



TESIS - BM185407

**PENENTUAN PRIORITAS PROYEK PENGGANTIAN  
TRANSFORMATOR TENAGA DENGAN  
MENGUNAKAN METODE *FUZZY* DAN *AHP***

**SHANTI HARIANTI  
09211750023014**

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery P.,M.Eng.Sc

Departemen Manajemen Teknologi  
Fakultas Bisnis Dan Manajemen Teknologi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2019



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Manajemen Teknologi (M.MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**Shanti Harianti**

**NRP: 09211750023014**

**Tanggal Ujian: 26 Juni 2019**

**Periode Wisuda: September 2019**

Disetujui oleh:

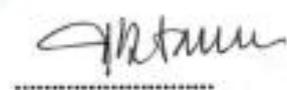
**Pembimbing:**

1. **Prof. Ir. Mauridhi Hery P., M.Eng.Sc**  
**NIP: 19580916 198601 1 001**



**Penguji:**

1. **Ir. I Putu Artama Wiguna, MT. Ph.D**  
**NIP: 19691125 199903 1 001**



2. **Ir. Ervina Ahyudanari, ME, PhD**  
**NIP: 19690224 199512 2 001**



**Kepala Departemen Manajemen Teknologi**  
**Fakultas Bisnis dan Manajemen Teknologi**



✓ **Prof. Ir. Nyoman Pujawan, M.Eng, Ph.D, CSCP**  
**NIP: 196912311994121076**

# **PENENTUAN PRIORITAS PROYEK PENGGANTIAN TRANSFORMATOR TENAGA DENGAN MENGGUNAKAN METODE FUZZY DAN AHP**

Nama mahasiswa : Shanti Harianti  
NRP : 09211750023014  
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery P.,M.Eng.Sc

## **ABSTRAK**

Saat ini listrik merupakan kebutuhan primer yang harus digunakan, karena akan memicu perkembangan ekonomi suatu daerah dan negara. Dalam distribusi tenaga listrik, trafo adalah salah satu aset terpenting karena dapat mengubah level tegangan hingga dapat didistribusikan, juga merupakan aset paling mahal dari semua peralatan di gardu induk. Biaya investasi yang mahal dari sebuah transformator menyebabkan prioritas harus diganti sesuai dengan tingkat urgensi, sehingga biaya yang akan dikeluarkan sebanding dengan pengembalian yang diperoleh. Dengan mengetahui kondisi trafo sejak dini dapat mencegah terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan listrik padam atau mati. KEPDIR 149 tentang penggantian Material Transmisi Utama dan dalam hal ini terdiri dari kriteria yang digunakan untuk melakukan penggantian untuk PLN. Metode fuzzy digunakan untuk menentukan kriteria kondisi teknis suatu trafo yang selanjutnya mengeliminasi kondisi yang baik, sedangkan metode AHP selanjutnya yang digunakan untuk memprioritaskan penggantian trafo berdasarkan kondisi usia operasi dan tingkat risiko.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa usia operasi memiliki pengaruh terbesar karena mereka memiliki bobot 0,6, dan 0,4 untuk kriteria tingkat risiko berdasarkan wawancara manajemen puncak. Sedangkan untuk transformator daya B yakni Trafo 5 Buduran mendapatkan prioritas tertinggi untuk dilakukan penggantian.

Kata kunci: Transformator, Duval, Material Transmisi Utama, Fuzzy, AHP

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DETERMINING PRIORITY OF POWER TRANSFORMER REPLACEMENT PROJECT BY USING FUZZY AND AHP METHOD**

Student Name : Shanti Harianti  
Student Identity Number : 09211750023014  
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery P.,M.Eng.Sc

## **ABSTRACT**

At present electricity is a primary need that must be used, because it will trigger the economic development of a region and country. In electric power distribution, the transformer is one of the most important assets because it can change the voltage level until it can be distributed, it is also the most expensive asset of all equipment in the substation. The expensive investment costs of a transformer cause priority to be replaced in accordance with the level of urgency, so that the costs incurred are proportional to the returns obtained. By knowing the condition of the transformer early on, it can prevent the occurrence of interference that can cause the electricity to turn off or die. KEPDIR 149 concerning replacement of Main Transmission Equipment and in this case the transformer contains the criteria used to make a replacement for PLN. Fuzzy method is used to determine the technical conditions of a transformer which then eliminates good conditions, while the next AHP method is used to prioritize the replacement of transformers based on operating age conditions and risk levels.

The results showed that operating age had the greatest influence because they had a weight of 0.6, and 0.4 for the risk level criteria based on top management interviews. As for the B power transformer, the Buduran 5 Transformer gets the highest priority for replacement.

Keyword: Transformer, Duval, MTU, Fuzzy, AHP

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat, taufik dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini. Penyusunan penelitian dengan judul “Penentuan Prioritas Proyek Penggantian Transformator Tenaga dengan Menggunakan Metode Fuzzy dan AHP.

Penyusunan tesis ini adalah untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan pada Insitut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Magister Manajemen Teknologi, Manajemen Proyek. Penyusunan tesis ini dapat terlaksana dengan baik berkat dukungan dari berbagai pihak.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak maka sulit kiranya bagi penulis untuk menyelesaikan penulisan tesis ini, sehingga kritik, saran yang membangun sangat diharapkan guna proses penyempurnaan penulisan tesis dan penulis berharap tesis ini dapat bermanfaat bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Juni 2019

SHANTI HARIANTI

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT .....	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL .....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Kontribusi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Transformator.....	5
2.1.1 Bagian-bagian utama transformator tenaga:.....	5
2.1.2 Peralatan bantu transformator:.....	8
2.2 Metode DGA .....	12
2.2.1 Basic Gas Ratio .....	12
2.2.2 Metode Segitiga Duval .....	13
2.2.3 Risiko dari kerusakan transformator.....	16
2.3 Multi Criteria Decision Making .....	16
2.4 Analytic Network Process (ANP) .....	17
2.5 Analytical Hierarchy Process (AHP) .....	18
2.5.1 Direct Rating.....	18
2.5.2 Kegunaan Metode AHP.....	19
2.5.3 Langkah Langkah Metode AHP .....	20
2.6 Logika Fuzzy .....	21
2.6.1 Fungsi keanggotaan .....	22
2.6.2 Fuzzy Operator .....	24

2.7	Kriteria Penggantian Transformator berdasarkan KEPDIR 149 Tahun 2013.....	26
2.7.1	Kondisi Teknis .....	26
2.7.2	Umur Operasi .....	26
2.7.3	Tingkat Risiko.....	27
2.8	Data Transformator.....	28
2.9	Posisi Penelitian .....	30
<b>BAB 3 METODA PENELITIAN .....</b>		<b>33</b>
3.1	Diagram alur penelitian.....	33
3.2	Langkah-langkah penelitian.....	33
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>39</b>
4.1	Pengolahan Fuzzy Hasil Uji DGA (kondisi teknis).....	41
4.1.1	Pemodelan Input 1 (%CH <sub>4</sub> ).....	43
4.1.2	Pemodelan Input 2 (%C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ).....	44
4.1.3	Pemodelan Input 3 (%C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) .....	45
4.1.4	Pemodelan Output (Kondisi fisik) .....	46
4.1.5	Penentuan Rule pada Pemodelan Segitiga Duval .....	47
4.1.6	Pemodelan Simulink untuk Metode Segitiga Duval .....	50
4.2	Hasil Simulasi Fuzzy untuk metode segitiga Duval .....	51
4.3	Pengolahan AHP (kriteria usia dan tingkat risiko) .....	53
4.3.1	Kriteria Usia .....	53
4.3.2	Matriks Penilaian secara Langsung (Direct Rating Matrix) .....	54
4.3.3	Normalisasi eigenvector.....	55
4.3.4	Kriteria Tingkat Risiko .....	56
4.3.5	Matriks Penilaian secara Langsung (Direct Rating Matrix) .....	57
4.3.6	Normalisasi eigenvector.....	57
4.4	Uji konsistensi bobot.....	58
4.4.1	Kriteria usia.....	59
4.4.2	Kriteria Tingkat Risiko .....	60
4.5	Prioritas Penggantian .....	60
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>65</b>
5.1	Kesimpulan .....	65

5.2	Saran.....	65
	DAFTAR PUSTAKA.....	67
	BIODATA PENULIS.....	103

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Inti Besi (PT. PLN (Persero), 2014) .....	6
Gambar 2.2 Kumparan/Belitan (PT. PLN (Persero), 2014) .....	6
Gambar 2.3 Minyak Trafo (PT. PLN (Persero), 2014) .....	6
Gambar 2.4 Tangki (PT. PLN (Persero), 2014) .....	7
Gambar 2.5 Konservator (PT. PLN (Persero), 2014) .....	7
Gambar 2.6 Bushing (PT. PLN (Persero), 2014) .....	8
Gambar 2.7 Pendingin/ Fan Radiator (PT. PLN (Persero), 2014).....	9
Gambar 2.8 Tap Changer (PT. PLN (Persero), 2014) .....	9
Gambar 2.9 Silicagel (PT. PLN (Persero), 2014) .....	10
Gambar 2.10 Indicator oil bushing (PT. PLN (Persero), 2014) .....	11
Gambar 2.11 Relai Bucholz (PT. PLN (Persero), 2014) .....	11
Gambar 2.12 Segitiga Duval (Enanv et al., 2010).....	14
Gambar 2.13 (a) AHP (b) ANP (Saaty. T, 2008) .....	17
Gambar 2.14 Contoh hirarki pemilihan keputusan dengan metode AHP (Saaty. T, 2008).....	18
Gambar 2.15 Linier Naik (Zadeh, 1965) .....	22
Gambar 2.16 Linear Turun (Zadeh, 1965) .....	23
Gambar 2.17 Kurva segitiga (Zadeh, 1965) .....	23
Gambar 2.18 Kurva trapesium (Zadeh, 1965).....	24
Gambar 2.19 Operasi OR (Union) (Zadeh, 1965) .....	25
Gambar 2.20 Operasi AND ( <i>Intersection</i> ) (Zadeh, 1965).....	25
Gambar 2.21 Operasi NOT ( <i>Complement</i> ) (Zadeh, 1965) .....	26
Gambar 2.22 Peta Transmisi Wilayah Regional Jawa dan Bali .....	28
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian .....	34
Gambar 3.2 Struktur Organisasi UPT Surabaya.....	35
Gambar 3.3 Penentuan Kriteria secara bertahap .....	37
Gambar 4.1 Blok Diagram Prioritas penggantian transformator.....	39

Gambar 4.2 Batasan Segitiga Duval .....	41
Gambar 4.3 Contoh kasus penilaian menggunakan Segitiga Duval .....	42
Gambar 4.4 Membership Function dari Gas CH <sub>4</sub> .....	44
Gambar 4.5 Membership Function dari Gas C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> .....	45
Gambar 4.6 Membership Function dari Gas C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> .....	46
Gambar 4.7 <i>Membership Function</i> dari Output <i>Fuzzy</i> Segitiga Duval .....	47
Gambar 4.8 Fungsi Rule untuk segitiga duval .....	48
Gambar 4.9 Plot Rule dengan hasil kondisi gas.....	48
Gambar 4.10 Plot <i>Surface</i> Output1 vs input1 vs input2.....	49
Gambar 4.11 Plot <i>Surface</i> Output1 vs input1 vs input3.....	49
Gambar 4.12 Plot <i>surface</i> output1 vs input2 vs input3.....	50
Gambar 4.13 Pemodelan Simulink metode duval.....	50
Gambar 4.14 Hasil Survey Penilaian oleh Manager UPT.....	61
Gambar 4.15 Hasil Survey Penilaian oleh Manajer Perencanaan dan Evaluasi ...	61

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel intepretasi Basic Gas Ratio (Enanv, Medical, Ab, & Bertling, 2010).....	13
Tabel 2.2 Jenis-Jenis Kegagalan dalam Segitiga Duval (Duval, 2006).....	15
Tabel 2.3 Batas Zona Segitiga Duval (Enanv et al., 2010) .....	16
Tabel 2.4 Kriteria umur Operasi Transformator (Direksi, 2013) .....	27
Tabel 2.5 Kriteria tingkat risiko tranformator (Direksi, 2013).....	27
Tabel 2.6 Data transformator yang diuji.....	29
Tabel 2.7 Penelitian Sebelumnya .....	30
Tabel 4.1 Data Hasil Uji DGA Minyak Trafo .....	39
Tabel 4.2 Presentase Gas CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> pada Transformator .....	42
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Fuzzy untuk metode segitiga duval.....	51
Tabel 4.4 Kategori Usia untuk 10 Transfromator dengan Kondisi T3 .....	54
Tabel 4.5 Matriks Direct Rating untuk kriteria Usia .....	55
Tabel 4.6 Normalisasi Matriks kriteria usia .....	55
Tabel 4.7 Kategori Tingkat Risiko untuk 10 Transformator dengan Kondisi T3 .	56
Tabel 4.8 Matriks direct rating untuk kategori tingkat risiko .....	57
Tabel 4.9 Normalisasi Matriks kriteria tingkat risiko.....	58
Tabel 4.10 Hasil uji konsistensi bobot kriteria usia.....	59
Tabel 4.11 Random Indeks (RI) .....	59
Tabel 4.12 Hasil uji konsistensi bobot kriteria tingkat risiko.....	60
Tabel 4.13 Prioritas Penggantian Transformator.....	62

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Trafo merupakan salah satu bagian penting dalam suatu sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengkonversikan daya tanpa mengubah frekuensi listrik. Sebagai peralatan listrik, trafo tidak lepas dari fenomena kegagalan (*failure*), baik kegagalan thermal maupun kegagalan elektrik. Jenis kegagalan yang biasa terjadi pada trafo daya adalah arcing yaitu kerusakan dielektrik yang menimbulkan bunga api listrik, partial discharge yaitu kerusakan dielektrik lingkup lokal pada sebagian kecil isolator listrik akibat tekanan elektrik tegangan tinggi, dan overheating pada sistem isolasi. Kegagalan ini dapat diawali dengan dekomposisi pada bahan isolasi dan pembentukan berbagai kandungan gas yang berbeda. Gas yang terbentuk adalah Hydrogen ( $H_2$ ), Methane ( $CH_4$ ), Ethane ( $C_2H_6$ ), Ethylene ( $C_2H_4$ ), Acetylene ( $C_2H_2$ ), Carbon Monoxide (CO) Dan Carbon Dioxide ( $CO_2$ ). Berbagai metode yang digunakan untuk mengetahui kondisi trafo dari gas tersebut seperti: Roger Rasio, Duval Triangle dll. Pada saat ini UPT Surabaya menggunakan semua metode gas tersebut sehingga dapat menimbulkan adanya perbedaan hasil penilaian. Adanya range yang ditentukan dalam berbagai metode tersebut, terkadang terdapat beberapa kondisi yang tidak diketahui. Dengan menggunakan metode fuzzy dapat dilakukan pendekatan untuk mengakomodir beberapa kondisi yang mungkin timbul karena adanya kesalahan hasil uji DGA, sehingga kondisi bias tersebut dapat memetakan seluruh kondisi gas untuk kemudian mengetahui kondisi kesehatan trafo tersebut.

KEPDIR 149 (Direksi, 2013) merupakan keputusan direksi PT.PLN (Persero) tentang penggantian Material Transmisi Utama (MTU) dalam hal ini transformator berisi tentang kriteria yang dipakai untuk melakukan penggantian tersebut. Kriteria-kriteria tersebut akan dipakai untuk memprioritaskan transformator apa saja yang akan diganti yakni kriteria teknis, umur operasi, serta tingkat risiko. Dengan menggunakan metode fuzzy sebagai penilaian terhadap hasil DGA minyak trafo, terdapat kondisi bias akan dapat memetakan seluruh kondisi gas untuk kemudian mengetahui kondisi kesehatan trafo tersebut. Selanjutnya dari

kondisi teknis tersebut akan mengeliminasi trafo mana saja yang dalam kondisi buruk untuk selanjutnya akan dilakukan proses AHP dengan kriteria umur operasi dan tingkat risiko untuk mengetahui urutan prioritas pengantiannya.

Berdasarkan penelitian (Abu-Siada & Hmood, 2015) penentuan kondisi DGA transformator dengan menggunakan metode fuzzy membandingkan interpretasi DGA dengan metode Roger, IEC, Doerenburg, Duval serta Key Gas menyatakan bahwa dengan menggunakan interpretasi Duval memiliki konsistensi paling tinggi dibandingkan dengan interpretasi lainnya yakni 85%; Roger 52%; IEC 53%; Doerenburg 60%, Key Gas 81%. Berbagai penelitian seperti (Abu-Siada & Hmood, 2015), (Malik, Tarkeshwar, & Jarial, 2012), (Flores, Mombello, Jardini, Rattá, & Corvo, 2011) menentukan kondisi transformator dengan DGA dan menggunakan metode fuzzy sebagai pendekatan baik buruknya. Penentuan kondisi suatu trafo tidaklah menjadi suatu kepastian bahwa trafo tersebut harus segera diganti. Berbagai kriteria juga harus dipetakan serta pembobotannya sehingga dengan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) diharapkan akan dapat menentukan tingkat urgensi trafo yang harus diganti.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Energi listrik yang sudah menjadi kebutuhan primer masyarakat saat ini, menyebabkan keandalan penyaluran tenaga listrik harus dijaga. Transformator merupakan aset yang penting dalam suatu penyaluran. Pembebanan yang tinggi menyebabkan kondisi transformator daya juga tidak selalu dalam kondisi yang baik. Serta keterbatasan biaya investasi yang tinggi untuk penggantian transformator, sehingga tidak semua usulan penggantian trafo dapat dieksekusi segera. Dengan penentuan penggantian transformator yang tepat maka akan menghindarkan dari potensi kehilangan daya untuk penjualan listrik, komplain pelanggan terutama pelanggan dengan kelas Konsumen Tegangan Tinggi (KTT) premium maupun platinum yang secara kontrak tidak dapat padam.

### **1.3 Tujuan**

Tujuan dari proposal ini yakni untuk menentukan prioritas proyek penggantian transformator sesuai dengan kondisi DGA minyak trafo menggunakan metode fuzzy serta kriteria lain pada KEPDIR 149 yang diinginkan manajemen PT. PLN UPT Surabaya menggunakan metode AHP sehingga dapat menentukan prioritas penggantian trafo serta mendukung keandalan energi listrik .

### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini yakni menggunakan sample pengujian minyak trafo pada tahun 2018 pada PT. PLN UPT Surabaya, dengan penentuan kriteria menggunakan KEPDIR 149 (Direksi, 2013) yang merupakan pedoman untuk penggantian MTU dalam hal ini transformator. Serta penentuan bobot untuk kriteria tersebut menggunakan kuisisioner/interview manajemen PT. PLN UPT Surabaya yakni Manajer UPT dan Manajer Perencanaan dan Evaluasi yang akan dijadikan acuan untuk menentukan bobot prioritas penggantian trafo. Pengambilan sample untuk kuisisioner/interview ini didasarkan karena kedua jabatan tersebut memiliki wewenang secara langsung untuk menentukan prioritas penggantian tersebut.

### **1.5 Kontribusi**

Kontribusi yang diharapkan dari hasil penelitian tesis ini adalah membantu perusahaan PT. PLN UPT Surabaya untuk menentukan tingkat prioritas penggantian transformator dengan tepat sehingga penggantian trafo tersebut dapat disesuaikan dengan nilai investasi yang akan diberikan pada PT. PLN UPT Surabaya.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Untuk memahami lebih jelas tesis ini, maka materi-materi yang tertera pada tesis ini dikelompokkan menjadi beberapa sub bab dengan sistematika penyampaian sebagai berikut:

## **BAB 1 PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan kontribusi.

## **BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisikan teori yang berupa pengertian dan definisi yang diambil dari kutipan buku yang berkaitan dengan penyusunan tesis serta beberapa literature review yang berhubungan dengan penelitian.

## **BAB 3 METODA PENELITIAN**

Bab ini membahas tentang bahan penelitian, diagram alir penelitian dan pengujian

## **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang data hasil penelitian dan analisis yang diperoleh dari penelitian

## **BAB 5 KESIMPULAN**

Bab ini berisikan tentang kesimpulan yang diperoleh dari penelitian dan memberikan saran untuk penelitian yang lebih lanjut

## **BAB 2**

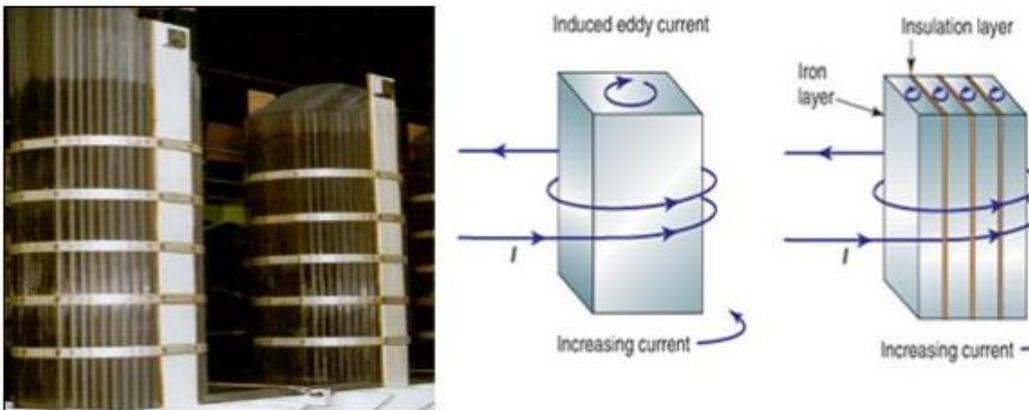
### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Transformator**

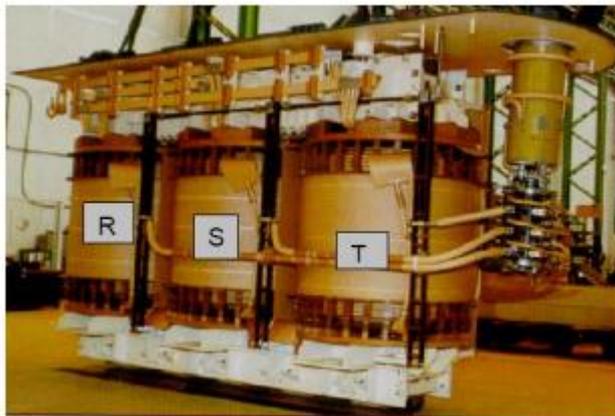
Transformator (Trafo) merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.

