right) x\ 100\% \tag{2.12}$$

Dimana :

Slope 1 : setting kecuraman 1 (%)

Slope 2 : setting kecuraman 2 (%)

i_d : Arus diferensial (A)

i_r : Arus penahan (A)

2.5.8 Perhitungan Arus *Setting* Rele Diferensial

Arus *setting* rele diferensial yaitu hasil dari nilai persentase slope1 dikalikan dengan arus penahan. [2][3]

Rumus untuk menentukan arus *setting* pada rele diferensial :

$$Isett = Islope1 \ x \ Ir \quad (2.13)$$

2.5.9 Gangguan Hubung Singkat

Pada perhitungan gangguan ini digunakan untuk memberikan perkiraan apakah relay differensial akan bekerja atau tidak terhadap arus gangguan yang diberikan dengan. Perhitungan gangguan dapat dilakukan dengan persamaan :[2][3]

$$Ifault = \ If \ x \ Rasio \ CT \quad (2.14)$$

$$I1fault = \frac{Ifault\ relay}{I1} \quad (2.15)$$

$$I2\ fault = \frac{Ifault\ relay}{I2} \quad (2.16)$$

$$Id = I2 - I1fault \quad (2.17)$$

$$Id = I2\ Fault - I1 \quad (2.18)$$

2.6 Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)

merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP ini awalnya dibuat

dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas kearnanan fasilitas nuklir di Arnerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara real time, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (one line diagram) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aiiran daya, hubung singkat, starting motor, trancient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

2.7 Software Matlab

Matlab adalah singkatan dari MATrix LABoratory, merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Mathwork Inc. yang hadir dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain yang sudah ada lebih dahulu seperti Delphi, Basic maupun C++. Matlab merupakan bahasa pemrograman level tinggi yang dikhususkan untuk kebutuhan komputasi teknis, visualisasi dan pemrograman seperti komputasi matematik, analisis data, pengembangan algoritma, simulasi dan pemodelan dan grafik-grafik perhitungan Pada awalnya Matlab dibuat untuk memberikan kemudahan mengakses data matrik pada proyek LINPACK dan EISPACK. Saat ini matlab memiliki ratusan fungsi yang dapat digunakan sebagai problem solver mulai dari simple sampai masalah

-masalah yang kompleks dari berbagai disiplin ilmu.

Dalam lingkungan perguruan tinggi teknik, Matlab merupakan perangkat

standar untuk memperkenalkan dan mengembangkan penyajian materi matematika, rekayasa dan kelimuan. Di industri, MATLAB merupakan perangkat pilihan untuk penelitian dengan produktifitas yang tinggi, pengembangan dan analisanya. Kegunaan MatLab secara umum adalah sebagai berikut:

a) Matematika dan komputasi,

b) Perkembangan algoritma,

c) Pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototype,

d) Analisa data, eksplorasi dan visualisasim

e) Pembuatan aplikasi, termasuk pembuatan antaramuka grafis.

2.8 Artificial Intelegent

Artificial Intelegent adalah kecerdasan buatan yang dibuat oleh manusia untuk mesin maupun robot guna dapat mengambil tindakan ketika telah diberi sebuah pilihan untuk mengambil sebuah keputusan, seperti contoh ; mesin dan robot. Untuk pengembangan industri dengan perluasan sistem tenaga; stabilitas, penguatan, keandalan, kemajuan teknis, seleksi dan respons dinamis dari sistem tenaga sangat penting. Dengan pertumbuhan sistem tenaga, kompleksitas dalam jaringan meningkat pesat. Sebagai konsekuensi dari analisis sistem tenaga ini dengan teknik konvensional dan kesimpulan dari data yang diperoleh, proses untuk informasi, manajemen perangkat jarak jauh dan utilitas menjadi lebih rumit dan memakan waktu. Adapun metode dalam penerapan kecerdasan Artificial Intelegent :