##### **2.1.1 Bagian-bagian utama transformator tenaga:**

- Inti besi : Berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.
- Kumparan : Adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain.



Gambar 2.1 Inti Besi (PT. PLN (Persero), 2014)



Gambar 2.2 Kumbaran/Belitan (PT. PLN (Persero), 2014)

- Minyak Trafo : Seluruh kumbaran dan inti besi transformator direndam dalam minyak trafo. Minyak berfungsi sebagai media pemindah panas trafo (pendingin) serta berfungsi sebagai isolasi.



Gambar 2.3 Minyak Trafo (PT. PLN (Persero), 2014)

- Tangki dan Konservator : Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuai minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.



Gambar 2.4 Tangki (PT. PLN (Persero), 2014)



Gambar 2.5 Konservator (PT. PLN (Persero), 2014)

- Bushing : Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.



Gambar 2.6 Bushing (PT. PLN (Persero), 2014)

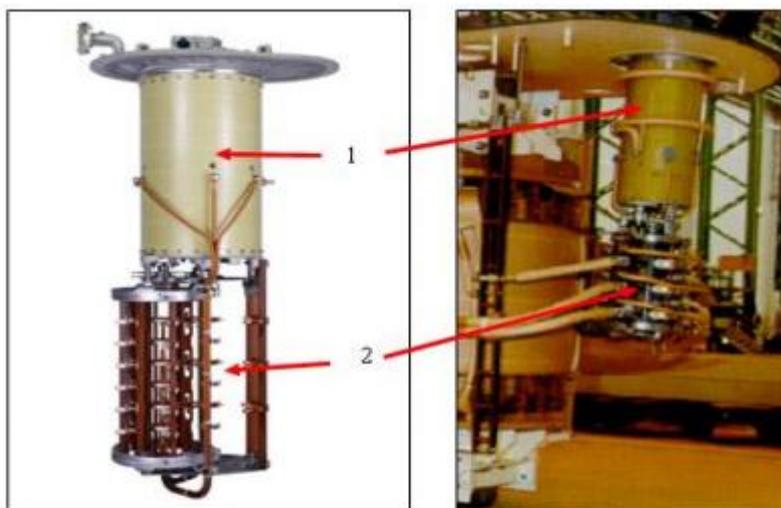
### **2.1.2 Peralatan bantu transformator:**

- Pendingin : Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (di dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu trafo yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan alat/sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator. Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa minyak dan udara. Sedangkan dalam pengalirannya (sirkulasi) dapat berupa alamiah (natural) dan tekanan/paksaan.



Gambar 2.7 Pendingin/ Fan Radiator (PT. PLN (Persero), 2014)

- Tap changer : Alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah.



Keterangan:

1. Kompartemen Diverter Switch
2. Selektor Switch

Gambar 2.8 Tap Changer (PT. PLN (Persero), 2014)

- Alat Pernapasan (Silicagel): Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah, sehingga mengakibatkan adanya pemuaian dan penyusutan minyak trafo. Menyusutnya minyak trafo mengakibatkan permukaan minyak menjadi turun dan udara akan masuk ke dalam tangki. Proses demikian disebut pernapasan trafo. Akibat pernafasan tersebut maka minyak trafo akan bersinggungan dengan udara luar. Untuk mencegah hal ini maka ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan berupa tabung berisi kristal zat hygrokopsis (silicagel).



Gambar 2.9 Silicagel (PT. PLN (Persero), 2014)

- Indikator : Untuk mendeteksi transformator yang beroperasi maka dilengkapi dengan indikator suhu minyak, indikator suhu kumparan, indikator level minyak, indikator sistem pendingin serta indikator kedudukan tap changer.



Gambar 2.10 Indicator oil bushing (PT. PLN (Persero), 2014)

- Peralatan proteksi : Untuk mengamankan transformator yang diakibatkan karena gangguan maka dipasang relai pengaman seperti; Relai differensial, Buchholz, tekanan lebih, relai tangki tanah, relai hubung tanah, relai thermis, relai tekanan lebih, sudden pressure, relai jansen, arus lebih dan Arrester.



Gambar 2.11 Relai Buchholz (PT. PLN (Persero), 2014)

Analisis sampel minyak transformator adalah alat yang berguna untuk memprediksi, dan sarana menentukan kesehatan transformer. Seiring dengan kualitas sampel minyak tes, melakukan pengujian Dissolved Gas Analysis (DGA) dari minyak isolasi sangat berguna dalam mengevaluasi kesehatan transformator. Kerusakan bahan dan komponen isolasi listrik terkait di dalam transformator menghasilkan gas yang terlarut dalam minyak transformator. Identitas gas yang dihasilkan dapat menjadi informasi yang sangat berguna dalam program pemeliharaan preventif serta menentukan kondisi trafo apakah perlu segera diganti karena berpotensi terjadi kegagalan. Ada beberapa teknik untuk mendeteksi gas-gas dan DGA diakui sebagai metode yang paling informatif. Metode ini melibatkan pengambilan sampel minyak dan menguji sampel untuk

mengukur konsentrasi dari gas yang terlarut. Berdasarkan standard IEC 60599 terdapat beberapa metode untuk identifikasi kondisi trafo sbb:

## **2.2 Metode DGA**

DGA adalah salah satu teknik yang paling umum digunakan untuk diagnosis kegagalan secara dini dengan keadaan on-line karena transformator tidak perlu *de-energize*. DGA membutuhkan pengambilan sampel minyak rutin dan teknologi modern untuk pemantauan gas on-line. Langkah kunci dalam menggunakan analisis gas untuk mendeteksi kegagalan dengan benar mendiagnosis kegagalan yang menghasilkan gas. Tekanan listrik atau termal yang tidak normal menyebabkan minyak insulasi memecah dan melepaskan sejumlah kecil gas. Komposisi gas-gas ini tergantung pada jenis kegagalan. Deteksi tingkat gas tertentu yang dihasilkan dalam transformator terisi minyak yang energize seringkali merupakan indikasi pertama yang tersedia dari kerusakan yang dapat menyebabkan kegagalan trafo jika tidak diperbaiki. Kemungkinan mekanisme pembangkitan gas termasuk lengkung, pelepasan korona, percikan energi rendah, pemanasan berlebih karena kelebihan beban berat, dan kegagalan sistem pendinginan paksa. Kerusakan pada transformator yang dipenuhi minyak dapat diidentifikasi menurut gas yang dihasilkan dan gas yang khas atau dominan pada berbagai suhu. Gas-gas ini adalah hidrogen ( $H_2$ ), metana ( $CH_4$ ), ethylene ( $C_2H_4$ ), ethane ( $C_2H_6$ ), acetylene ( $C_2H_2$ ), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida ( $CO_2$ ). Setiap jenis pecahan gas menghasilkan gas yang umumnya mudah terbakar. Peningkatan Total Combustible Gases (TCG) yang berkorelasi dengan peningkatan laju pembangkitan gas dapat menunjukkan adanya salah satu atau kombinasi dari gangguan termal, listrik atau korona. Berbagai metode DGA telah digunakan untuk menilai kondisi trafo (Sun, Huang, & Huang, 2012).

### **2.2.1 Basic Gas Ratio**

Masing-masing dari enam kelas, gangguan mengarah ke pola karakteristik komposisi gas hidrokarbon, yang dapat diterjemahkan ke dalam tabel interpretasi DGA, seperti yang direkomendasikan pada Tabel 2.1 dan berdasarkan penggunaan tiga rasio gas dasar:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Tabel 2.1 Tabel intepretasi Basic Gas Ratio (Enanv, Medical, Ab, & Bertling, 2010)

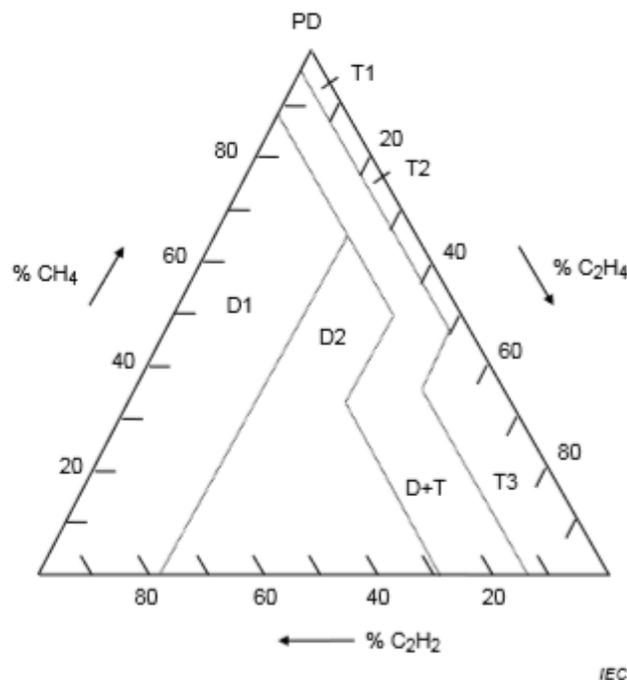
Case	Characteristic fault	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	Partial Discharge	NS	< 0,1	< 0,2
D1	Discharge of Low Energy	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2	Discharge of High Energy	0,6 - 2,5	0,1-1	> 2
T1	Termal Fault $t < 300^0$	NS	> 1 but not NS	< 1
T2	Termal Fault $300 < t < 700^0$	< 0,1	> 0,1	1 – 4
T3	Termal Fault $300 < t > 700^0$	< 0,2	> 0,1	> 4

Contoh umum kesalahan dalam berbagai jenis peralatan (transformator daya, trafo instrumen, dll.), Sesuai dengan enam kasus Tabel 2.1. Beberapa tumpang tindih antara kesalahan D1 dan D2 jelas dalam Tabel 2.1, yang berarti bahwa atribusi ganda D1 atau D2 harus diberikan dalam beberapa kasus hasil DGA. Namun, perbedaan antara D1 dan D2 tetap dipertahankan karena jumlah energi dalam pembuangan dapat secara signifikan meningkatkan potensi kerusakan pada peralatan dan memerlukan tindakan pencegahan yang berbeda. Tabel 2.1 berlaku untuk transformer.

### 2.2.2 Metode Segitiga Duval

Metode Segitiga Duval berdasarkan IEC 60599 (Enanv et al., 2010) menggunakan nilai dari hanya tiga gas  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  dan  $C_2H_2$  dan lokasinya dalam peta segitiga Gambar 2.12. Untuk memplot segitiga, gas diubah menjadi koordinat segitiga. Tiga jenis sesar yang dapat dideteksi adalah prosentasinya tiap gas dalam gas total, gangguan listrik (penonjolan energi tinggi dan rendah), dan gangguan termal (titik panas berbagai rentang suhu). Meskipun metode ini mudah dilakukan, implementasi yang tidak baik dapat

memperoleh diagnosa palsu karena tidak ada wilayah segitiga yang ditetapkan sebagai contoh penuaan normal. Oleh karena itu, sebelum menggunakan metode ini untuk menganalisis transformator yang telah beroperasi selama bertahun-tahun, jumlah gas terlarut yang diperbolehkan harus ditentukan. Masalah yang diidentifikasi didiagnosis dengan menghitung jumlah total tiga gas Duval Triangle ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ , dan  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) dan membagi kuantitas masing-masing gas dengan total untuk menemukan persentase masing-masing gas dari total. Persentase total kemudian diplotkan pada segitiga untuk mendapatkan diagnosis.



where

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = \frac{100x}{x+y+z}$$

for  $x = [\text{C}_2\text{H}_2]$  in microlitres per litre

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = \frac{100y}{x+y+z}$$

for  $y = [\text{C}_2\text{H}_4]$  in microlitres per litre

$$\% \text{CH}_4 = \frac{100z}{x+y+z}$$

for  $z = [\text{CH}_4]$  in microlitres per litre

Gambar 2.12 Segitiga Duval (Enanv et al., 2010)

Tabel 2.2 Jenis-Jenis Kegagalan dalam Segitiga Duval (Duval, 2006)

Simbol	Kegagalan	Keterangan
PD	Partial Discharge	Pelepasan muatan (discharge) dari plasma dingin (corona) pada gelembung gas (menyebabkan pengendapan X-wax pada isolasi kertas) ataupun tipe percikan (menyebabkan proses perforasi/kebolongan pada kertas yang bisa saja sulit dideteksi
D1	Discharge of Low Energy	PD tipe percikan/ spark (menyebabkan perforasi karbon pada isolasi kertas dalam skala yang lebih besar). Arching pada energi rendah memacu perforasi karbon pada permukaan isolasi kertas sehingga muncul banyak partikel karbon pada minyak (terutama akibat pengoperasian tap changer)
D2	Discharge of High Energy	Discharge yang mengakibatkan kerusakan dan karbonisasi yang meluas pada kertas minyak. Pada kasus yang lebih ekstrim terjadi penggabungan metal (metal fussion), pemutusan, (tripping) peralatan dan mengaktifkan alarm gas.
T1	Thermal fault, $T < 300^{\circ} C$	Isolasi kertas berubah warna menjadi coklat pada temperatur $> 200^{\circ} C$ (T1) dan pada parameter $> 300^{\circ} C$ terjadi karbonisasi kertas munculnya formasi partikel karbon pada minyak (T2)
T2	Thermal fault, $300 < T < 700^{\circ} C$	
T3	Thermal fault $T > 700^{\circ} C$	Munculnya formasi partikel karbon pada minyak secara meluas, pewarnaan pada metal ( $200^{\circ} C$ ) ataupun penggabungan metal ( $> 1000^{\circ} C$ )

Tabel 2.3 Batas Zona Segitiga Duval (Enanv et al., 2010)

Limit of Zones				
PD	98% CH <sub>4</sub>			
D1	23% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	13% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
D2	23% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	13% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	40% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	29% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
T1	4% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		
T2	4% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
T3	15% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	50% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		

### 2.2.3 Risiko dari kerusakan transformator

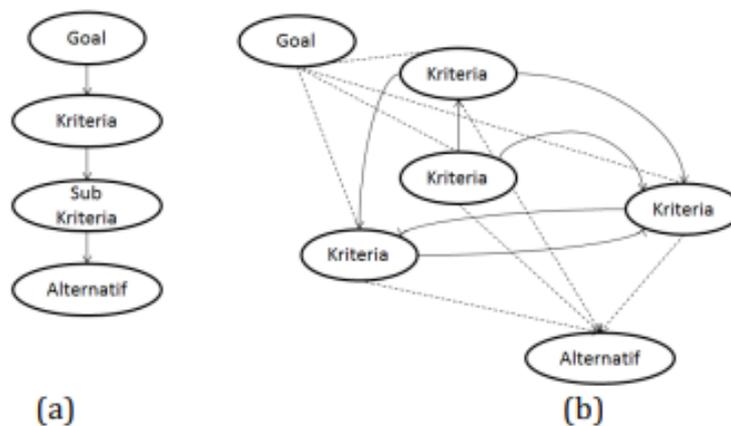
Risiko dari kerusakan transformator yang beroperasi, berdasarkan pada metode DGA tergantung pada tiga parameter utama: jenis gangguan yang terjadi, lokasi dari gangguan (pada minyak atau isolasi kertas), dan banyaknya gas yang terbentuk (konsentrasi dan tingkatnya). Gangguan paling berbahaya yakni: gangguan *arching high energy* D2 pada minyak dan isolasi kertas, gangguan *low energy arching* D1 pada isolasi kertas, dan *hotspot* pada kertas isolasi dari suhu tinggi T3 dan T2. Gangguan yang kurang berbahaya adalah: gangguan *low energy arching* D1 pada minyak, *hotspot* T3 dan T2 pada minyak dan *hotspot* pada kertas isolasi pada suhu rendah. Sedangkan untuk gangguan yang tidak berbahaya: *hotspot* T1 pada minyak, menghasilkan hanya gas dari minyak, *corona partial discharge* PD (setidaknya level sangat tinggi dari hidrogen yang terbentuk), reaksi katalik dengan air, penuaan pada isolasi kertas.

## 2.3 Multi Criteria Decision Making

Multi-Criteria Decision Making (MCDM) adalah suatu metode pengambilan keputusan untuk menetapkan alternatif terbaik dari sejumlah alternatif berdasarkan beberapa kriteria tertentu. Kriteria biasanya berupa ukuran-ukuran atau aturan-aturan atau standar yang digunakan dalam pengambilan keputusan. Secara umum dapat dikatakan bahwa MCDM menyeleksi alternatif terbaik dari sejumlah alternatif (Kusumawardani. S, 2006)

(Janko. W, 2005) dalam (Kusumawardani. S, 2006) menyebutkan terdapat beberapa fitur umum yang digunakan dalam MCDM, yaitu:

1. Alternatif, alternatif adalah obyek-obyek yang berbeda dan memiliki kesempatan yang sama untuk dipilih oleh pengambil keputusan.
2. Atribut, atribut sering juga disebut sebagai kriteria keputusan.
3. Konflik antar kriteria, beberapa kriteria biasanya mempunyai konflik antara satu dengan yang lainnya, misalnya kriteria keuntungan akan mengalami konflik dengan kriteria biaya.
4. Bobot keputusan, bobot keputusan menunjukkan kepentingan relatif dari setiap kriteria,  $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ .
5. Matriks keputusan, suatu matriks keputusan  $X$  yang berukuran  $m \times n$ , berisi elemen-elemen  $x_{ij}$  yang merepresentasikan rating dari alternatif  $A_i$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  terhadap kriteria  $C_j$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ .



Gambar 2.13 (a) AHP (b) ANP (Saaty. T, 2008)

#### 2.4 Analytic Network Process (ANP)

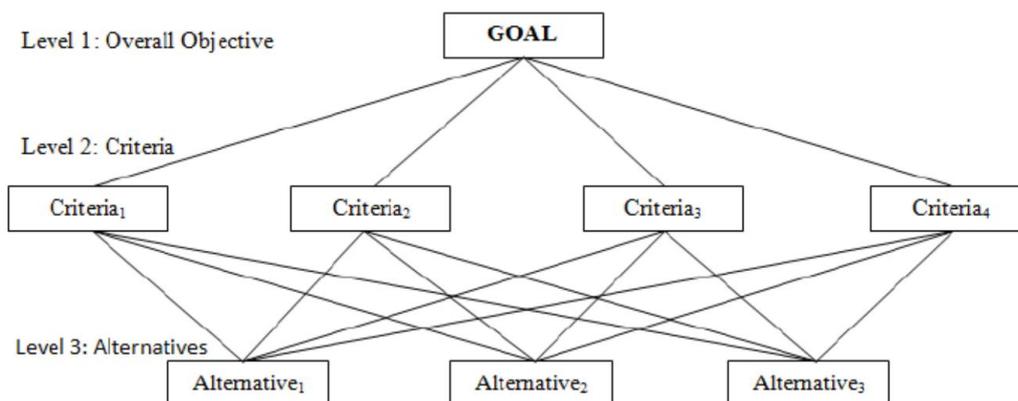
Metode ANP mampu memperbaiki kelemahan AHP berupa kemampuan mengakomodasi keterkaitan antar kriteria atau alternatif. Keterkaitan pada metode ANP ada 2 (dua) jenis, yaitu keterkaitan dalam satu set elemen (inner dependence) dan keterkaitan antar elemen yang berbeda (outer dependence). Adanya keterkaitan tersebut menyebabkan metode ANP lebih kompleks dibanding metode AHP (Saaty. T, 2008).

## 2.5 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Analytical Hierarchy Process (AHP) dikembangkan oleh Thomas L. Saaty dalam periode 1971 – 1975 di Wharton School, University of Pennsylvania. AHP merupakan metode pengambilan keputusan yang melibatkan sejumlah kriteria dan alternatif yang dipilih berdasarkan pertimbangan semua kriteria terkait (Saaty, 2008). Kriteria memiliki derajat kepentingan yang berbeda-beda. Alternatif juga memiliki preferensi yang berbeda pula menurut masing-masing kriteria yang ada. Metode AHP dapat digunakan dalam melakukan pengukuran kriteria yang memiliki dimensi/skala yang berbeda-beda.

### 2.5.1 Direct Rating

Metode direct rating adalah melakukan perbandingan secara langsung dari nilai yang didapatkan pada setiap kriteria yang muncul. Metode ini juga dapat mengurangi tingkat subjektivitas yang mungkin terjadi dengan menggunakan pairwise comparison. Dengan membandingkan setiap nilai dengan pertrafo dan perkriteria maka akan didapatkan ranking prioritas yang diinginkan.



Gambar 2.14 Contoh hirarki pemilihan keputusan dengan metode AHP (Saaty. T, 2008)

AHP adalah metode formal untuk memperoleh peringkat dari perbandingan berpasangan. Nilai perbandingan berpasangan dapat diperoleh dari pengukuran yang sebenarnya seperti usia, tingkat pembebanan dan lainnya atau dari opini subjektif seseorang seperti preferensi. AHP digunakan

di seluruh dunia dalam berbagai pengambilan keputusan, di bidang-bidang seperti pendidikan, industri, dan pemerintah.

Keunggulan utama metode perbandingan berpasangan adalah dapat menghindarkan social-desirability factor, yang sering sulit dihindarkan jika menggunakan metode lain, karena umumnya orang Indonesia cenderung memilih memberikan respon yang dianggap aman, yaitu dalam tengah atau netral, karena orang Indonesia berada di lingkungan yang mengutamakan konformitas sosial. Di samping keunggulan ini, metode mempunyai kelemahan, yaitu memberikan beban kerja terlalu besar bagi penggunanya. Misalnya saja dari 10 item saja, telah menimbulkan 43 perbandingan berpasangan. Jika itemnya ditambah, maka jumlah pasangannya menjadi lebih besar lagi (Saaty. T, 2008)

### **2.5.2 Kegunaan Metode AHP**

Metode AHP membantu memecahkan persoalan yang kompleks dengan menstruktur suatu hirarki kriteria, pihak yang berkepentingan, hasil dan dengan menarik berbagai pertimbangan untuk mengembangkan bobot dan prioritas. Metode ini juga menggabungkan kekuatan dari perasaan dan logika yang bersangkutan pada berbagai persoalan, kemudian mensintesis berbagai pertimbangan yang beragam menjadi hasil yang cocok dengan perkiraan kita secara intuitif sebagaimana yang dipresentasikan pada pertimbangan yang telah dibuat (Saaty. T, 2008).

Metode AHP telah banyak memberikan kontribusi dalam memecahkan permasalahan yang ada dalam dunia nyata. Pemanfaatan AHP ini membuktikan bahwa AHP merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengorganisasikan informasi dan pertimbangan (judgement) yang dipakai dalam pengambilan keputusan AHP tidak hanya digunakan untuk menentukan prioritas pilihan dengan banyak kriteria, namun dapat juga digunakan untuk memilih portofolio, analisa manfaat biaya, peramalan dan sebagainya.

Kelebihan metode AHP dalam pengambilan keputusan adalah (Saaty. T, 2008):

1. Dapat menyelesaikan permasalahan yang kompleks dan strukturnya tidak beraturan, bahkan bisa juga digunakan untuk permasalahan yang tidak terstruktur sama sekali.
2. Data kuantitatif yang kurang lengkap tidak mempengaruhi kelancaran proses pengambilan keputusan karena penilaian merupakan sintesis pemikiran berbagai sudut pandang responden.
3. Metode ini sesuai dengan kemampuan dasar manusia dalam menilai suatu hal sehingga memudahkan penilaian dan pengukuran elemen.

### **2.5.3 Langkah Langkah Metode AHP**

Langkah-langkah dasar dalam pelaksanaan metode AHP adalah sebagai berikut:

1. Mendefinisikan masalah dan menetapkan tujuan. Tahap ini merupakan tahap pengembangan alternatif
2. Menyusun masalah dalam struktur hirarki. Setiap permasalahan yang kompleks dapat ditinjau dari sisi yang detail dan terstruktur
3. Menyusun prioritas untuk tiap elemen masalah pada tingkat hirarki. Proses ini menghasilkan bobot elemen terhadap pencapaian tujuan, sehingga elemen dengan bobot tertinggi mendapatkan prioritas penanganan. Pada tahap ini disusun perbandingan berpasangan yang ditransformasikan dalam bentuk matriks, yang disebut sebagai matriks perbandingan berpasangan.
4. Pengujian konsistensi terhadap perbandingan antar elemen yang didapatkan pada setiap tingkat hirarki. Konsistensi perbandingan bertujuan untuk memastikan bahwa urutan prioritas perbandingan yang masih berada dalam batas-batas preferensi logis.

Konsistensi data diketahui dari nilai konsistensi (CR) yang merupakan hasil bagi antara indeks konsistensi (CI) dan indeks random (RI), CI diperoleh dengan mengurangkan maksimum terhadap  $n$  (jumlah elemen) dan membagi dengan  $(n-1)$ . Didalam penentuan bobot masing-masing kriteria perlu dilakukan pengujian

terhadap konsisten preferensi untuk mengetahui apakah ada unsur acak setelah menghitung rata-rata elemen vektor ( $\lambda_{max}$ )

## 2.6 Logika Fuzzy

Teori tentang himpunan logika fuzzy pertama kali dikemukakan oleh Prof. Lotfi Zadeh sekitar tahun 1965 pada sebuah makalah yang berjudul “Fuzzy Sets”. Bahwa logika benar dan salah dari logika boolean/konvensional tidak dapat mengatasi masalah yang ada pada dunia nyata. Tidak seperti logika boolean, logika fuzzy mempunyai nilai yang kontinyu. Fuzzy dinyatakan dalam derajat dari suatu keanggotaan dan derajat kebenaran. Oleh sebab itu sesuatu dapat dikatakan sebagai benar dan sebagian salah pada waktu yang bersamaan. Teori himpunan individu dapat memiliki derajat keanggotaan dengan nilai yang kontinyu, bukan hanya 0 dan 1 (Zadeh, 1965).

Pemodelan Segitiga Duval yang menggunakan prosentase gas  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ , dan  $C_2H_4$  menyebabkan adanya kemungkinan overlap atau bias pada perbatasan nilai prosentase tersebut, sehingga derajat keanggotaan dengan nilai yang kontinyu menyebabkan logika fuzzy merupakan metode yang tepat. Dimana gas  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ , dan  $C_2H_4$  sebagai membership function. Sehingga untuk mendapatkan justifikasi yang tepat metode fuzzy merupakan metode yang tepat. Himpunan Logika Fuzzy

Himpunan fuzzy adalah suatu himpunan berisi elemen yang mempunyai berbagai derajat keanggotaan dalam himpunan.  $A$  adalah himpunan fuzzy  $A$ . Fungsi akan memetakan elemen-elemen suatu himpunan fuzzy  $A$  ke suatu nilai real pada interval  $[0,1]$ . Jika  $X$  adalah suatu elemen dalam himpunan semesta,  $X$  adalah anggota himpunan fuzzy  $A$ , dan  $\mu_A$  adalah suatu nilai yang menunjukkan seberapa besar tingkat keanggotaan suatu elemen  $x$  dalam satu himpunan  $A$ , maka pemetaan dinotasikan pada persamaan:

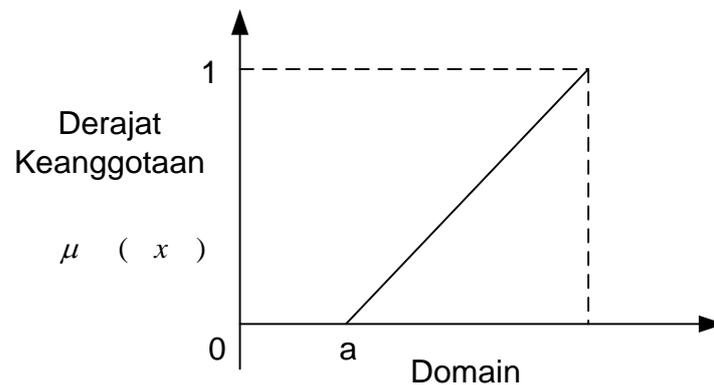
$$A = \{(x, \mu_A(x) | x \in X)\} \quad (2.1)$$

### 2.6.1 Fungsi keanggotaan

Fungsi keanggotaan (membership function) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (disebut derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 1 sampai 0. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah melalui pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi keanggotaan yang digunakan dalam teori himpunan fuzzy, antara lain:

a). Fungsi keanggotaan linier

Pada fungsi keanggotaan linier, pemetaan input ke derajat keanggotaannya digunakan sebagai garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang jelas. Ada dua keadaan himpunan fuzzy linier. Pertama, kenaikan himpunan dimulai pada nilai dominan yang memiliki derajat keanggotaan nol (0) bergerak ke kanan menuju nilai dominan yang memiliki derajat keanggotaan yang lebih tinggi seperti pada Gambar 2.15.

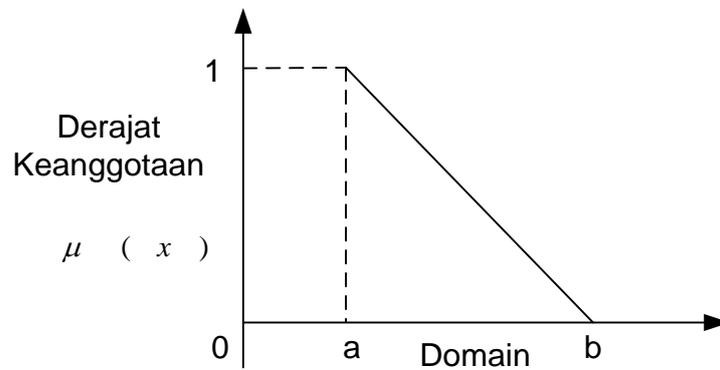


Gambar 2.15 Linier Naik (Zadeh, 1965)

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (2.2)$$

Kedua, baris lurus dimulai dari nilai nominal dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian menurun ke nilai dominan yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16



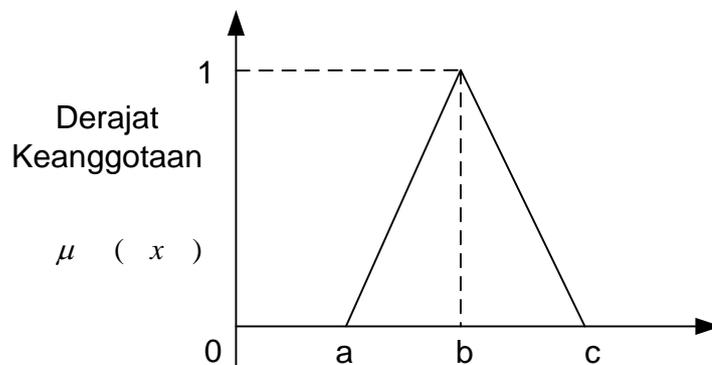
Gambar 2.16 Linear Turun (Zadeh, 1965)

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} \frac{(b-x)}{(b-a)}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2.3)$$

b). Fungsi keanggotaan segitiga

fungsi keanggotaan segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis (linier) seperti terlihat pada Gambar 2.17.



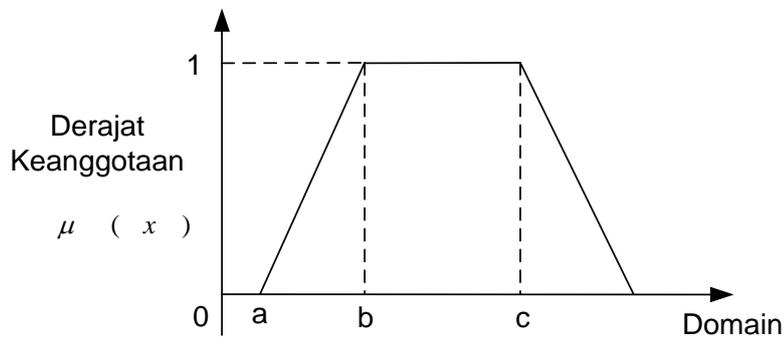
Gambar 2.17 Kurva segitiga (Zadeh, 1965)

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}, & a \leq x \leq b \\ \frac{(b-x)}{(c-b)}, & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.4)$$

c). Fungsi keanggotaan trapesium

fungsi keanggotaan trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja pada rentang tertentu ada beberapa titik yang memiliki keanggotaan satu (1) sesuai pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Kurva trapesium (Zadeh, 1965)

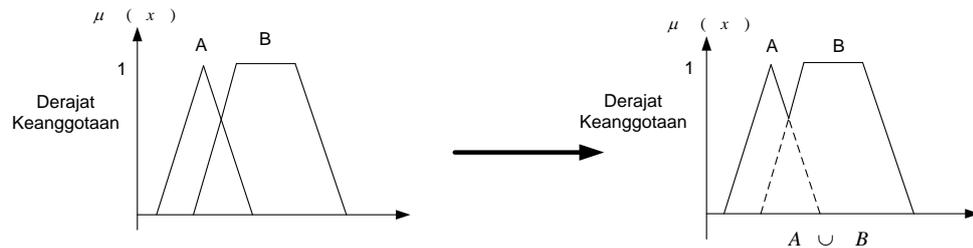
### 2.6.2 Fuzzy Operator

Operasi himpunan fuzzy merupakan operasi yang mengkombinasikan dan memodifikasi 2 atau lebih himpunan fuzzy. Nilai anggota baru hasil operasi dua himpunan disebut *firing strenght* atau  $\alpha$  predikat.

a).  $\alpha$  predikat sebagai hasil operasi OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.5)$$

Pengoperasian OR ini dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19



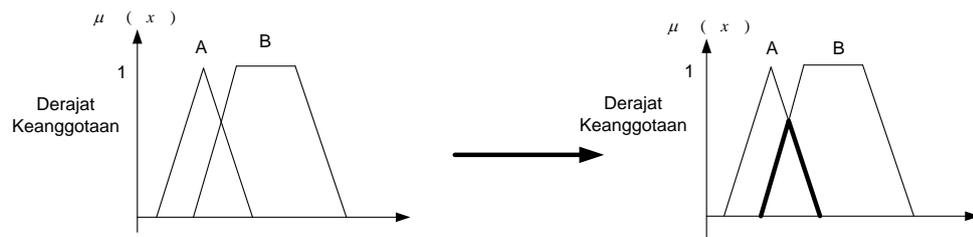
Gambar 2.19 Operasi OR (Union) (Zadeh, 1965)

b). AND (Intersection)

$\alpha$  predikat sebagai hasil operasi AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antara elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Pengoperasian AND ini dapat diilustrasikan pada Gambar 2.20



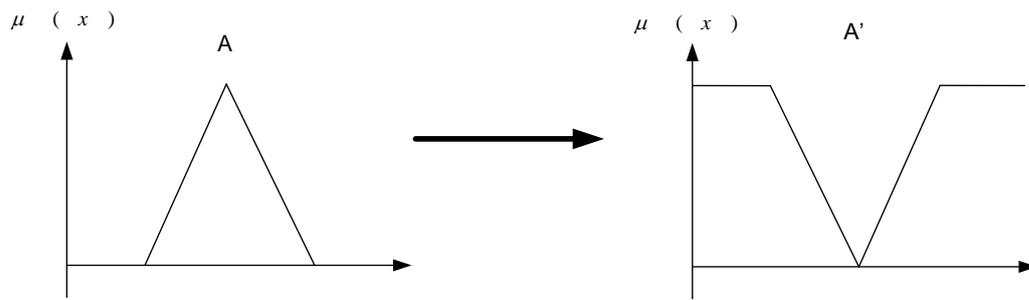
Gambar 2.20 Operasi AND (*Intersection*) (Zadeh, 1965)

c). NOT (Complement)

$\alpha$  predikat sebagai hasil operasi NOT diperoleh dengan mengurangi nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \tag{2.6}$$

Pengoperasian NOT ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.21



Gambar 2.21 Operasi NOT (*Complement*) (Zadeh, 1965)

## 2.7 Kriteria Penggantian Transformator berdasarkan KEPDIR 149 Tahun 2013

Berdasarkan Keputusan Direksi PT. PLN (Persero): No 149.K/DIR/2013, tanggal 7 Februari 2013, mengenai kriteria penggantian peralatan utama gardu induk di lingkungan PT. PLN (Persero) (Direksi, 2013). Penentuan kriteria untuk penggantian transformator dibagi menjadi tiga yakni:

### 2.7.1 Kondisi Teknis

Kondisi teknis peralatan adalah suatu tingkat kondisi peralatan utama gardu induk yang masih beroperasi dan ditentukan berdasarkan hasil assesmen, yaitu:

- a. Baik adalah kondisi teknis peralatan dengan hasil asesment yang masih memenuhi standard (kondisi normal)
- b. Buruk adalah suatu kondisi teknis peralatan dengan hasil assesmen yang belum memenuhi kondisi standar (kondisi normal)
- c. Sangat buruk adalah suatu kondisi teknis peralatan dengan hails assesmen yang jauh dibawah stadard (kondisi normal)

### 2.7.2 Umur Operasi

Umur operasi adalah usia peralatan utama gardu induk dihitung sejak tanggal operasi dan dinyatakan dengan tua dan sangat tua, untuk transformator ditunjukkan pada sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Kriteria umur Operasi Transformator (Direksi, 2013)

No	Peralatan	Sangat Tua	Tua	Muda
1	Transformator	> 30 Tahun	20-30 Tahun	< 20 Tahun

### 2.7.3 Tingkat Risiko

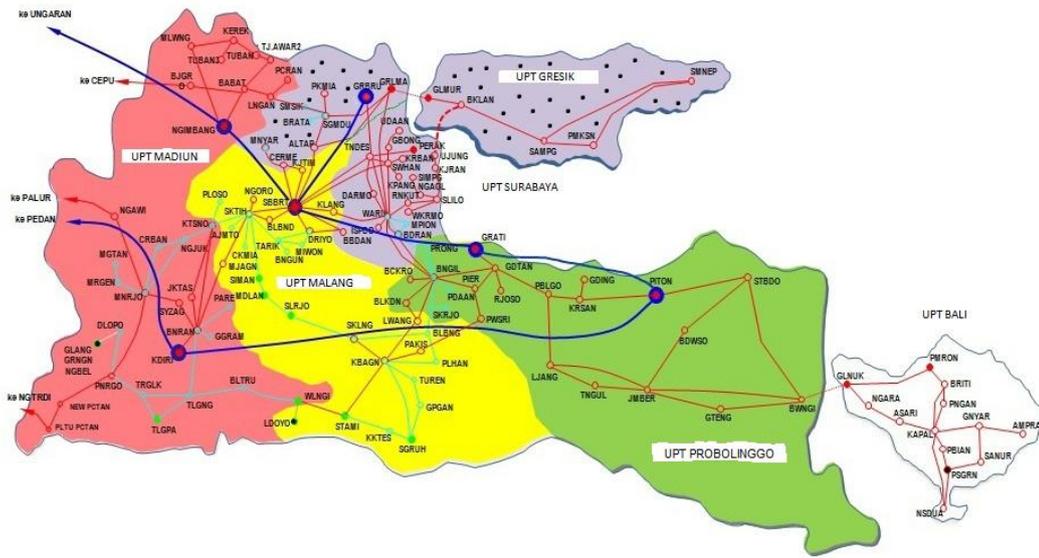
Tingkat risiko adalah kriteria yang mempertimbangkan probabilitas kerusakan dan dampaknya yang ditetapkan oleh PLN Unit dimana peralatan tersebut beroperasi, ditunjukkan pada Tabel 2.1 . Penentuan tingkat risiko peralatan utama gardu induk sangat bergantung pada unit induk setempat dengan mempertimbangkan lokasi peralatan dan dampak yang ditimbulkan jika terjadi gangguan pada peralatan tersebut.

Tabel 2.5 Kriteria tingkat risiko tranformator (Direksi, 2013)

	<b>Sangat Tinggi</b>	<b>Tinggi</b>
Terpasang	Hulu, outlet Pembangkit besar, Interbus Transformer	Hilir dan Jaringan Radial
Kepentingan	Obvitnas, Rumah Sakit	Ibu Kota Propinsi
Dampak	Sangat Luas (> 60MVA)	Luas (30-60 MVA)
Safety	Daerah sangat rawan (Pemukiman Padat)	Daerah rawan (lintasan jalan)
Contoh	IBT 500/150 kV, IBT 275/150 kV, SUTET 500 kV, SUTET 275 kV, SUTT 150 kV outlet Pembangkit Besar, SUTT 150 kV Backbone	Trafo 150/20 kV, outlet pembangkit sedang

## 2.8 Data Transformator

Pengambilan sampel data ini berasal dari pengujian DGA minyak pada 21 Gardu Induk di wilayah PLN UPT Surabaya, dengan total 47 Transformator, 3 IBT 150/70 kV, 41 Trafo 150/20 kV, dan 3 Trafo 70/20 kV. Wilayah UPT Surabaya meliputi GI Ujung di sebelah utara, GI Porong di sebelah selatan, GI Darmogrande disebelah barat serta GI Kenjeran di sebelah timur. Sesuai dengan Gambar 2.22 wilayah UPT Surabaya berada pada area yang berwarna ungu polos, dan dibatasi dengan garis warna hijau dengan wilayah UPT Gresik (Sebelumnya termasuk wilayah UPT Surabaya) yang berwarna ungu dengan titik-titik hitam. Walaupun wilayah UPT Surabaya merupakan Wilayah yang terkecil di Regional Jawa Timur dan Bali tetapi memiliki beban yang besar dan jarak yang pendek karena merupakan wilayah metropolis yang memiliki beban konsumen VIP, Industri. Data pengujian sampel yang dipergunakan yakni hasil uji DGA minyak trafo pada tahun sampai dengan tahun 2018.