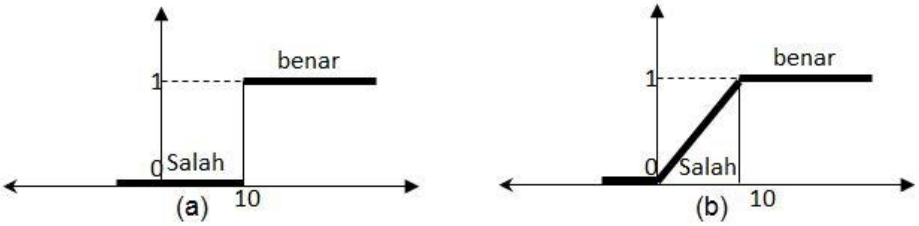
2.8.1 Fuzzy

Sebuah metode yang pertama kali ditemukan oleh ilmuwan berkebangsaan

Amerika pada Tahun 1965 bernama Lotfi A. Zadeh, seorang profesor dari University of California. Fuzzy logic memiliki derajat keanggotaan dalam rentang 0 (nol) hingga 1 (satu), berbeda dengan logika digital yang hanya memiliki dua nilai yaitu 1 (satu) atau 0 (nol). Logika fuzzy digunakan untuk menerjemahkan suatu besaran yang diekspresikan menggunakan bahasa (linguistic), misal besaran kecepatan laju kendaraan yang diekspresikan dengan pelan, agak cepat, cepat dan sangat cepat. Adapun alasan menggunakan Fuzzy Logic sebagai metode yaitu :

1. Konsep logika Fuzzy mudah dipahami. Konsep matematis yang mendasari penalaran fuzzy sangat sederhana dan mudah dimengerti.
2. Logika fuzzy sangat fleksibel
3. Logika fuzzy memeliki tolerensi terhadap data yang tidak tepat
4. Logika fuzzy dapat bekerja sama dengan teknik-teknik konvensional
5. Logika fuzzy dapat dimodelkan dengan bilangan non linier yang sangat komplek.

Fuzzy logic dapat mengolah nilai yang tidak pasti berupa batasan, seperti “sangat”, “sedikit”, “kurang lebih”. Kemampuan ini yang menyebabkan fuzzy logic banyak digunakan pada system pengambil keputusan yang handal dan cepat. Dalam teori logika fuzzy sebuah nilai bisa bernilai benar dan salah secara bersamaan namun berapa besar kebenaran dan kesalahan suatu nilai tergantung kepada bobot keanggotaan yang dimilikinya. Perbedaan antara kedua jenis logika tersebut adalah : logika tegas memiliki nilai tidak=0.0 dan ya=1.0, sedangakan logika fuzzy memiliki nilai antara 0.0 hingga 1.0. Secara grafik perbedaan antara logika tegas dan logika fuzzy ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :dibawah ini :



Gambar 2.10 Perbandingan antara logika Crisp dengan Fuzzy

Pada gambar diatas, gambar (a) merupakan contoh logika tegas (Crisp Logic), sedangkan gambar (b) merupakan logika fuzzy. Pada gambar (a) apabila X lebih dari atau sama dengan 10 baru dikatakan benar yaitu bernilai Y=1, sebaliknya nilai X yang kurang dari 10 adalah salah yaitu Y=0. Maka angka 9 atau 8 atau 7 dan seterusnya adalah dikatakan salah. Sedangkan pada gambar (b) nilai X = 9, atau 8 atau 7 atau nilai antara dan 10 adalah dikatakan ada benarnya dan ada juga salahnya.

2.8.2 Operasi pada Himpunan *Fuzzy*

Ada beberapa operasi yang didefenisikan secara khusus untuk mengkombinasikan dan memodifikasi himpunan *fuzzy*. Nilai keanggotaan sebagai hasil dari operasi 2 himpunan sering dikenal dengan nama *fire strength* $\propto-$. Ada 3 operator dasar yang diciptakan oleh Zadeh, yaitu : AND, OR dan NOT.

a. Operator AND (DAN)

Operator ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan $\propto-$ sebagai hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan. $\mu A \cap B = \min(\mu A(x), \mu B(y))$

b. Operator OR (ATAU)

Operator ini berhubungan dengan operasi union pada himpunan $\propto-$ sebagai hasil operasi dengan operator OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan-himpunan yang

bersangkutan. $\mu_{AUB} = \max(\mu_A(x), \mu_B(y))$

c. Operator NOT (KOMPLEMEN)

Operator ini berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan ∝ − sebagai hasil operasi dengan operator NOT diperoleh denganmengurangkan nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1. μ_A **= 1-** $\mu_A(x)$

2.8.3 Himpunan *Fuzzy*

Pada himpunan tegas (*crisp*), nilai keanggotaan suatu intem x dalam suatu himpunan A, yang sering ditulis dengan μA[x] memiliki dua kemungkinan, yaitu :

a. Satu (1), yang berarti bahwa suatu intem menjadi anggota dalam satu himpunan

b. Nol (0) yang berarti bahwa suatu intem tidak menjadi anggota dalam suatu himpunan.

Ada beberapa yang perlu diketahui dalam memahami sistem *logika fuzzy* yaitu :

1 Variabel *fuzzy ,yaitu* Variabel *fuzzy* merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*. Contoh : umur, temperatur, permintaan, dan lain-lain.

2. Himpunan *fuzzy ,yaitu* Himpunan *fuzzy* merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel *fuzy*.

Himpunan *fuzzy* memiliki atribut, yaitu :

a. Linguistik

Yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti : MUDA, PAROBAYA, TUA.

b. Numeris

Yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel seperti : 50, 25, 45, dsb.

c. Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk

dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya. Contoh : semesta pembicaraan untuk variabel umur : [0,100]

d. Domain

Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy*.

Contoh :

a. MUDA = [0,40] artinya seseorang dikatakan muda dengan umur 0 hingga 40

b. PAROBAYA= [30,50] artinya seseorang dikatakan parobaya dengan umur 30 hingga 50

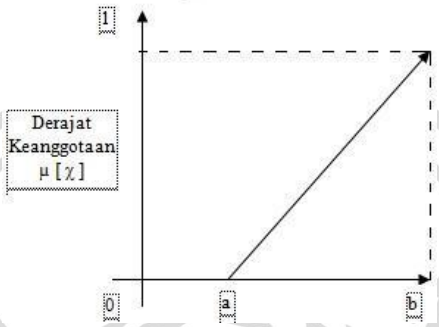
c. TUA = [40,+∞] artinya seseorang dikatakan tua dengan umur 40 hingga +∞

2.8.4 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi yang bisa digunakan :

a. Representasi Linear

Pada representasi *linear*, pemetaan *input* ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai sebuah garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang kurang jelas.



Gambar 2.11 Grafik representasi linear naik

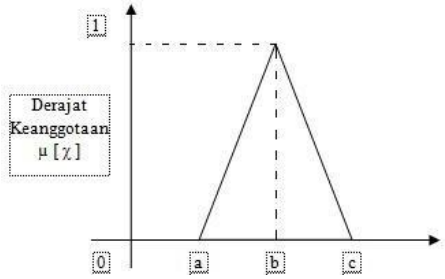
$$\mu[\chi] = \begin{cases} 0; & \chi \leq a \\ (\chi - a)/(b - a); & a \leq \chi \leq b \\ 1; & \chi \geq b \end{cases} \quad (2.19)$$

Representasi fungsi keanggotaan untuk linear turun dapat dilihat pada gambar 2.20 dan rumus dibawah ini :

$$\mu[\chi] = \begin{cases} (b - \chi)/(b - a); & a \leq \chi \leq b \\ 0; & \chi \geq b \end{cases} \quad (2.20)$$

b. Representasi Kurva Segitiga

Kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis (*linear*). Nilai-nilai disekitar b memiliki derajat keanggotaan turun cukup tajam (menjauhi 1)



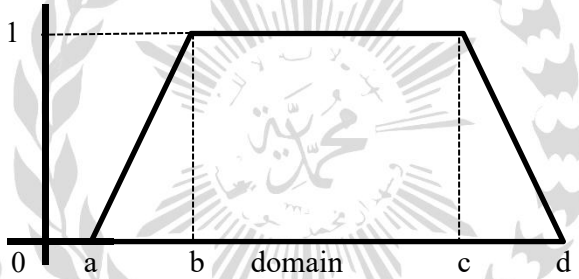
Gambar 2.12 Reprensi Kurva Segitiga

$$\mu[X] = \begin{cases} (x - a) / (b - a) ; & a \le x \le b \\ 0; & x \le a \text{ atau } x \ge c \\ (c-x)/(c-b); & b \le x \le c \end{cases} \quad (2.21)$$

c. Representasi Kurva Trapesium

Kurva segitiga pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1.