Gambar 2.22 Peta Transmisi Wilayah Regional Jawa dan Bali

Tabel 2.6 Data transformator yang diuji

No	Gardu Induk / IBT	No. TRAF0	Daya Terpasang	Rasio Teg	Arus Nominal
			(MVA)	(kV)	(A)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	WARU	IBT 1	39	150/70	322
2	WARU	IBT 2	39	150/70	322
3	BUDURAN	IBT 1	50	150/70	412
4	WARU	TRAF0 3	60	150/20	1.732
5	WARU	TRAF0 4	60	150/20	1.732
6	WARU	TRAF0 5	50	150/20	1.443
7	WARU	TRAF0 6	60	150/20	1.732
8	BUDURAN	TRAF0 2	60	150/20	1.732
9	BUDURAN	TRAF0 3	60	150/20	1.732
10	BUDURAN	TRAF0 4	60	150/20	1.732
11	BUDURAN	TRAF0 5	20	70/20	577
12	BUDURAN	TRAF0 6	60	150/22	1.575
13	PORONG	TRAF0 1	20	70/20	577
14	PORONG	TRAF0 2	20	70/20	577
15	BABADAN	TRAF0 1	50	150/20	1.443
16	BABADAN	TRAF0 2	50	150/20	1.443
17	BABADAN	TRAF0 3	60	150/22	1.575
18	RUNGKUT	TRAF0 1	50	150/20	1.443
19	RUNGKUT	TRAF0 2	60	150/22	1.575
20	RUNGKUT	TRAF0 3	60	150/20	1.732
21	RUNGKUT	TRAF0 4	60	150/22	1.575
22	RUNGKUT	TRAF0 5	60	150/22	1.575
23	SURABAYA SELATAN	TRAF0 1	60	150/20	1.732
24	SURABAYA SELATAN	TRAF0 2	60	150/22	1.575
25	SUKOLILO	TRAF0 1	50	150/20	1.443
26	SUKOLILO	TRAF0 2	60	150/20	1.732
27	SUKOLILO	TRAF0 3	60	150/20	1.732
28	SUKOLILO	TRAF0 4	60	150/22	1.575
29	NGAGEL	TRAF0 1	20	150/20	577
30	SIMPANG	TRAF0 1	50	150/20	1.443
31	SIMPANG	TRAF0 2	50	150/20	1.443
32	WONOKROMO	TRAF0 1	60	150/20	1.732
33	WONOKROMO	TRAF0 2	60	150/20	1.732
34	KENJERAN	TRAF0 1	50	150/20	1.443
35	KENJERAN	TRAF0 2	50	150/20	1.443

No	Gardu Induk / IBT	No. TRAFO	Daya Terpasang	Rasio Teg	Arus Nominal
			(MVA)	(kV)	(A)
36	KENJERAN	TRAFO 3	60	150/20	1.732
37	KUPANG	TRAFO 1	60	150/20	1.732
38	KUPANG	TRAFO 2	60	150/20	1.732
39	UNDAAN	TRAFO 1	60	150/20	1.732
40	SAWAHAN	TRAFO 1	50	150/20	1.443
41	SAWAHAN	TRAFO 3	60	150/20	1.732
42	KREMBANGAN	TRAFO 2	50	150/20	1.443
43	KREMBANGAN	TRAFO 3	60	150/20	1.732
44	UJUNG	TRAFO 2	30	150/20	866
45	DARMOGRANDE	TRAFO 1	50	150/20	1.443
46	DARMOGRANDE	TRAFO 3	60	150/20	1.732
47	PERAK	TRAFO 1	60	150/20	1.732

## 2.9 Posisi Penelitian

Berdasarkan Tabel 2.7 dari hasil penelitian sebelumnya, maka akan digunakan metode Duval sebagai interpretasi penentuan kondisi fisik transformator dan untuk pembobotan dari metode tersebut menggunakan fuzzy. Selanjutnya akan digabungkan dengan kriteria lain sesuai dengan PERDIR 149. Berdasarkan penelitian William I. Schmitz (2018) prioritas penggantian transformator berdasarkan dua kriteria yakni kriteria kondisi teknis berupa factor manuver dan data peralatan konstruktif serta kondisi operasional berupa kesehatan transformator daya dengan pengujian minyak DGA sebagai salah satu faktornya dan pembobotan masing-masing ditetapkan berturut-turut 0,6 dan 0,4.

Tabel 2.7 Penelitian Sebelumnya

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	(Abu-Siada & Hmood, 2015)	A new Fuzzy Logic Approach to Indetify Power Transformer	Penentuan kondisi DGA transformator dengan menggunakan metode fuzzy

Tabel 2.7 Penelitian Sebelumnya

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
		critically using dissolved gas-in-oil analysis	membandingkan beberapa metode DGA. Duval memiliki konsistensi paling tinggi dibandingkan dengan intepretasi lainnya
2.	(Malik et al., 2012)	Make Use of DGA to Carry Out the Transformer Oli-Immersed Paper Deterioration Condition Estimation with Fuzzy-Logic	Penelitian ini menentukan kondisi transformator dengan DGA dan menggunakan metode fuzzy sebagai pendekatan.
3.	(Flores et al., 2011)	Expert system for the Assesment of Power Transformer Insulation Condition based on Type-2 Fuzzy Logic System	Penelitian ini menentukan kondisi transformator dengan DGA dan menggunakan metode fuzzy sebagai pendekatan.
4.	(Schmitz et al., 2018)	Operational vulnerability indicator for prioritization and replacement of power transformers in substation	Penelitian ini menentukan prioritas penggantian dengan menggunakan kriteria kondisi teknis dan kondisi operasional

Posisi peneliti disini menggunakan metoda Fuzzy yang telah banyak digunakan sebagai pendekatan penilaian DGA trafo, serta metode secara segitiga Duval yang memiliki intepretasi tinggi dalam menentukan kondisi trafo. Setelah dilakukan penilaian kondisi teknis ini selanjutnya digabungkan dengan criteria lain yakni AHP untuk kemudian mendapatkan

prioritas penggantian trafo. Penggunaan AHP untuk menentukan penggantian trafo ini merupakan modifikasi yang dilakukan penulis.

## **BAB 3**

### **METODA PENELITIAN**

Metode penelitian adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan dan mendapatkan jawaban atas permasalahan dalam penelitian. Masing-masing langkah satu dengan yang lain akan saling berkaitan, hasil dari suatu langkah akan menjadi masukan bagi langkah berikutnya. Hal ini bertujuan agar dapat membuat penelitian yang sistematis dan terarah, serta mendapatkan tujuan yang telah ditetapkan sebelumnya.

#### **3.1 Diagram alur penelitian**

Untuk mencapai tujuan penelitian diperlukan perencanaan tahapan kegiatan penelitian maupun penulisan yang akan dilakukan. Tahapan ini yang nantinya akan dijadikan pedoman pengerjaan penelitian hingga terselesaikannya penelitian ini dengan baik. Berikut adalah proses secara general kerangka tahapan penelitian.

#### **3.2 Langkah-langkah penelitian**

Berdasarkan Gambar 3.1 berikut merupakan penjelasan setiap poin dari langkah-langkah penelitian tersebut.

##### a). Perumusan masalah

Pada perumusan masalah, peneliti akan mengidentifikasi fakta-fakta yang ada dan mengangkat masalah yang timbul dan menjadi acuan penelitian dilakukan.

##### b). Tujuan penelitian

Permasalahan yang telah diangkat dari perumusan masalah tersebut, kemudian dilakukan hipotesis dengan menentukan kemungkinan penyelesaian dari permasalahan tersebut. Dari kemungkinan penyelesaian itu akan diperoleh metode yang tepat yang akan menjadi acuan peneliti.

c). Studi Pustaka

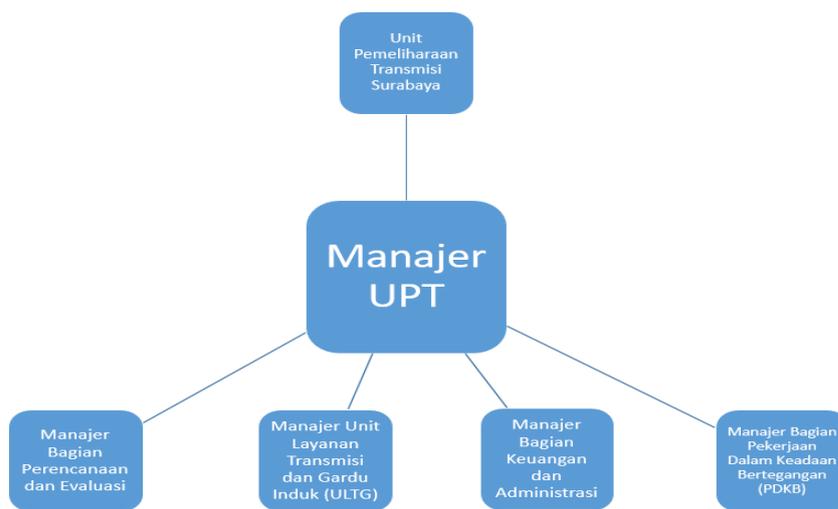
Peneliti akan mencari beberapa referensi yang relevan dengan penelitian yang akan diangkat. Seperti dalam hal ini beberapa buku maupun standard tentang kondisi minyak DGA, yang dapat menjadi acuan penilaian baik atau buruknya kondisi transformator. Selain itu dari sisi metode juga akan mencari jurnal-jurnal yang telah mengangkat penentuan kondisi minyak DGA dengan menggunakan metode fuzzy.



Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

d). Identifikasi variabel penelitian

Menetapkan faktor-faktor yang mempengaruhi keputusan dalam hal penentuan kondisi trafo, dalam hal ini kondisi minyak trafo dengan metode DGA untuk kondisi teknis. Serta untuk mengetahui bobot kriteria lain yakni usia operasi dan tingkat risiko dari PT. PLN UPT Surabaya tentang prioritas penggantian transformator.



Gambar 3.2 Struktur Organisasi UPT Surabaya

UPT Surabaya dipimpin oleh seorang Manager yang memiliki bawahan dari berbagai bidang yakni sesuai Gambar 3.2:

1. Manajer Bagian Perencanaan dan Evaluasi yang bertugas untuk merencanakan pekerjaan untuk Anggaran Operasi (AO) dan Anggaran Investasi (AI) serta evaluasi dalam implementasinya di sistem transmisi wilayah UPT Surabaya.
2. Manajer Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) bertugas untuk mengelola dan melaksanakan pekerjaan yang telah

terencana maupun *emergency* akibat gangguan pada Gardu Induk dan Transmisi

3. Manajer Keuangan dan Administrasi bertugas untuk melaksanakan pembayaran atas tagihan pekerjaan, serta mengelola administrasi wilayah UPT Surabaya
4. Manajer PDKB bertugas untuk mengelola dan melaksanakan pekerjaan yang dapat dilaksanakan secara *online* (bertegangan) baik Gardu Induk maupun Transmisi.

Management/expert yang diinterview/kuisisioner adalah Manajer UPT Surabaya serta Manajer Perencanaan dan Evaluasi yang secara langsung memiliki wewenang untuk melakukan penentuan bobot tersebut.

e). Pengumpulan hasil uji DGA

Pengumpulan hasil uji DGA yakni berupa hasil uji gas-gas yang terlarut pada minyak tranformator pada PT. PLN, yang mengindikasikan terjadinya pemburukan pada tranformator. Laboratorium yang digunakan untuk pengujian yakni Laboratorium Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali.

f). Pengolahan Fuzzy hasil uji DGA

Melakukan pemodelan fuzzy menggunakan FIS editor yang kemudian dihubungkan dengan simulink dari prosentase masing-masing gas terlarut ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ , dan  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) dengan total gas tersebut. Hasil dari simulink akan didapatkan penilaian apakah trafo tersebut berada dalam kondisi D1,D2,T1,T2, atai T3.

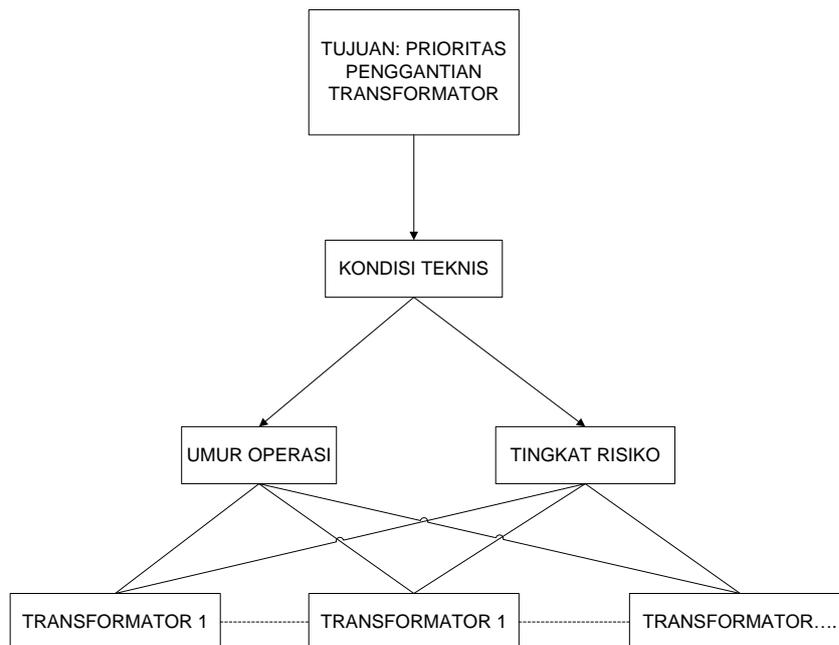
g). Pengolahan Metode AHP (Kriteria usia dan tingkat risiko)

Setelah mendapatkan kriteria-kriteria yang terdapat pada PERDIR 149 mengenai penggantian Material Transmisi utama dalam hal ini tranformator yakni: kondisi teknis, umur operasi, dan tingkat risiko. Selanjutnya adalah melakukan eliminasi terhadap transformator yang masih dapat diterima

kondisinya (sehat) dengan menggunakan kriteria teknis yakni dengan metode duval, dari hasil T1, T2, T3 merupakan kondisi dimana trafo sudah mengalami pemburukan sehingga T1 menjadi batas kerusakan trafo. Selanjutnya untuk penentuan bobot yang diinginkan dari dari manajemen didapatkan dari kuisisioner yang akan diberikan kepada Manajer UPT dan Manajer Perencanaan dan Evaluasi yang memiliki kepentingan terhadap *performance* trafo tersebut. Setelah mendapatkan bobot selanjutnya adalah melakukan pengolahan metode AHP, dengan memasukkan dua kriteria yakni: umur operasi dan tingkat risiko dan bobot ke dalam matriks yang selanjutnya dioalah secara metode AHP, untuk mendapatkan penentuan penggantian tranformator.

h). Prioritas Penggantian

Setelah didapatkan hasil dengan menggunakan AHP tersebut akan didapatkan peringkat prioritas penggantian yang akan dijadikan acuan management untuk dilakukan penggantian.



Gambar 3.3 Penentuan Kriteria secara bertahap

i). Pembahasan

Melakukan pembahasan tentang hasil analisa dari hasil eliminasi trafo awal yakni kriteria kondisi teknis sehingga mendapatkan trafo yang kondisi buruk, serta dapat mengurangi jumlah trafo yang akan digabungkan dengan criteria lain yakni umur operasi dan tingkat risiko. Selanjutnya yakni membandingkan hasil tiap trafo yang telah terseleksi dari criteria kondisi teknis dengan dua criteria lain yang didapat dengan *direct rating* metode. Setelah itu mendapatkan urutan yang akan dipakai untuk menentukan prioritas penggantian transformator..

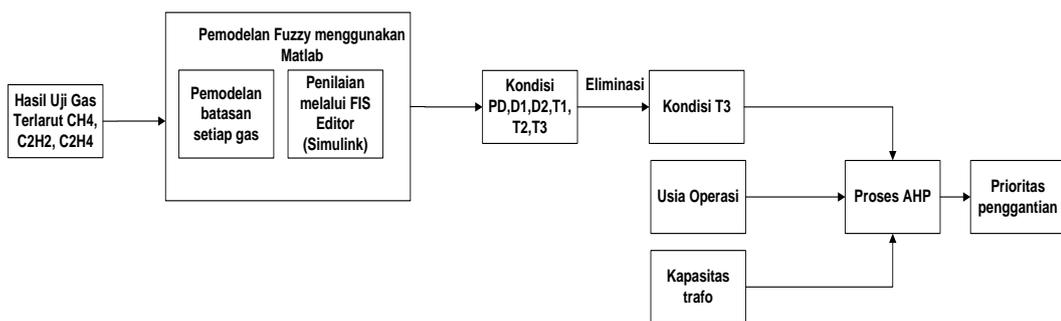
j). Kesimpulan dan Saran

Membuat kesimpulan dan saran dari hasil analisa data dan pembahasan.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahapan pertama adalah mengumpulkan hasil uji gas terlarut (DGA) transformator pada kurun waktu sepanjang tahun 2018 dari 47 transformator yang tersebar di 21 Gardu Induk sesuai pada Tabel 4.1, selanjutnya yaitu melakukan pemodelan dari hasil uji tersebut menggunakan Segitiga Duval dengan pendekatan penilaiannya dengan fuzzy. Setelah diketahui kondisi trafo dari hasil fuzzy tersebut maka selanjutnya adalah melakukan eliminasi hasil penilaian yang mengalami pemburukan paling buruk yakni T3. Setelah didapatkan kondisi T3 selanjutnya dengan menggabungkan dengan criteria lain yakni usia operasi dan kapasitas trafo (tingkat risiko). Hasil dari proses AHP tersebut menghasilkan prioritas penggantian trafo dari terbesar yang berarti prioritas tertinggi dilakukan penggantian. Tahapan dan proses tersebut terdapat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Blok Diagram Prioritas penggantian transformator

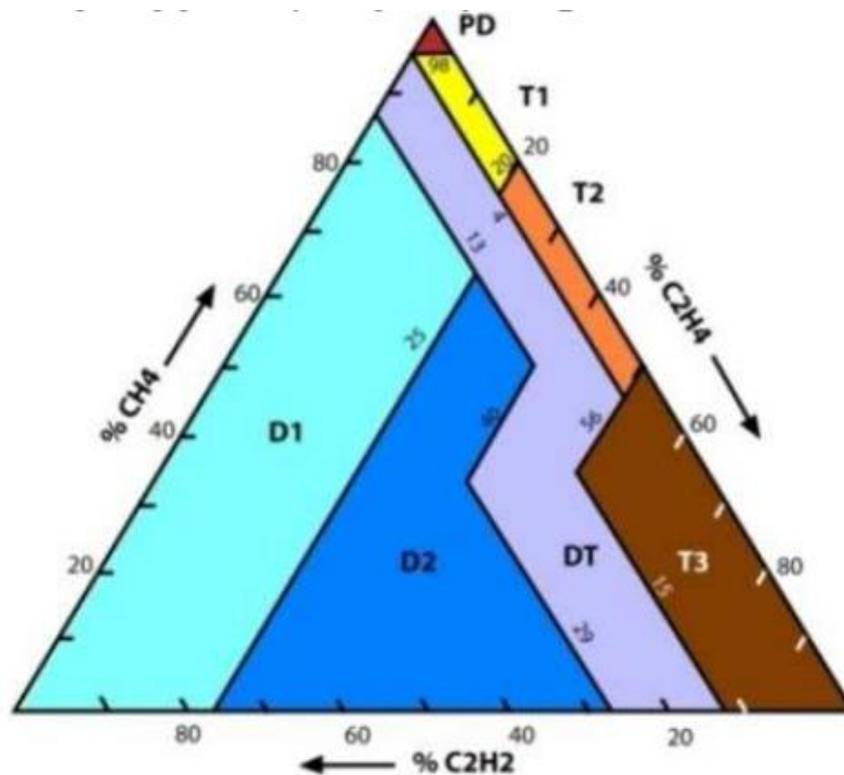
Tabel 4.1 Data Hasil Uji DGA Minyak Trafo

No	Gardu Induk	Trafo	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
1	Babadan	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	100,00	23,00	0,50
2	Babadan	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	7,00	44,00	0,00
3	Babadan	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	3,85	0	0
4	Buduran	IBT-1 150/70 kV 50 MVA (HV)	8,64	0	0
5	Buduran	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	70,00	14,00	0,50
6	Buduran	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	115,00	9,00	0,50

No	Gardu Induk	Trafo	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
7	Buduran	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	214,00	19,00	0,00
8	Buduran	Trafo-5 70/20 kV 20 MVA	0	6,11	0
9	Buduran	Trafo-6 150/20 kV 60 MVA	1,8	0	0
10	Darmogrand	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	9,51	13,74	0
11	Darmogrand	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	281,59	392,17	0
12	Kenjeran	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	78,00	8,00	0,00
13	Kenjeran	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	9,00	186,00	0,00
14	Kenjeran	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	4,44	0	0
15	Kremlangan	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	135,00	27,00	1,00
16	Kremlangan	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	5,30	0,00	0,00
17	Kupang	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	82,106	31,887	0
18	Kupang	Trafo 2 150/20 kV 60 MVA	62,51	98,41	0,00
19	Ngagel	Trafo-1 150/20 kV 20 MVA	14,34	0,00	0,00
20	Perak	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	23,91	0,00	0,00
21	Rungkut	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	61,00	7,00	0,00
22	Rungkut	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	10,00	149,00	0,00
23	Rungkut	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	170,00	16,00	0,50
24	Rungkut	Trafo-4 150/20 kV 50 MVA	5,31	0,00	0,00
25	Rungkut	Trafo-5 150/20 kV 50 MVA	14,00	144,00	0,00
26	Sawahan	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	1,98	15,78	0
27	Sawahan	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	19,35	1,73	0,00
28	Surabaya Selatan	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	51,58	4,24	0,00
29	Surabaya Selatan	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	3,10	0,00	0,00
30	Simpang	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	68,00	15,00	0,50
31	Simpang	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	17,22	0,00	0,00
32	Sukolilo	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	59,66	1,66	0,00
33	Sukolilo	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	82,07	2,26	0,00
34	Sukolilo	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	114,16	23,22	0,00
35	Sukolilo	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	1,86	0,00	0,00
36	Ujung	Trafo-2 150/20 kV 30 MVA	28,23	6,19	0
37	Undaan	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	29,00	20,00	0,50
38	Waru	IBT-1 150/70 kV 39 MVA (HV)	6,38	0	0
39	Waru	IBT-2 150/70 kV 39 MVA (HV)	10,77	0	0
40	Waru	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	38,09	0	0
41	Waru	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	95,44	14,4	0
42	Waru	Trafo-5 150/20 kV 50 MVA	0	73,53	0
43	Waru	Trafo-6 150/20 kV 60 MVA	28,25	5,54	0
44	Wonokromo	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	61,98	39,14	0,00
45	Wonokromo	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	2,63	2,64	3,97
46	Porong	Trafo-1 70/20 kV 20 MVA	97,00	7,00	0,50
47	Porong	Trafo-2 70/20 kV 20 MVA	2,03	0	0

#### 4.1 Pengolahan Fuzzy Hasil Uji DGA (kondisi teknis)

Pada pemodelan *fuzzy* untuk segitiga duval, terdapat prosentase ketiga gas yang dijadikan acuan untuk menentukan *membership function*-nya. Melalui titik temu dari ketiga gas tersebut akan didapatkan kondisi transformator berupa: PD, D1, D2, T1, T2, T3 yang merupakan tingkatan dari kecil sampai tinggi secara berturut turut. Batasan-batasan daerah tersebut yang akan menjadi output dari proses *fuzzy* yang dilakukan seperti terlihat pada Gambar 4.2. Sebagai contoh pada batasan presentase  $\text{CH}_4$  mencapai 98% dan  $\text{C}_2\text{H}_4$  mencapai 98% maka akan berada pada kondisi PD atau *partial discharge*. Begitupun dengan kondisi yang lainnya. Kondisi UPT yang saat ini menggunakan plot secara manual dimungkinkan adanya kesalahan hasil plot, dengan adanya metode fuzzy ini tentunya plot dapat dilakukan secara otomatis.