derajat keanggotaan $\mu(x)$



Gambar 2.13 Representasi Kurva Trapesium

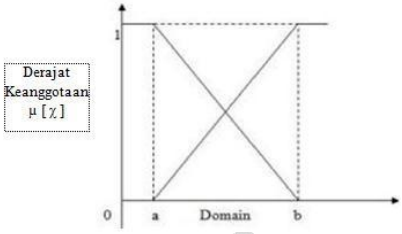
Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \le a \text{ atau } x \ge d \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}; & a \le x \le b \\ 1; & b \le x \le c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)}; & c \le x \ge d \end{cases} \quad (2.22)$$

d. Representasi Kurva Bentuk Bahu

Daerah yang terletak di tengah-tengah suatu variabel yang direpresentasikan dalam bentuk segitiga, pada sisi kanan dan kirinya akan naik turun. Tetapi terkadang salah satu sisi dari variabel tersebut tidak mengalami

perubahan. Himpunan *fuzzy* "bahu", bukan segitiga, digunakan untuk mengakhiri variabel suatu daerah *fuzzy*.



Gambar 2.14 Representasi Kurva Bahu

$$\mu[\chi] = \begin{cases} 0; & \chi \leq b \\ (b-\chi)/(b-a); & a \leq \chi \leq b \\ 1; & \chi \geq a \\ 0; & \chi \leq a \\ (\chi-a)/(b-a); & a \leq \chi \leq b \\ 1; & \chi \geq b \end{cases} \quad (2.23)$$

2.8.5 Implikasi *Fuzzy*

Proposisi *fuzzy* yang sering digunakan dalam aplikasi teori *fuzzy* adalah implikasi *fuzzy*. Bentuk umum suatu implikasi *fuzzy* adalah:

dengan *x* dan *y* adalah variabel linguistik, *A* dan *B* adalah predikat-predikat *fuzzy* yang dikaitkan dengan himpunan-himpunan *fuzzy A* dan *B* dalam semesta *X* dan *Y* berturut-turut. Proposisi yang mengikuti kata "jika" disebut sebagai antiseden, sedangkan proposisi yang mengikuti kata "maka" disebut sebagai konsekuen (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).

Secara umum, ada dua fungsi implikasi yang dapat digunakan, yaitu:

a. Min (minimum)

Pengambilan keputusan dengan fungsi minimum, yaitu dengan cara mencari nilai minimum berdasarkan aturan ke-*i* dan dapat dinyatakan dengan:

$$\alpha_i = \mu_{Ai}(x) \cap \mu_{Bi}(x) = \min\{\mu_{Ai}(x), \mu_{Bi}(x)\} \quad (2.24)$$

Keterangan:

α_i = nilai minimum dari himpunan kabur A dan B pada aturan ke-*i*

$\mu_{Ai}(x)$ = derajat keanggotaan *x* dari himpunan kabur A pada aturan ke-*i*

$\mu_{Bi}(x)$ = derajat keanggotaan *x* dari himpunan kabur B pada aturan ke-*i*

b. Hasil Kali (*dot*)

Pengambilan keputusan dengan fungsi hasil kali yang didasarkan pada aturan ke-*i* dinyatakan dengan:

$$\alpha_i . \mu_{ci}(Z) \tag{2.25}$$

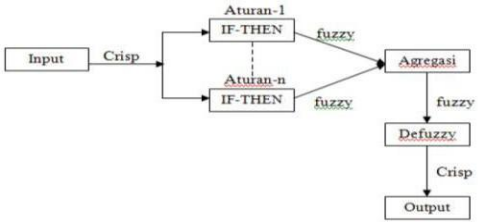
Keterangan:

α_i = nilai minimum dari himpunan kabur A dan B pada aturan ke-*i*

$\mu_{ci}(Z)$ = derajat keanggotaan konsekuen dari himpunan kabur C pada aturan ke-*i*

2.8.6 Fuzzy Inference System

Fuzzy Inferense System (FIS) atau *Fuzzy Inferense Engine* adalah sistem yang dapat melakukan penalaran dengan prinsip serupa seperti manusia melakukan penalaran dengan nalurinya (Alavi, et al., 2010). Langkah pertama dari FIS adalah untuk menetapkan nilai keanggotaan untuk data input dan output (Alidoosti, et al., 2012). Menurut Kusumadewi & Hartati (2010), sistem inferensi *fuzzy* merupakan suatu kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan *fuzzy*, aturan *fuzzy* yang berbentuk IF-THEN, dan penalaran *fuzzy*. Secara garis besar, diagram blok proses inferensi *fuzzy* terlihat pada gambar 2.15 dibawah ini.