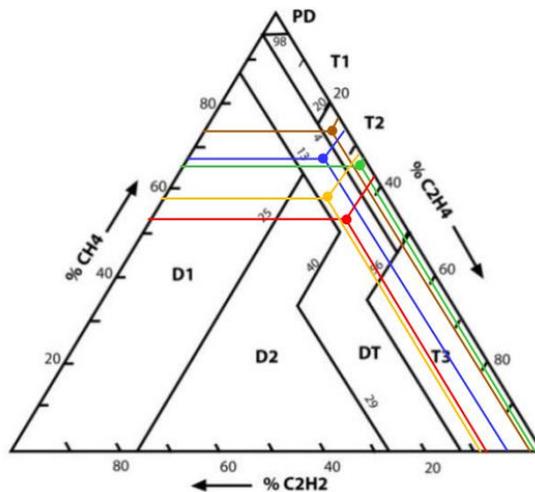


Gambar 4.2 Batasan Segitiga Duval

Tabel 4.2 Presentase Gas CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> pada Transformator

Konsentrasi Gas					
CH <sub>4</sub>	73,72%	65,49%	53,47%	58,21%	67,10%
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,12%	0,67%	8,85%	8,99%	4,74%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	24,17%	33,84%	37,68%	32,80%	28,16%

Berdasarkan Tabel 2.1 merupakan salah satu contoh penilaian transformator, dalam hal ini digunakan lima transformator yang akan diplot untuk penilaiannya. Pada transformator dengan warna coklat didapatkan dari hasil pengujian DGA minyak prosentase CH<sub>4</sub> sebesar 73,72%, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> sebesar 2,12%, sedangkan untuk C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> didapatkan 24,17%. Selanjutnya adalah melakukan plot di segitiga Duval, sesuai dengan sisi gas ketiga gas tersebut. Sesuai dengan hasil plot Gambar 4.3 didapatkan transformator coklat mengalami T2 yakni *Termal Fault*  $300 < t < 700^0$ . Penerapan yang sama juga dilakukan untuk transformator hijau, merah, kuning dan biru, sehingga secara berturut-turut didapatkan hasil penilaian T2, DT, DT, DT. Penilaian ini yang akan dijadikan acuan untuk menentukan rule pada setiap batasan yang mungkin ada.



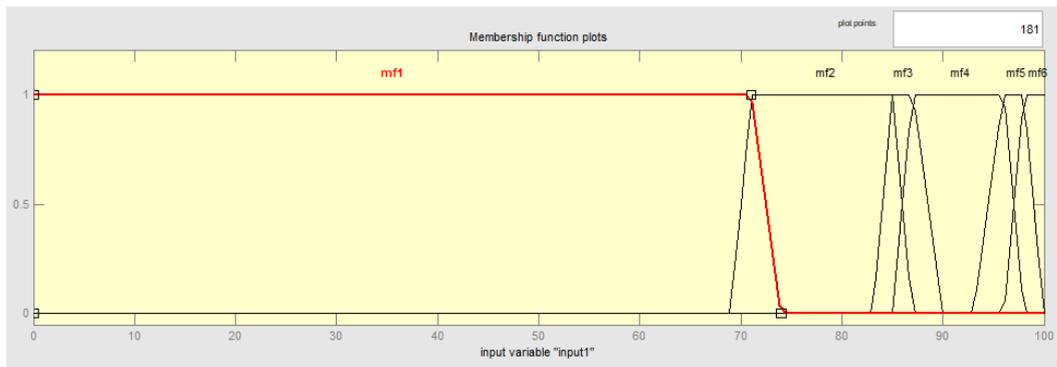
Gambar 4.3 Contoh kasus penilaian menggunakan Segitiga Duval

#### 4.1.1 Pemodelan Input 1 (%CH<sub>4</sub>)

Simulasi untuk metode segitiga duval menggunakan *fuzzy* mamdani dimana pemodelan dapat digunakan dengan memasukkan titik-titik vatas tiap mf. Pada %CH<sub>4</sub> merupakan prosentase nilai CH<sub>4</sub> dibandingkan dengan total gas CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, dan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, sehingga hasil prosentase tersebut akan dijadikan batas untuk menentukan *membership function* (mf). Pada pemodelan sesuai dengan batasan-batasan daerah di segitiga duval didapatkan 6 mf sesuai dengan Gambar 4.4.

- Pada Mf 1 batas yang diaplikasikan yakni 0% s/d 71% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (29%). Nilai 71% didapatkan dari 100%-29%.
- Pada Mf 2 batas yang diaplikasikan yakni 71% s/d 85% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (29%) serta %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (15%). Nilai 15% didapatkan dari 100%-85%.
- Pada Mf 3 batas yang diaplikasikan yakni 85% s/d 87% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (15%) serta %CH<sub>4</sub> (13%). Nilai 87% didapatkan dari 100%-13%.
- Pada Mf 4 batas yang diaplikasikan yakni 87% s/d 96% yang merupakan batas terusan dari %CH<sub>4</sub> (13%) serta %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (4%). Nilai 96% dipadatkan dari 100%-4%.
- Pada Mf 5 batas yang diaplikasikan yakni 96% s/d 98% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (4%) serta %CH<sub>4</sub> dan %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (98).
- Pada Mf 6 batas yang diaplikasikan yakni 98% s/d 100% yang merupakan batas terusan dari %CH<sub>4</sub> dan %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (98).

Pada batas-batas pertemuan mf dilakukan pembiasan nilai untuk mengakomodir adanya kesalahan kecenderungan dari hasil uji.



Gambar 4.4 Membership Function dari Gas CH<sub>4</sub>

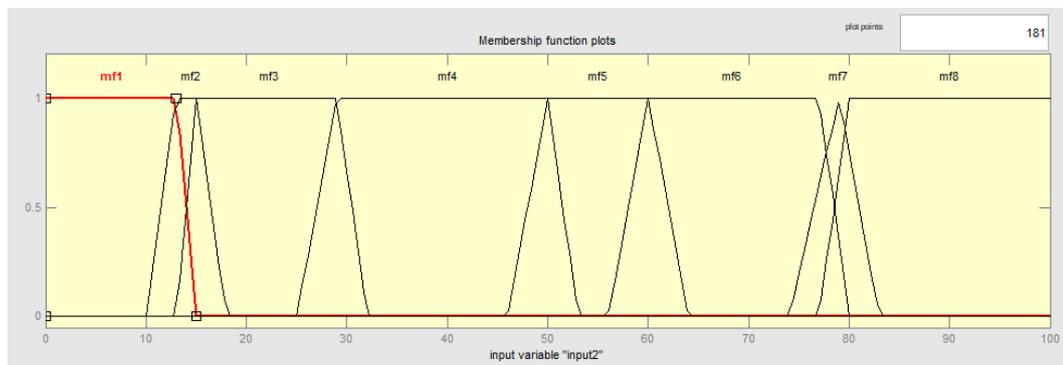
#### 4.1.2 Pemodelan Input 2 (%C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)

Pada %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> merupakan prosentase nilai C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> dibandingkan dengan total gas CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, dan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, serupa dengan proses % CH<sub>4</sub> hasil prosentase tersebut akan dijadikan batas untuk menentukan *membership function* (mf). Pada pemodelan sesuai dengan batasan-batasan daerah di segitiga duval didapatkan 8 mf sesuai dengan Gambar 4.4.

- Pada Mf 1 batas yang diaplikasikan yakni 0% s/d 13% yang merupakan batas terusan dari %CH<sub>4</sub> (13%).
- Pada Mf 2 batas yang diaplikasikan yakni 13% s/d 15% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (13%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (15%).
- Pada Mf 3 batas yang diaplikasikan yakni 15% s/d 29% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (15%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (29%)
- Pada Mf 4 batas yang diaplikasikan yakni 29% s/d 56% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (29%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (56%).
- Pada Mf 5 batas yang diaplikasikan yakni 56% s/d 60% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (56%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (60%).

- Pada Mf 6 batas yang diaplikasikan yakni 60% s/d 75% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (60%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (75%).
- Pada Mf 7 batas yang diaplikasikan yakni 75% s/d 80% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (75%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (80%).
- Pada Mf 8 batas yang diaplikasikan yakni 80% s/d 100% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (80%).

Pada batas-batas pertemuan mf dilakukan pembiasan nilai untuk mengakomodir adanya kesalahan kecenderungan dari hasil uji +/- 2% sesuai dengan besar range antar mf.



Gambar 4.5 Membership Function dari Gas C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

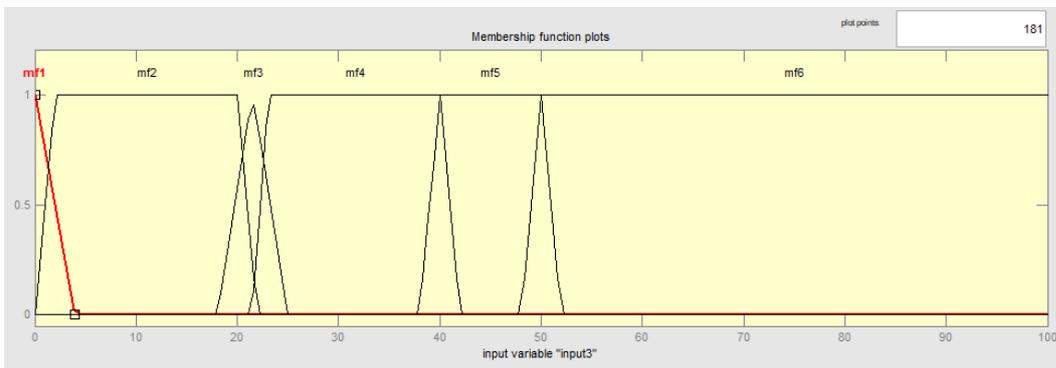
#### 4.1.3 Pemodelan Input 3 (%C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)

Pada %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> merupakan prosentase nilai C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> dibandingkan dengan total gas CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, dan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, serupa dengan proses %CH<sub>4</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> hasil prosentase tersebut akan dijadikan batas untuk menentukan *membership function* (mf). Pada pemodelan sesuai dengan batasan-batasan daerah di segitiga duval didapatkan 6 mf sesuai dengan Gambar 4.6.

- Pada Mf 1 batas yang diaplikasikan yakni 0% s/d 2% yang merupakan batas terusan dari %CH<sub>4</sub> (98%). Nilai 2% didapatkan dari 100%-98%.

- Pada Mf 2 batas yang diaplikasikan yakni 2% s/d 20% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (98%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (20%).
- Pada Mf 3 batas yang diaplikasikan yakni 20% s/d 25% yang merupakan serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (20%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (25%).
- Pada Mf 4 batas yang diaplikasikan yakni 25% s/d 40% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (25%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (40%).
- Pada Mf 5 batas yang diaplikasikan yakni 40% s/d 56% yang merupakan batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (40%), serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (56%).
- Pada Mf 6 batas yang diaplikasikan yakni 56% s/d 100% yang merupakan serta batas terusan dari %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (56%).

Pada batas-batas pertemuan mf dilakukan pembiasan nilai untuk mengakomodir adanya kesalahan kecenderungan dari hasil uji +/- 2% yang disesuaikan dengan besar range antar mf.

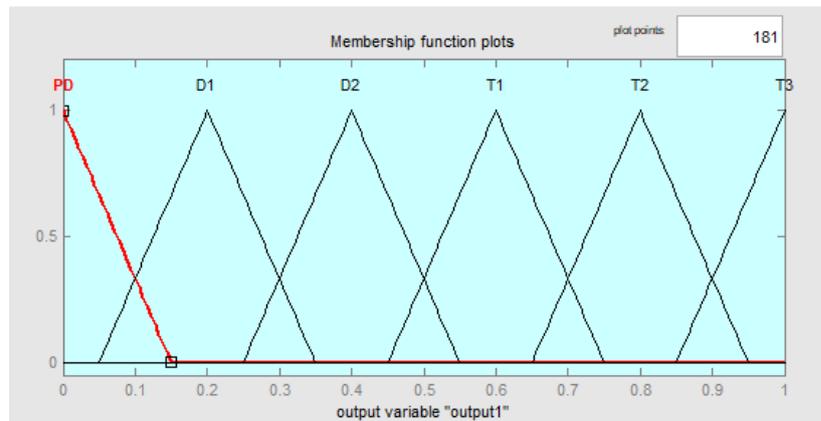


Gambar 4.6 Membership Function dari Gas C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

#### 4.1.4 Pemodelan Output (Kondisi fisik)

Pada pemodelan output ini dipetakan untuk hasil dari penilaian setiap gas yakni CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, dan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, sesuai dengan hasil penilaian tersebut

selanjutnya dibagi secara proporsional sesuai dengan tingkat pemburukan pada hasil sampel minyak tersebut. Terdapat 6 mf pada output kondisi fisik, yang menggambarkan kondisi penilaian PD, D1, D2, T1, T2, T3.

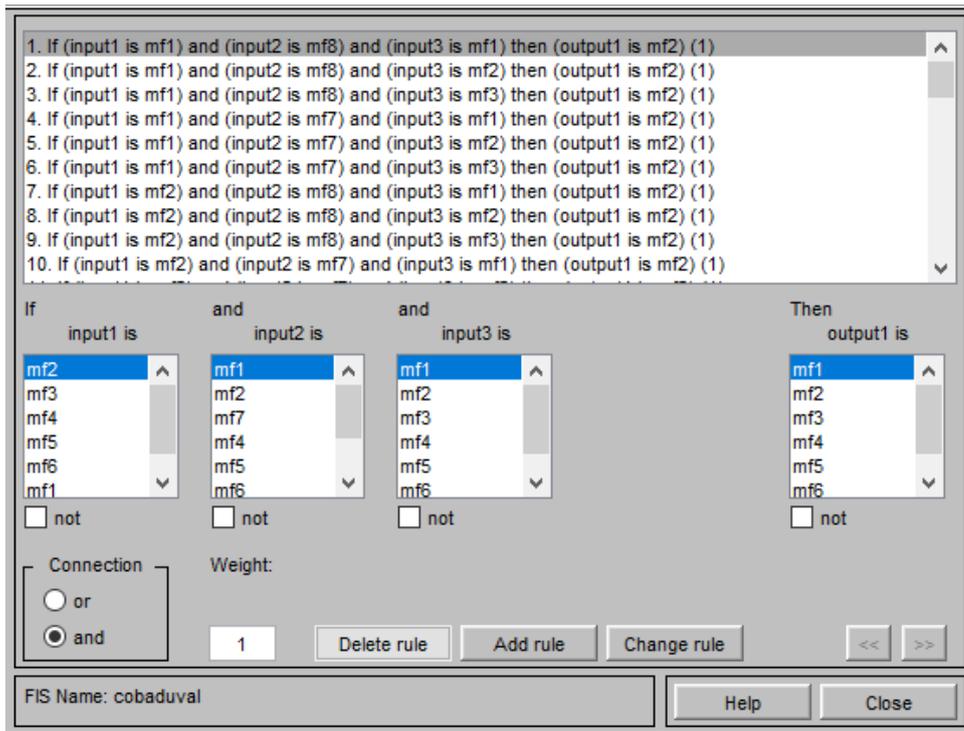


Gambar 4.7 *Membership Function* dari Output *Fuzzy* Segitiga Duval

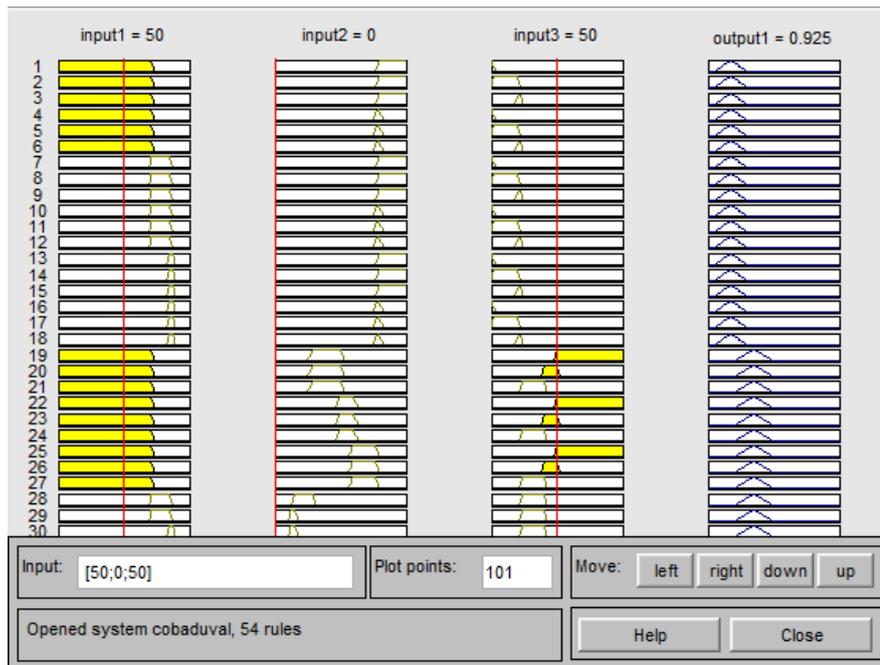
#### 4.1.5 Penentuan Rule pada Pemodelan Segitiga Duval

Dengan menggunakan batasan-batasan yang ada dalam segitiga duval, maka dilakukan pemetaan semua kemungkinan yang dapat terjadi dengan menggunakan fungsi *IF* (input1 & input2 & input3) *then* (condition). Sehingga dari segala kemungkinan akan didapatkan semua kondisi baik itu PD, D1, D2, T1, T2, maupun T3 sesuai Gambar 4.8.

Setelah menentukan semua rule yang sesuai dengan batasan yang ada pada segitiga duval selanjutnya adalah pengujian sensitivitas yakni melakukan pengujian terhadap kemungkinan nilai dari input, apakah telah mendapatkan nilai output yang sesuai. Pada Gambar 4.9 ditetapkan untuk input1 yakni Gas  $CH_4$  adalah 50 , lalu input2 yakni gas  $C_2H_2$  adalah 0 , serta input3 yakni gas  $C_2H_4$  adalah 50. Hasil output dari *fuzzy* didapatkan nilai 0,925 yang kemudian dari hasil pada *membership function* Gambar 4.7 diketahui berada pada range T3. Pengujian ini telah sesuai apabila dibandingkan dengan dilakukan plot manual menggunakan segitiga duval.