Gambar 2.15 Diagram blok sistem inferensi Fuzzy

Sistem inferensi *fuzzy* menerima input *crisp.* Input ini kemudian dikirim ke basis pengetahuan yang berisi n aturan *fuzzy* dalam bentuk IF- THEN. *Fire strengt* akan dicari pada setiap aturan. Selanjutnya pada hasil agregasi akan dilanjutkan dengan *defuzzy* untuk mendapatkan nilai *crisp* sebagai *output* sistem. . Sistem inferensi fuzzy didasarkan pada konsep penalaran monoton. Pada metode penalaran secara monoton, nilai *crisp* pada daerah konsekuen dapat diperoleh secara langsung berdasarkan *fire strength* pada antesedennya. Salah satu syarat yang harus dipenuhi pada metode penalaran ini adalah himpunan *fuzzy* pada konsekunnya harus bersifat monoton (baik monoton naik maupun monoton turun). Salah satu metode FIS yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan adalah metode *Tsukamoto.* Pada metode *Tsukamoto*, implikasi setiap aturan berbentuk implikasi ”sebab-akibat”/ implikasi *“Input-Output”* dimana antara antesden dan konsekuen harus ada hubungannya. Setiap aturan direpresentasikan menggunakan himpunan-himpunan *fuzzy*, dengan fungsi keanggotaan yang monoton.

Metode *Tsukamoto* merupakan perluasan dari penalaran monoton. Setiap konsekuen pada aturan yang berbentuk JIKA-MAKA harus dipresentasikan dengan himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan yang monoton. Sebagai hasilnya, *output* inferensi dari tiap-tiap aturan diberikan secara tegas (*crisp*)berdasarkan α- predikat. Hasil akhirnya diperoleh dengan menggunakan

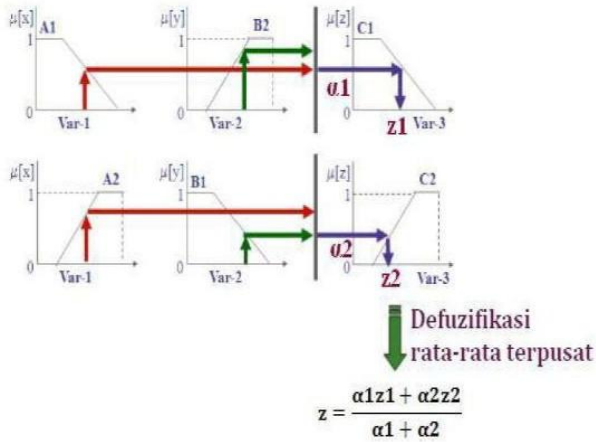
rata-rata terbobot.

Kemudian untuk menentukan hasil tegas *(Crisp Solution)* digunakan rumus penegasan (*defuzifikasi*) yang disebut metode rata-rata terpusat atau metode *defuzifikasi* rata-rata terpusat (*Center Average Deffuzzeyfier*). Untuk lebih memahami metode *Tsukamoto*, perhatikan contoh di bawah ini.

Misalkan ada 2 variabel input, Var-1 (x) dan Var-2 (y), serta variable output, Var-3 (z), dimana Var-1 terbagi atas 2 himpunan yaitu A1 dan A2. Var-2 terbagi atas 2 himpunan B1 dan B2, Var-3 terbagi juga atas 2 himpunan yaitu C1 dan C2 (C1 dan C2 harus monoton). Ada 2 aturan yang digunakan, yaitu :

[R1] IF (x is A1) and (y is B2) THEN (z is C1) [R2] IF (x is A2) and (y is B1) THEN (z is C2)

Pertama-tama dicari fungsi keanggotaan dari masing-masing himpunan *fuzzy* dari setiap aturan, yaitu himpunan A1, B2 dan C1 dari aturan *fuzzy* [R1], dan himpunan A2, B1 dan C2 dari aturan *fuzzy* [R2]. Aturan *fuzzy* R1 dan R2 dapat direpresentasikan dalam gambar 2.16 untuk mendapatkan suatu nilai crips z.



Gambar 2.16 Contoh hasil untuk mendapatkan nilai crip z

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH
GRESIK