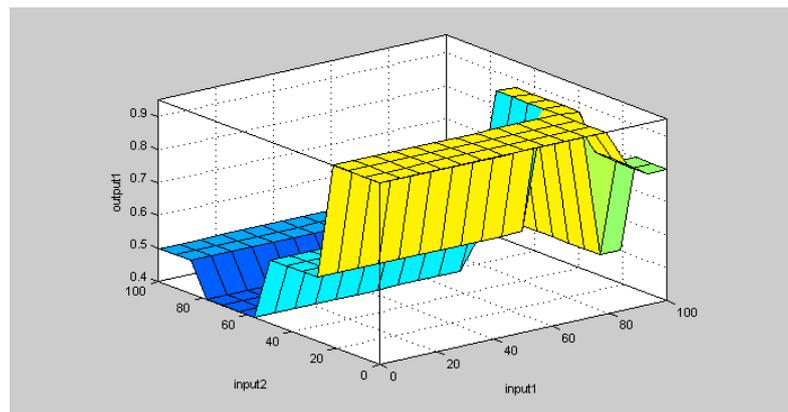


Gambar 4.8 Fungsi Rule untuk segitiga duval

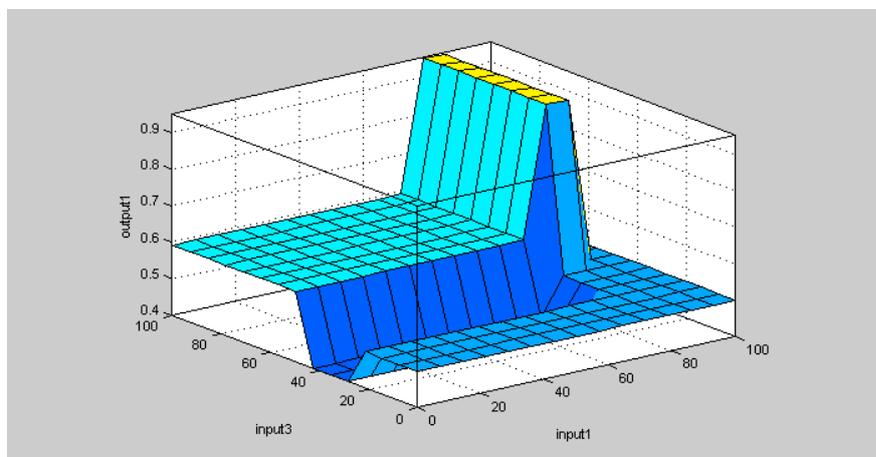


Gambar 4.9 Plot Rule dengan hasil kondisi gas

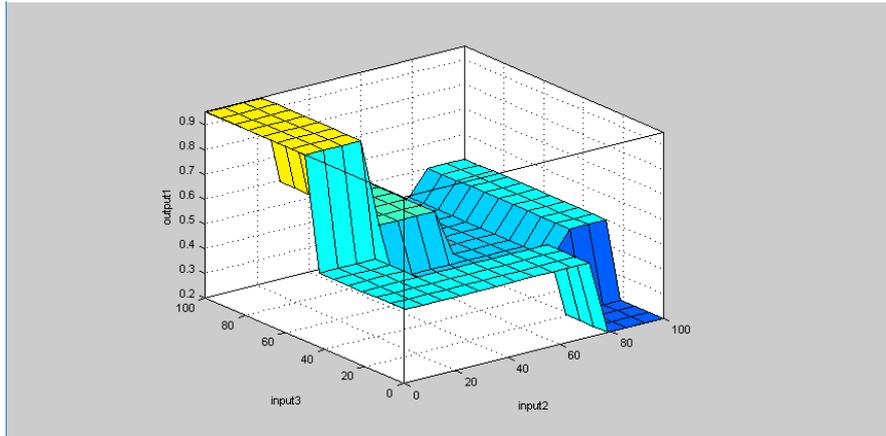
Pada Gambar 4.10, Gambar 4.11, Gambar 4.12, menunjukkan hasil plot *surface* 3D dengan seluruh kemungkinan rule yang telah dimasukkan sesuai dengan batasan-batasan segitiga duval. Secara berturut-turut didapatkan hubungan input1 (CH<sub>4</sub>) dengan input2 (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), input1 (CH<sub>4</sub>) dengan input3 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) dengan input2 (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) dengan input3 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) yang mana masing-masing input direlasikan dengan output yang merupakan hasil penilaian (PD, D1, D2, T1, T2, T3) yang didapatkan dari proses fuzzy melalui rule yang diaplikasikan menggunakan metode duval.



Gambar 4.10 Plot *Surface* Output1 vs input1 vs input2



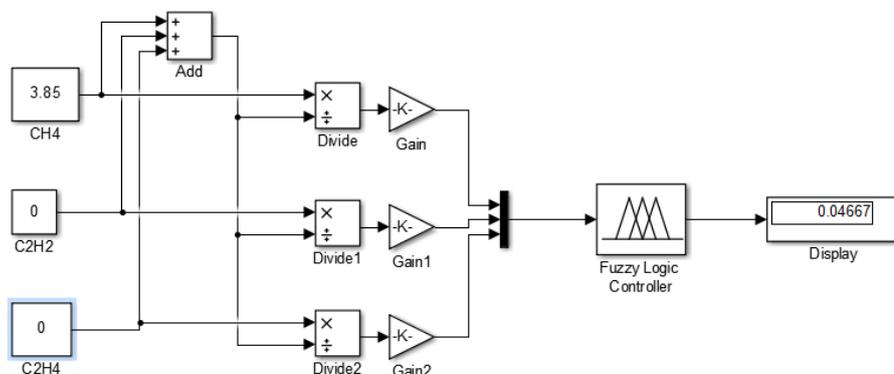
Gambar 4.11 Plot *Surface* Output1 vs input1 vs input3



Gambar 4.12 Plot *surface* output1 vs input2 vs input3

#### 4.1.6 Pemodelan Simulink untuk Metode Segitiga Duval

Setelah menyelesaikan pemodelan segitiga duval menggunakan pemodelan mamdani dengan FIS editor. Setelah memodelkan segitiga duval selanjutnya adalah memanggil *rules* yang telah ditetapkan dengan menggunakan simulink. Dengan menginput hasil uji gas CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, kemudian mencari prosentase setiap gas-gas tersebut. Dari prosentase tiap-tiap gas tersebut dimasukkan ke dalam *fuzzy logic controller* yang menggunakan *logic fuzzy* dari FIS editor sebelumnya. Output dari *fuzzy logic controller* berupa angka yang menggambarkan nilai range dari pemetaan kondisi trafo, yang kemudian dikelompokkan menjadi PD, D1, D2, T1, T2, dan T3. Sesuai dengan tingkat buruknya kondisi trafo pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Pemodelan Simulink metode duval

#### 4.2 Hasil Simulasi Fuzzy untuk metode segitiga Duval

Hasil pengujian 47 transformator pada Tabel 4.1 setelah dilakukan simulasi menggunakan matlab didapatkan berbagai kondisi dari *Partial Discharge* yang merupakan kerusakan paling minimal, D2, T1, T2, serta T3. Sehingga dari hasil plot tersebut didapatkan 10 transformator yang masuk dalam kategori paling buruk atau dalam hal ini T3 dan mengeliminasi kondisi yang lain yakni D2, T1, T2 yang masih dapat dilakukan pemeliharaan berupa *filter* yakni mengganti minyak yang ada agar dapat kembali beroperasi normal. Dari hasil simulasi *fuzzy* didapatkan outputnya 0,9533 yang termasuk dalam kategori T3 (adanya kerusakan akibat termal yang mencapai suhu diatas 700<sup>0</sup>), hal ini menggambarkan telah terjadi gangguan isolasi yang tinggi sehingga dijadikan acuan untuk penggantian transformator sesuai Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Fuzzy untuk metode segitiga duval

No	Gardu Induk	Trafo	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Output	Hasil simulasi DGA Duval
1	Babadan	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	100,00	23,00	0,50	0,50	T1
2	<b>Babadan</b>	<b>Trafo-2 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>7,00</b>	<b>44,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
3	Babadan	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	3,85	0	0	0,04667	PD
4	Buduran	IBT-1 150/70 kV 50 MVA (HV)	8,64	0	0	0,04667	PD
5	Buduran	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	70,00	14,00	0,50	0,5	T1
6	Buduran	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	115,00	9,00	0,50	0,5	T1
7	Buduran	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	214,00	19,00	0,00	0,5	T1
8	<b>Buduran</b>	<b>Trafo-5 70/20 kV 20 MVA</b>	<b>0</b>	<b>6,11</b>	<b>0</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
9	Buduran	Trafo-6 150/20 kV 60 MVA	1,8	0	0	0,04667	PD
10	<b>Darmogrand</b>	<b>Trafo-1 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>9,51</b>	<b>13,74</b>	<b>0</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
11	<b>Darmogrand</b>	<b>Trafo-3 150/20 kV 60 MVA</b>	<b>281,59</b>	<b>392,17</b>	<b>0</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
12	Kenjeran	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	78,00	8,00	0,00	0,5	T1
13	<b>Kenjeran</b>	<b>Trafo-2 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>9,00</b>	<b>186,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
14	Kenjeran	Trafo-3 150/20	4,44	0	0	0,04667	PD

No	Gardu Induk	Trafo	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Output	Hasil simulasi DGA Duval
		kV 60 MVA					
15	Krembangan	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	135,00	27,00	1,00	0,5	T1
16	Krembangan	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	5,30	0,00	0,00	0,04667	PD
17	Kupang	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	82,106	31,887	0	0,5	T1
<b>18</b>	<b>Kupang</b>	<b>Trafo 2 150/20 kV 60 MVA</b>	<b>62,51</b>	<b>98,41</b>	<b>0,00</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
19	Ngagel	Trafo-1 150/20 kV 20 MVA	14,34	0,00	0,00	0,04667	PD
20	Perak	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	23,91	0,00	0,00	0,04667	PD
21	Rungkut	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	61,00	7,00	0,00	0,5	T1
<b>22</b>	<b>Rungkut</b>	<b>Trafo-2 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>10,00</b>	<b>149,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
23	Rungkut	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	170,00	16,00	0,50	0,5	T1
24	Rungkut	Trafo-4 150/20 kV 50 MVA	5,31	0,00	0,00	0,04667	PD
<b>25</b>	<b>Rungkut</b>	<b>Trafo-5 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>14,00</b>	<b>144,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
<b>26</b>	<b>Sawah</b>	<b>Trafo-1 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>1,98</b>	<b>15,78</b>	<b>0</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
27	Sawah	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	19,35	1,73	0,00	0,5	T1
28	Surabaya Selatan	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	51,58	4,24	0,00	0,5	T1
29	Surabaya Selatan	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	3,10	0,00	0,00	0,04667	PD
30	Simpang	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	68,00	15,00	0,50	0,5	T1
31	Simpang	Trafo-2 150/20 kV 50 MVA	17,22	0,00	0,00	0,04667	PD
32	Sukolilo	Trafo-1 150/20 kV 50 MVA	59,66	1,66	0,00	0,06105	PD
33	Sukolilo	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	82,07	2,26	0,00	0,06086	PD
34	Sukolilo	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	114,16	23,22	0,00	0,5	T1
35	Sukolilo	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	1,86	0,00	0,00	0,04667	PD
36	Ujung	Trafo-2 150/20 kV 30 MVA	28,23	6,19	0	0,5	T1
37	Undaan	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	29,00	20,00	0,50	0,5	T1
38	Waru	IBT-1 150/70 kV 39 MVA (HV)	6,38	0	0	0,04667	PD
39	Waru	IBT-2 150/70 kV	10,77	0	0	0,04667	PD

No	Gardu Induk	Trafo	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Output	Hasil simulasi DGA Duval
		39 MVA (HV)					
40	Waru	Trafo-3 150/20 kV 60 MVA	38,09	0	0	0,04667	PD
41	Waru	Trafo-4 150/20 kV 60 MVA	95,44	14,4	0	0,5	T1
<b>42</b>	<b>Waru</b>	<b>Trafo-5 150/20 kV 50 MVA</b>	<b>0</b>	<b>73,53</b>	<b>0</b>	<b>0,9533</b>	<b>T3</b>
43	Waru	Trafo-6 150/20 kV 60 MVA	28,25	5,54	0	0,5	T1
44	Wonokromo	Trafo-1 150/20 kV 60 MVA	61,98	39,14	0,00	0,5	T1
45	Wonokromo	Trafo-2 150/20 kV 60 MVA	2,63	2,64	3,97	0,4	D2
46	Porong	Trafo-1 70/20 kV 20 MVA	97,00	7,00	0,50	0,5	T1
47	Porong	Trafo-2 70/20 kV 20 MVA	2,03	0	0	0,04667	PD

### 4.3 Pengolahan AHP (kriteria usia dan tingkat risiko)

Setelah mengetahui hasil dari DGA Duval dengan menggunakan fuzzy tersebut selanjutnya adalah menentukan prioritas dari dua kriteria sisa yakni kriteria usia dengan kriteria tingkat risiko. Penentuan bobot dari masing-masing kriteria didapatkan pada interview/kuisisioner yang telah dilakukan pada *top management* UPT Surabaya. Didapatkan kriteria usia dengan bobot 0,6, sedangkan untuk kriteria tingkat risiko 0,4.

#### 4.3.1 Kriteria Usia

Kriteria usia merupakan lama suatu trafo beroperasi, pada KEPDIR 149 menyatakan bahwa suatu transformator dikategorikan berusia muda apabila beroperasi kurang dari 20 tahun, lalu dikategorikan berusia tua apabila telah beroperasi kurang dari 20 tahun sampai dengan 30 tahun. Sedangkan dikategorikan sangat tua apabila beroperasi lebih dari 30 tahun.

Setelah melakukan eliminasi hasil pengujian DGA Minyak dengan menggunakan metode *fuzzy*, selanjutnya didapatkan 10 transformator (A-J) pada Tabel 4.4 yang merupakan kategori fisik yang buruk. Hasil tersebut kemudian ditentukan kategori usia yang merupakan lama suatu transformator beroperasi,

yang merupakan tahun ini dikurangi dengan tahun operasi transformator tersebut. Dari hasil pengkategorian tersebut didapatkan bahwa transformator B atau trafo 5 Buduran merupakan transformator tertua diantara 10 transformator lainnya yakni 36 tahun. Sedangkan transformator termuda yakni berusia 7 tahun yaitu transformator D (Trafo 3 Darmogrand) dan F (Trafo 2 Kupang).

Tabel 4.4 Kategori Usia untuk 10 Transformator dengan Kondisi T3

Kode	Gardu Induk	Trafo	Tahun Operasi	Usia
A	Babadan	Trafo 2	1996	23
<b>B</b>	<b>Buduran</b>	<b>Trafo 5</b>	<b>1983</b>	<b>36</b>
C	Darmogrand	Trafo 1	1992	27
<b>D</b>	<b>Darmogrand</b>	<b>Trafo 3</b>	<b>2012</b>	<b>7</b>
E	Kenjeran	Trafo 2	1996	23
<b>F</b>	<b>Kupang</b>	<b>Trafo 2</b>	<b>2012</b>	<b>7</b>
G	Rungkut	Trafo 2	1997	22
H	Rungkut	Trafo 5	1996	23
I	Sawahana	Trafo 1	1992	27
J	Waru	Trafo 5	1996	23

#### 4.3.2 Matriks Penilaian secara Langsung (Direct Rating Matrix)

Pada tahap ini dengan menggunakan penilaian berupa perbandingan dari tiap-tiap transformator dengan transformator lainnya untuk kriteria usia. Semisal pada sisi vertikal transformator B (36 tahun) dibandingkan dengan transformator A (23 tahun) pada sisi horizontal maka didapatkan perbandingan kolom B dengan baris A yakni  $36/23$  yakni 1,57. Begitu pula transformator yang lain dilakukan perbandingan yang sama. Sedangkan untuk transformator dengan baris dan kolom yang sama akan didapatkan nilai 1 sesuai Tabel 4.5 berikut. Sedangkan SUM merupakan penjumlahan tiap-tiap transformator dari sisi vertikal, nilai SUM yang paling besar menandakan usia trafo tersebut tergolong muda, lalu beruntun yang lebih kecil merupakan usia yang lebih tua.

Tabel 4.5 Matriks Direct Rating untuk kriteria Usia

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	<b>1,00</b>	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	1,00	0,85	1,00
B	<b>1,57</b>	<b>1,00</b>	1,33	5,14	1,57	5,14	1,64	1,57	1,33	1,57
C	1,17	0,75	<b>1,00</b>	3,86	1,17	3,86	1,23	1,17	1,00	1,17
D	0,30	0,19	0,26	<b>1,00</b>	0,30	1,00	0,32	0,30	0,26	0,30
E	1,00	0,64	0,85	3,29	<b>1,00</b>	3,29	1,05	1,00	0,85	1,00
F	0,30	0,19	0,26	1,00	0,30	<b>1,00</b>	0,32	0,30	0,26	0,30
G	0,96	0,61	0,81	3,14	0,96	3,14	<b>1,00</b>	0,96	0,81	0,96
H	1,00	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	<b>1,00</b>	0,85	1,00
I	1,17	0,75	1,00	3,86	1,17	3,86	1,23	1,17	<b>1,00</b>	1,17
J	1,00	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	1,00	0,85	<b>1,00</b>
SUM	<b>9,48</b>	<b>6,06</b>	<b>8,07</b>	<b>31,14</b>	<b>9,48</b>	<b>31,14</b>	<b>9,91</b>	<b>9,48</b>	<b>8,07</b>	<b>10,13</b>

### 4.3.3 Normalisasi eigenvector

Proses ini bertujuan untuk memperoleh prioritas dari semua transformator setelah semua data dalam matriks perbandingan didapatkan. Proses ini dilakukan dengan membuat normalisasi direct rating matriks yang diperoleh dengan membagi setiap nilai dengan jumlah kolom pada nilai yang bersangkutan, yang mana jumlah dari setiap kolom akan sama dengan 1.

Tabel 4.6 Normalisasi Matriks kriteria usia

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	SUM	Priorit y factor
A	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,06	0,11
B	<b>0,17</b>	<b>1,65</b>	<b>0,17</b>									
C	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	1,24	0,12
D	<b>0,03</b>	<b>0,32</b>	<b>0,03</b>									
E	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,06	0,11
F	<b>0,03</b>	<b>0,32</b>	<b>0,03</b>									
G	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	1,01	0,10
H	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,06	0,11
I	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	1,24	0,12
J	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,06	0,11
SUM	<b>1,00</b>	<b>10,00</b>										

Normalisasi eigen vector ini bertujuan untuk mendapatkan nilai priority factor, yang merupakan nilai bobot untuk masing-masing

transformator. Pada Tabel 4.6 didapatkan bahwa nilai priority factor terbesar adalah transformator B yang mana transformator B merupakan transformator tertua yakni 36 tahun sedangkan untuk nilai priority factor terendah yakni pada transformator D dan F sesuai dengan perhitungan awal sebelumnya.

#### 4.3.4 Kriteria Tingkat Risiko

Kriteria tingkat risiko merupakan kriteria yang menggambarkan empat kondisi yang dialami oleh 10 transformator yang ada yakni: terpasang, kepentingan, dampak serta safety/keamanan sesuai dengan Tabel 4.7. Rating untuk perhitungan dipakai untuk trafo kategori rendah 1, tinggi 2, sangat tinggi 3.

Tabel 4.7 Kategori Tingkat Risiko untuk 10 Transformator dengan Kondisi T3

<b>Kode</b>	<b>Gardu Induk</b>	<b>Trafo</b>	<b>Tingkat Risiko</b>	<b>Rating</b>
A	Babadan	Trafo 2	Tinggi	2
<b>B</b>	<b>Buduran</b>	<b>Trafo 5</b>	<b>Rendah</b>	<b>1</b>
C	Darmogrand	Trafo 1	Tinggi	2
D	Darmogrand	Trafo 3	Tinggi	2
E	Kenjeran	Trafo 2	Tinggi	2
F	Kupang	Trafo 2	Tinggi	2
G	Rungkut	Trafo 2	Tinggi	2
H	Rungkut	Trafo 5	Tinggi	2
I	Sawahen	Trafo 1	Tinggi	2
J	Waru	Trafo 5	Tinggi	2

Dari 10 transformator yang masuk dalam kategori T3 ini semua transformator selain transformator B yakni Trafo 5 Buduran mendapatkan tingkat risiko yang tinggi. Hal ini dikarenakan 9 transformator yang lain adalah transformator dengan ratio 150/20 kV dengan kapasitas 50-60 MVA, sedangkan transformator B atau Trafo 5 Buduran merupakan transformator dengan ratio 70/20 kV dengan kapasitas 20 MVA sehingga dapat dipastikan

apabila terjadi pemadaman trafo B atau trafo 5 Buduran akan menimbulkan beban pemadaman yang lebih rendah (*Energy Not Serve*) dibandingkan dengan trafo 50-60 MVA sesuai Tabel 4.7.

#### 4.3.5 Matriks Penilaian secara Langsung (Direct Rating Matrix)

Pada tahap ini dengan menggunakan penilaian berupa perbandingan dari tiap-tiap transformator dengan transformator lainnya untuk kriteria tingkat risiko.

Tabel 4.8 Matriks direct rating untuk kategori tingkat risiko

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
B	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>							
C	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
D	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
F	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
G	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
H	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
I	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
J	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
SUM	<b>9,5</b>	<b>19</b>	<b>9,5</b>							

Semisal pada sisi vertikal transformator B (1) dibandingkan dengan transformator A (2) pada sisi horizontal maka didapatkan perbandingan kolom B dengan baris A yakni  $1/2$  yakni 0,5. Begitu pula transformator yang lain dilakukan perbandingan yang sama. Sedangkan untuk transformator dengan baris dan kolom yang sama akan didapatkan nilai 1 sesuai Tabel 4.8. sehingga nilai penjumlahan (SUM) yang didapatkan memiliki kesamaan nilai 9,5 pada 9 trafo 150/20 kV sedangkan 1 trafo dengan penjumlahan (SUM) 19 merupakan trafo 70/20 kV dengan kapasitas 20 MVA.

#### 4.3.6 Normalisasi eigenvector

Hampir sama dengan proses normalisasi eigenvector pada kriteria usia, proses ini juga bertujuan untuk memperoleh prioritas dari semua transformator setelah semua data dalam matriks perbandingan didapatkan.

Proses ini dilakukan dengan membuat normalisasi direct rating matriks yang diperoleh dengan membagi setiap nilai dengan jumlah kolom pada nilai yang bersangkutan, yang mana jumlah dari setiap kolom akan sama dengan 1.

Tabel 4.9 Normalisasi Matriks kriteria tingkat risiko

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	SUM	Priority factor
A	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
<b>B</b>	<b>0,05</b>	<b>0,53</b>	<b>0,05</b>									
C	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
D	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
E	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
F	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
G	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
H	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
I	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
J	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,05	<b>0,11</b>
<b>SUM</b>	<b>1</b>	<b>10</b>										

Normalisasi eigen vector ini bertujuan untuk mendapatkan nilai priority factor, yang merupakan nilai bobot untuk masing-masing transformator. Pada Tabel 4.9 didapatkan bahwa nilai priority factor terkecil adalah transformator B yang mana transformator B merupakan transformator dengan tingkat risiko terendah yakni transformator dengan ratio 70/20 kV sedangkan untuk nilai priority factor transformator lainnya memiliki nilai 0,11 yang merupakan tingkat risiko tinggi karena merupakan transformator ratio 150/20 kV.

#### 4.4 Uji konsistensi bobot

Uji konsistensi ini dilakukan untuk menilai konsistensi hirarki keputusan yang telah dihasilkan, dan dibandingkan dengan rasio konsistensi pada index konsistensi, diharapkan hasil uji ini tidak lebih dari 0,1 dengan begitu bobot hirarki keputusan yang dihasilkan adalah konsisten/Valid. Terdapat dua kriteria yang akan dilakukan pengujian sesuai dengan kriteria metode AHP yang dipakai, yakni kriteria usia dan tingkat risiko.

#### 4.4.1 Kriteria usia

Pada uji konsistensi kriteria usia selanjutnya matriks direct rating Tabel 4.10 dikalikan dengan priority factor, untuk kemudian didapatkan nilai AX. Nilai  $\lambda$  didapat dengan membagi priority factor dengan AX. Rata-rata  $\lambda$  digunakan untuk memperoleh nilai Consistency Index (CI).

Tabel 4.10 Hasil uji konsistensi bobot kriteria usia

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Priority factor	AX	$\lambda$
A	1,0	0,6	0,9	3,3	1,0	3,3	1,0	1,0	0,9	1,0	0,1	1,1	10,2
B	1,6	1,0	1,3	5,1	1,6	5,1	1,6	1,6	1,3	1,6	0,2	1,7	10,2
C	1,2	0,8	1,0	3,9	1,2	3,9	1,2	1,2	1,0	1,2	0,1	1,3	10,2
D	0,3	0,2	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0	0,3	10,2
E	1,0	0,6	0,9	3,3	1,0	3,3	1,1	1,0	0,9	1,0	0,1	1,1	10,2
F	0,3	0,2	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	0,3	0,3	1,0	0,0	0,4	10,3
G	1,0	0,6	0,8	3,1	1,0	3,1	1,0	1,0	0,8	1,0	0,1	1,0	10,2
H	1,0	0,6	0,9	3,3	1,0	3,3	1,1	1,0	0,9	1,0	0,1	1,0	10,2
I	1,2	0,8	1,0	3,9	1,2	3,9	1,2	1,2	1,0	1,2	0,1	1,3	10,2
J	1,0	0,6	0,9	3,3	1,0	3,3	1,1	1,0	0,9	1,0	0,1	1,1	10,2
SUM	9,5	6,1	8,1	31,1	9,5	31,1	9,9	9,5	8,1	10,1		Rata2	10,2
												CI	<b>0,02</b>

Consistency Index (CI)

$$\frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{10,21 - 10}{10 - 1} = 0,02$$

Tabel 4.11 Random Indeks (RI)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Adalah tahap terakhir, dengan menggunakan Tabel 4.11 Baris atas adalah urutan matriks acak, dan baris bawah adalah indeks konsistensi yang sesuai untuk penilaian acak

$$CR = \frac{CI}{1.49} = \frac{0.02}{1.49} = 0.0134$$

Dari hasil pengujian CI didapatkan nilai 0,0134, yang mana nilai tersebut < 0,1 sehingga dapat dikatakan hirarki keputusan yang dihasilkan adalah konsisten/Valid sehingga konsistensi penilaian sudah sesuai dengan urutannya.

#### 4.4.2 Kriteria Tingkat Risiko

Tabel 4.12 Hasil uji konsistensi bobot kriteria tingkat risiko

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Priority factor	AX	$\lambda$
A	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
B	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05	0,53	10,00
C	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
D	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
E	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
F	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
G	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
H	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
I	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
J	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11	1,05	10,00
SUM	9,5	19	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5		Rata2	10,00
												CI	<b>0,00</b>

Pada uji konsistensi kriteria tingkat risiko selanjutnya matriks direct rating Tabel 4.12 dikalikan dengan priority factor, untuk kemudian didapatkan nilai AX. Nilai  $\lambda$  didapat dengan membagi priority factor dengan AX. Rata-rata  $\lambda$  digunakan untuk memperoleh nilai Consistency Index (CI)

Consistency Index (CI)

$$\frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{10 - 10}{10 - 1} = 0$$

Dari hasil pengujian CI didapatkan nilai 0, sehingga dapat dikatakan hirarki keputusan yang dihasilkan adalah konsisten/Valid sehingga konsistensi penilaian sudah sesuai dengan urutannya.

#### 4.5 Prioritas Penggantian

Setelah diketahui bahwa Consistency Ratio (CR) dari dua kriteria tersebut < 0,1 dan dapat dikatakan hirarki keputusannya adalah konsisten/valid, maka tahap selanjutnya adalah mengalikan priority vector dengan bobot permasing-

masing kriteria. Dari hasil kuisisioner/interview kepada Manager UPT serta Manager Bidang Perencanaan dan Evaluasi didapatkan bobot yang sama untuk usia adalah 0,6 sedangkan bobot untuk tingkat risiko adalah 0,4, hal ini menunjukkan bahwa manajemen dari PLN UPT surabaya tersebut lebih mementingkan usia operasi transformator tersebut dikatakan sangat tua/tua dibandingkan dengan tingkat risiko.

Kriteria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Umur Operasi						X				
Tingkat Risiko				X						

Gambar 4.14 Hasil Survey Penilaian oleh Manager UPT

Kriteria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Umur Operasi						X				
Tingkat Risiko				X						

Gambar 4.15 Hasil Survey Penilaian oleh Manajer Perencanaan dan Evaluasi

Hasil resultan dari perkalian priority vector perkriteria dengan bobotnya akan didapatkan nilai yang merupakan hasil penilaian akhir yang apabila diurutkan dari yang terbesar ke terkecil akan didapatkan urutan penggantian transformator sesuai Tabel 4.13 berikut ini.

1. Transformator B mendapat nilai resultan tertinggi yakni 0,120135 sehingga mendapatkan peringkat tertinggi sebagai prioritas penggantian, hal ini sesuai dengan hasil kondisi teknis yang T3, lalu usia yang sangat tua yakni 36 tahun (paling tua dibandingkan dengan 9 trafo lainnya) yaitu 0.165138, sedangkan untuk tingkat risiko rendah karena merupakan trafo 70/20 kV. Dikarenakan bobot untuk tingkat risiko yang lebih rendah yaitu 0,052632 dibandingkan dengan bobot kriteria usia.

2. Sedangkan untuk peringkat 2 terdapat dua trafo yang memiliki nilai sama yakni 0.116417 (Trafo C dan I), hal ini dikarenakan usia trafo yang sama 27 tahun dan tergolong Tua yaitu 0,123853, dan tingkat risiko yang sama juga yakni tinggi yaitu 0,105263.
3. Pada peringkat 3 terdapat 4 trafo yang memiliki nilai sama yakni 0.105408 (Trafo A, E, H, dan J) dengan usia trafo yang sama yakni 23 tahun yaitu 0,105505 dan tingkat risiko yang sama juga yaitu tinggi yaitu 0,105263.
4. Pada peringkat 4 terdapat satu trafo dengan nilai resultan 0.102656 yaitu trafo G dengan usia trafo 22 yang tergolong tua yaitu 0,100917 dan tingkat risiko tinggi yaitu 0,105263.
5. Pada peringkat 5 terdapat dua trafo yang memiliki nilai sama dengan nilai resultan 0.061371 yakni trafo D dan F dengan usia trafo 7 tahun yang tergolong muda yaitu 0,032110 dan tingkat risiko tinggi yaitu 0,105263.

Tabel 4.13 Prioritas Penggantian Transformator

	Kriteria (bobot)		Resultan	Peringkat
	Priority factor Usia (0,6)	Priority factor tingkat Risiko (0,4)		
A	0,105505	0,105263	0,105408	<b>3</b>
B	0,165138	0,052632	0,120135	<b>1</b>
C	0,123853	0,105263	0,116417	<b>2</b>
D	0,032110	0,105263	0,061371	<b>5</b>
E	0,105505	0,105263	0,105408	<b>3</b>
F	0,032110	0,105263	0,061371	<b>5</b>
G	0,100917	0,105263	0,102656	<b>4</b>
H	0,105505	0,105263	0,105408	<b>3</b>
I	0,123853	0,105263	0,116417	<b>2</b>
J	0,105505	0,105263	0,105408	<b>3</b>

Pada Tabel 4.13 didapatkan adanya peringkat ganda yakni pada peringkat 2, 3, dan 5 hal ini menyebabkan kesulitan untuk dilakukannya peringkat yang

lebih detail untuk dapat menjadi acuan management dalam melakukan penggantian trafo. Meskipun dalam implementasinya metode AHP tidak secara signifikan dapat menentukan prioritas penggantian trafo tersebut, tetapi metode fuzzy yang diterapkan berguna untuk menentukan kondisi teknis trafo. Selain itu tingkat range untuk kategori tingkat risiko yang sebatas 3 range menyebabkan prioritas yang didapatkan tidak detail/signifikan dengan trafo yang lainnya. Banyaknya sample yang digunakan yakni 47 trafo menyebabkan diperlukan adanya eliminasi terlebih dahulu untuk mempermudah penentuan prioritasnya

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian ini menggunakan metodologi baru yang digunakan untuk memprioritaskan penggantian transformator daya dengan menggunakan metode fuzzy untuk menentukan kondisi teknis, kemudian metode AHP yang digunakan untuk penggantian prioritas disebut oleh KEPDIR 149, sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

1. Hasil kuisisioner/ interview untuk menentukan bobot kriteria yang dipakai untuk metode AHP adalah kriteria usia 0,6 dan kriteria tingkat risiko 0,4. Hal ini menunjukkan bahwa kriteria usia trafo lebih menjadi prioritas penggantian dibandingkan dengan tingkat risiko.
2. Transformator B yang merupakan Trafo 5 Buduran menjadi prioritas tertinggi dari penggantian, hal ini sesuai dengan hasil kondisi teknis yang T3, lalu usia yang sangat tua yakni 36 tahun (paling tua dibandingkan dengan 9 trafo lainnya), sedangkan untuk tingkat risiko rendah karena merupakan trafo 70/20 kV. Dikarenakan bobot untuk tingkat risiko yang lebih rendah dibandingkan dengan bobot kriteria usia.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang diberikan agar menjadi perbaikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu adanya penambahan kriteria dan kategori subkriteria yang lebih bervariasi, karena yang menjadi acuan penulis hanya berdasarkan KEPDIR 149, sehingga untuk mendapatkan hasil prioritas yang lebih akurat.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Siada, A., & Hmood, S. (2015). A new fuzzy logic approach to identify power transformer criticality using dissolved gas-in-oil analysis. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 67, 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.017>
- Direksi, K. (2013). *Kriteria Penggantian Peralatan Utama Gardu Induk di Lingkungan PT PLN (Persero)*.
- Duval, M. (2006). Dissolved Gas Analysis and the Duval Triangle. *TechCon Asia Pacific, Sydney, Australia*, 1–20.
- Enanv, S. I. S., Medical, H., Ab, S., & Bertling, S. (2010). *International Standard* (Vol. 2004).
- Flores, W. C., Mombello, E. E., Jardini, J. A., Rattá, G., & Corvo, A. M. (2011). Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8119–8127. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.153>
- Janko, W. (2005). *Multi-Criteria Decision Making: An Application Study of ELECTRE&TOPSIS*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Kusumawardani, S. (2006). *Fuzzy Multi Attribute Decision Making (Fuzzy MADM)*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Malik, H., Tarkeshwar, & Jarial, R. K. (2012). Make use of DGA to carry out the transformer oil-immersed paper deterioration condition estimation with fuzzy-logic. *Procedia Engineering*, 30(2010), 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.900>
- PT. PLN (Persero). (2014). *Buku Pedoman Pemeliharaan Peralatan Primer Gardu Induk*. 142.
- Saaty, T. (2008). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.

Schmitz, W. I., Feil, D. L. P., Canha, L. N., Abaide, A. R., Marchesan, T. B., & Carraro, R. (2018). Operational vulnerability indicator for prioritization and replacement of power transformers in substation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *102*(April), 60–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.04.012>

Sun, H. C., Huang, Y. C., & Huang, C. M. (2012). A review of dissolved gas analysis in power transformers. *Energy Procedia*, *14*(2011), 1220–1225.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1079>

Zadeh. (1965). Fuzzy Set. *Information and Control*, *8*, 338–353.



## Lampiran 2 Kuosioner Penentuan Bobot Penggantian Transformator Oleh Manager

### KUISIONER PENENTUAN BOBOT PENGGANTIAN TRANSFORMATOR

Nama: Rahmat

Jabatan: Manager

Berdasarkan KEPDIR 149 tahun 2013 mengenai penggantian MTU terdapat tiga kriteria, menurut saudara untuk skala 1-10 manakah yang paling penting untuk penggantian transformator dari ketiga Kriteria berikut:

Kriteria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Umur Operasi						X				
Tingkat Risiko				X						

### Lampiran 3 Kuosioner Penentuan Bobot Penggantian Transformator Oleh Manager Perencanaan dan Evaluasi

#### KUISIONER PENENTUAN BOBOT PENGGANTIAN TRANSFORMATOR

Nama: Nur Fajar Fardiansyah U

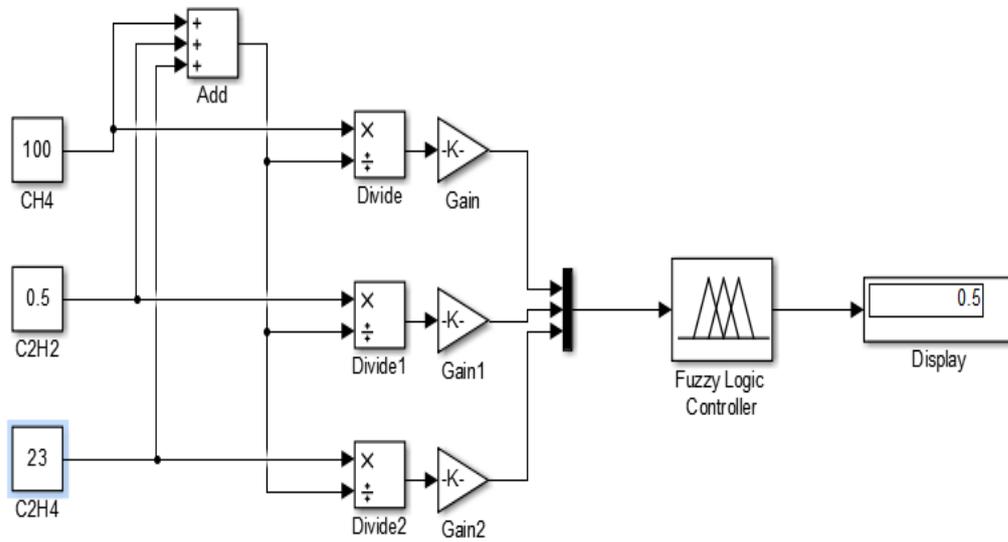
Jabatan: Manajer Renev

Berdasarkan KEPDIR 149 tahun 2013 mengenai penggantian MTU terdapat tiga kriteria, menurut saudara untuk skala 1-10 manakah yang paling penting untuk penggantian transformator dari ketiga Kriteria berikut:

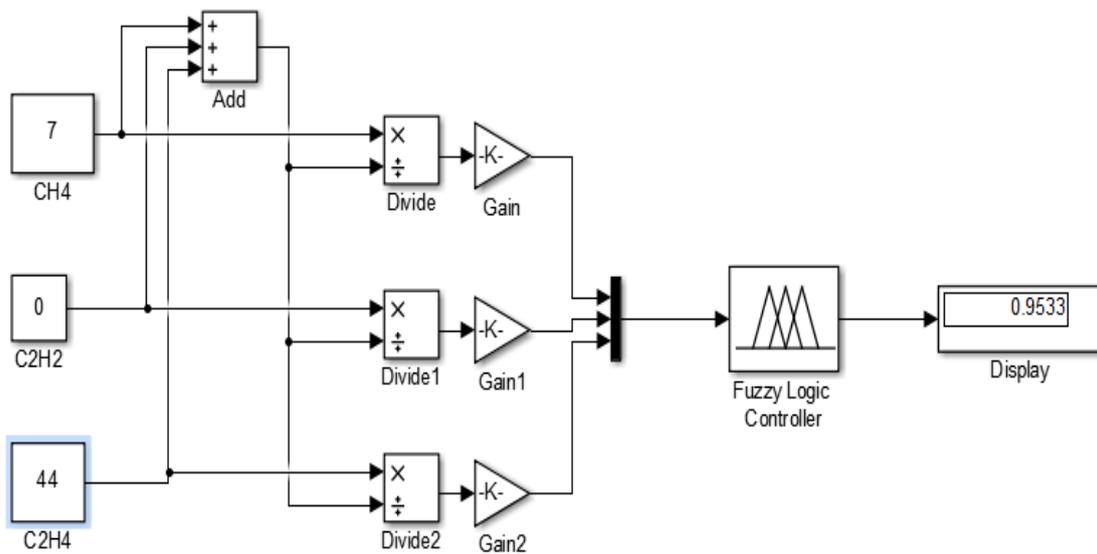
Kriteria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Umur Operasi						X				
Tingkat Risiko				X						

## Lampiran 4 Hasil Simulasi Fuzzy Untuk Kondisi Fisik

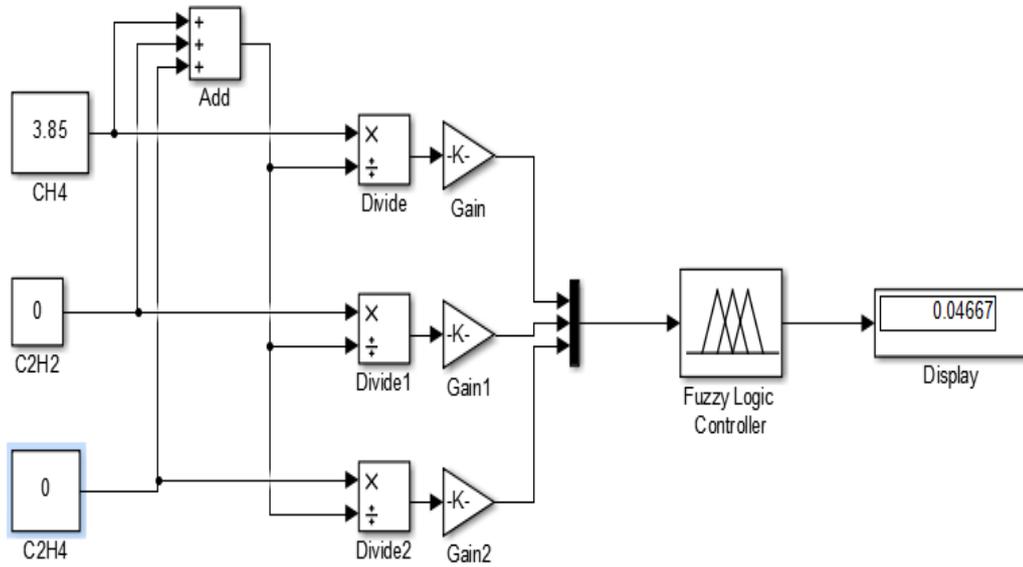
### 1. Trafo 1 Babadan



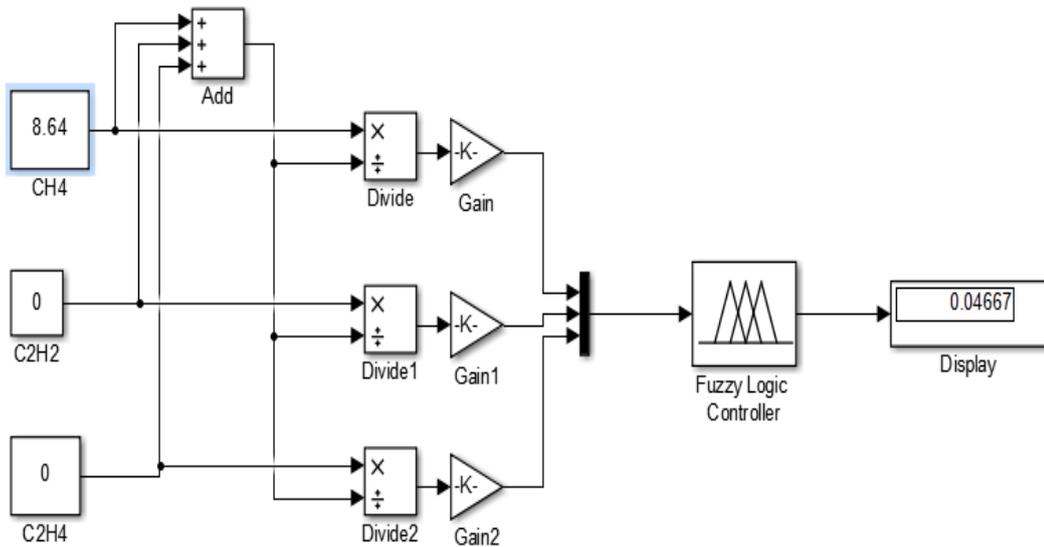
### 2. Trafo 2 Babadan



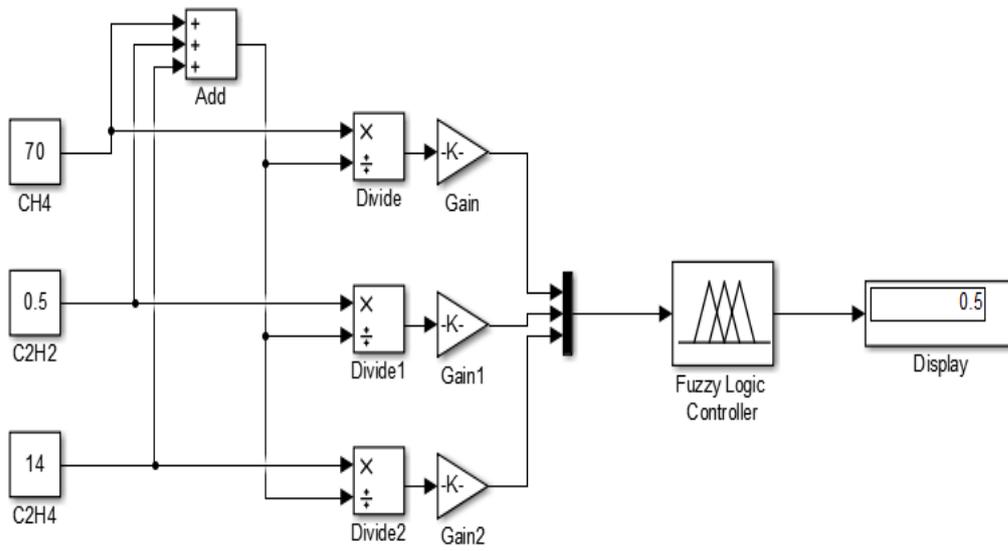
### 3. Trafo 3 Babadan



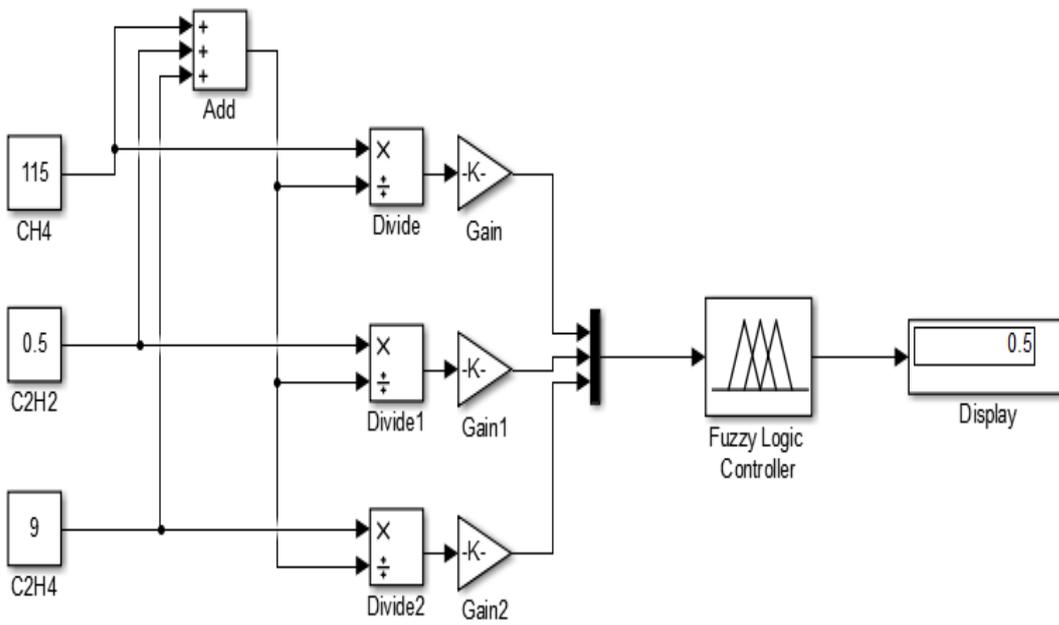
### 4. IBT 1 Buduran



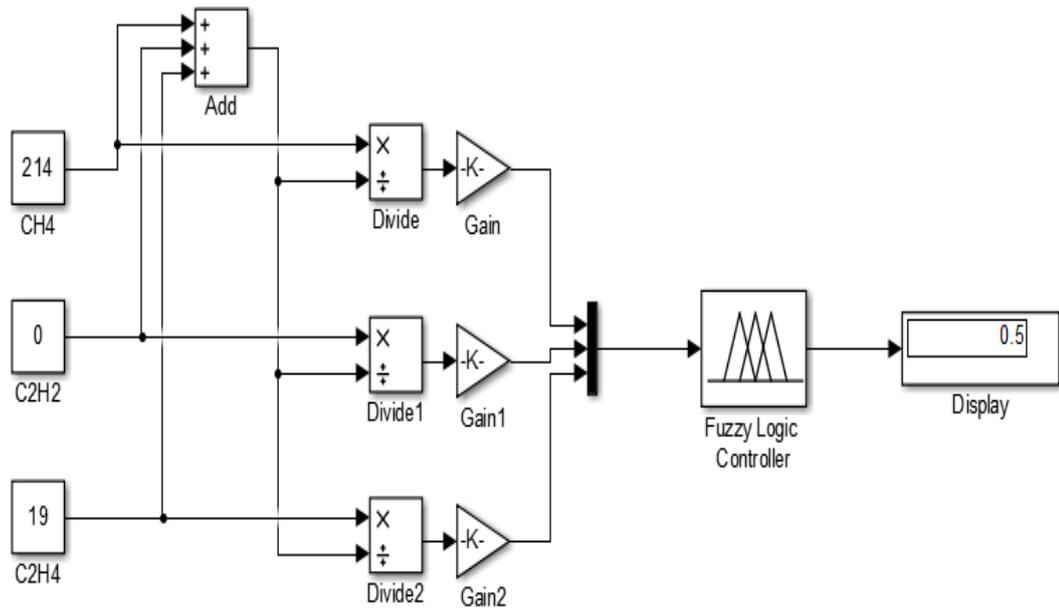
### 5. Trafo 2 buduran



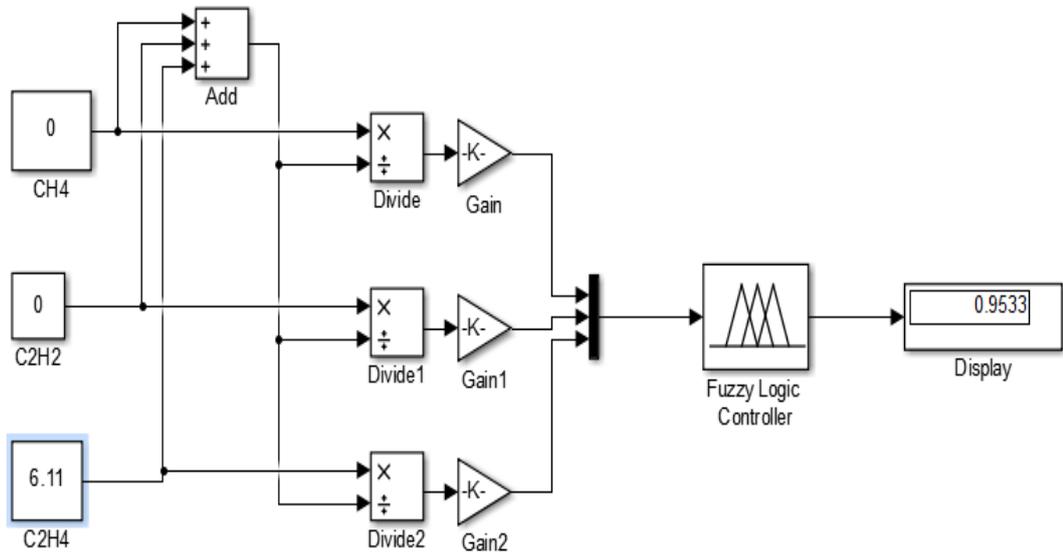
### 6. Trafo 3 Buduran



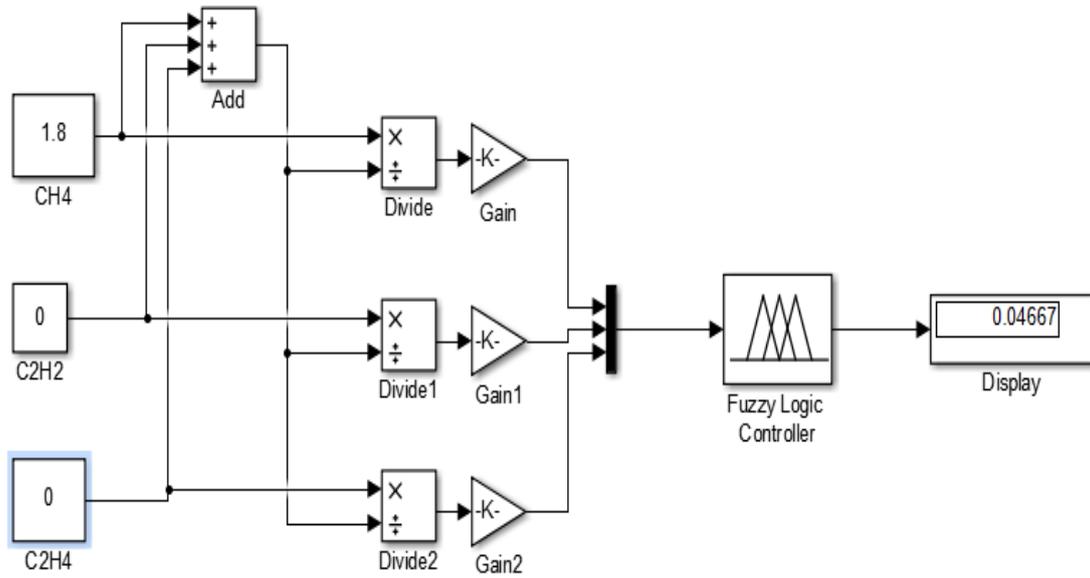
### 7. Trafo 4 Buduran



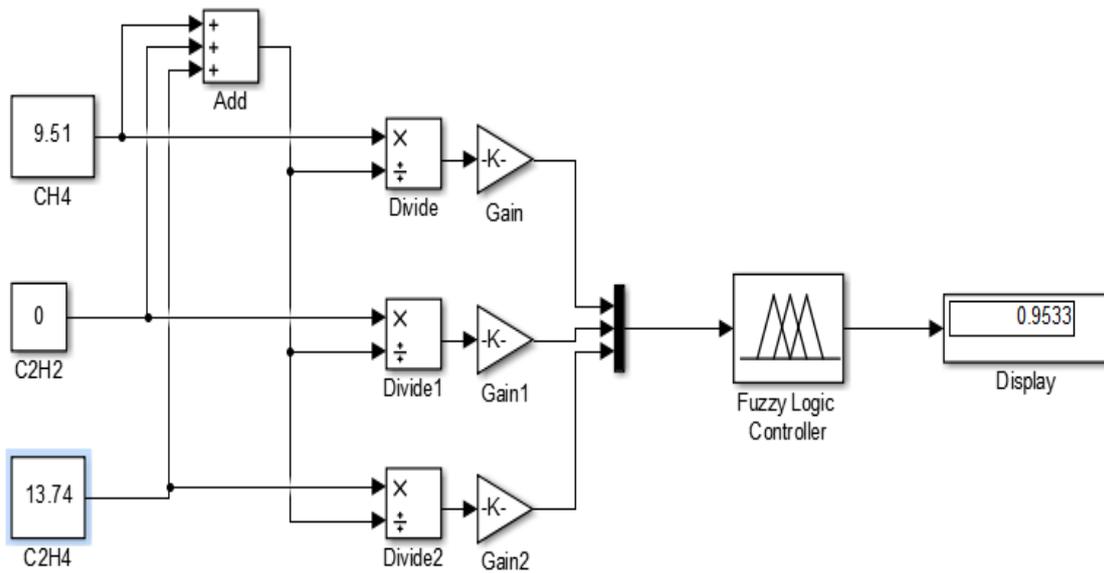
### 8. Trafo 5 Buduran



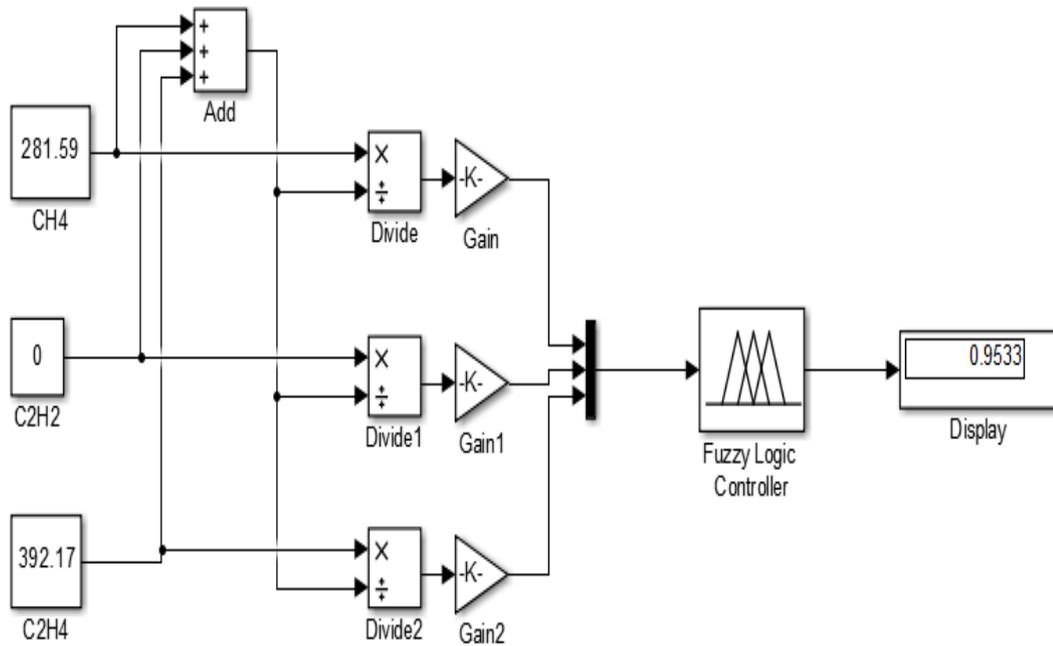
### 9. Trafo 6 Buduran



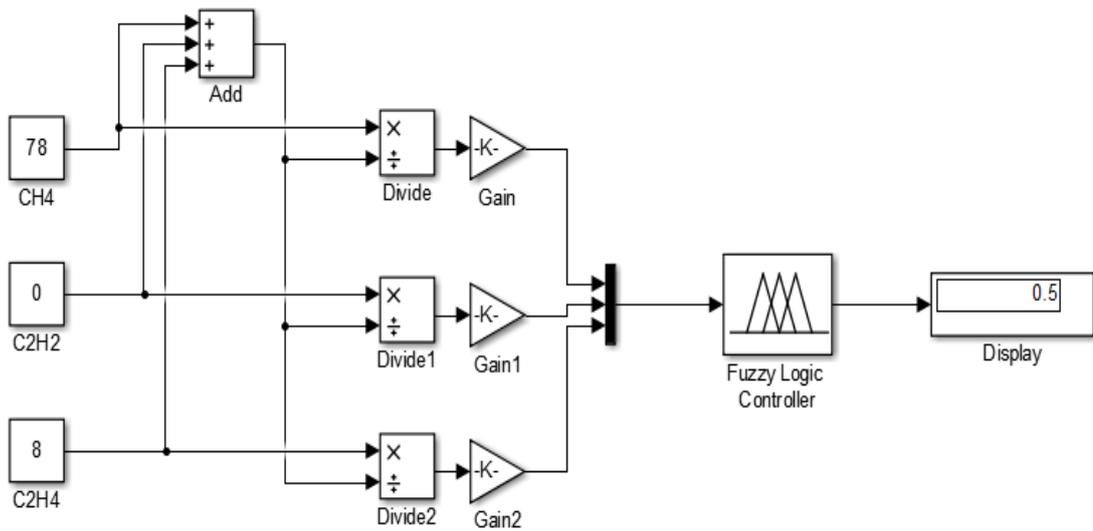
### 10. Trafo 1 Darmogrand



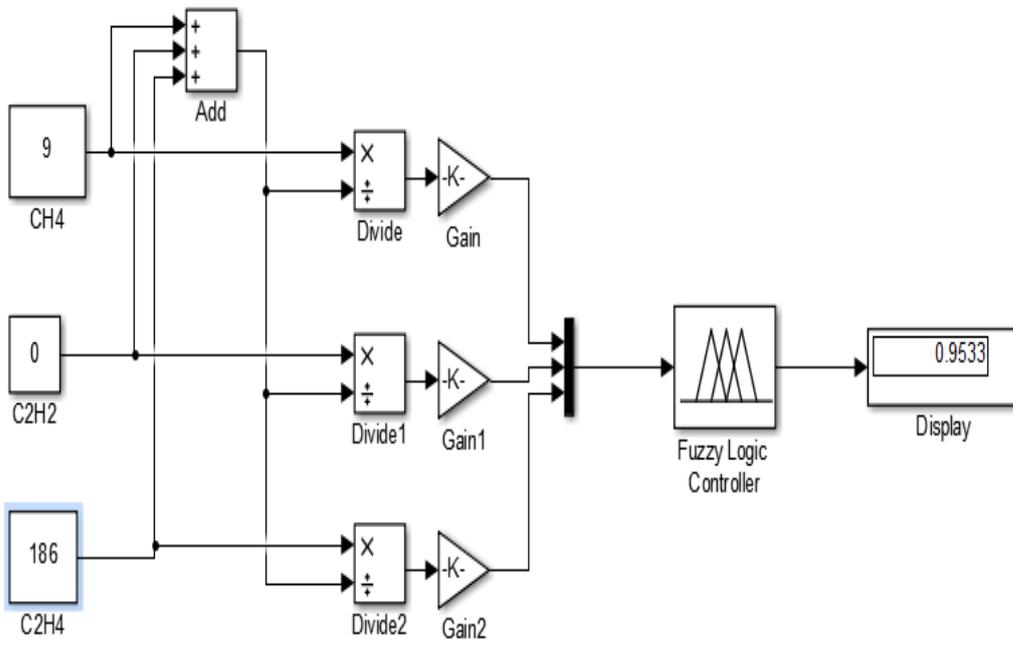
### 11. Trafo 3 Darmogrand



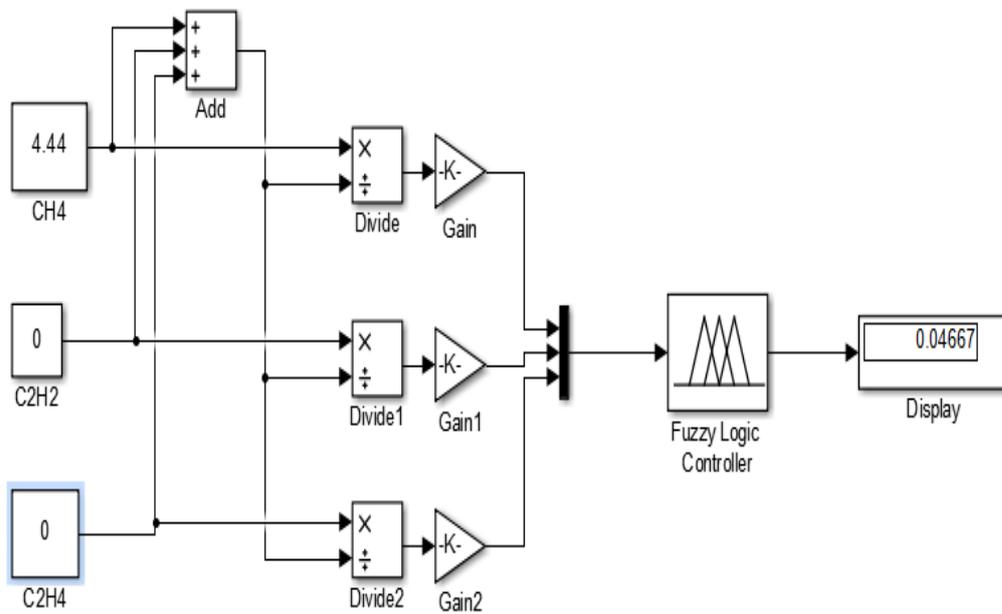
### 12. Trafo 1 Kenjeran



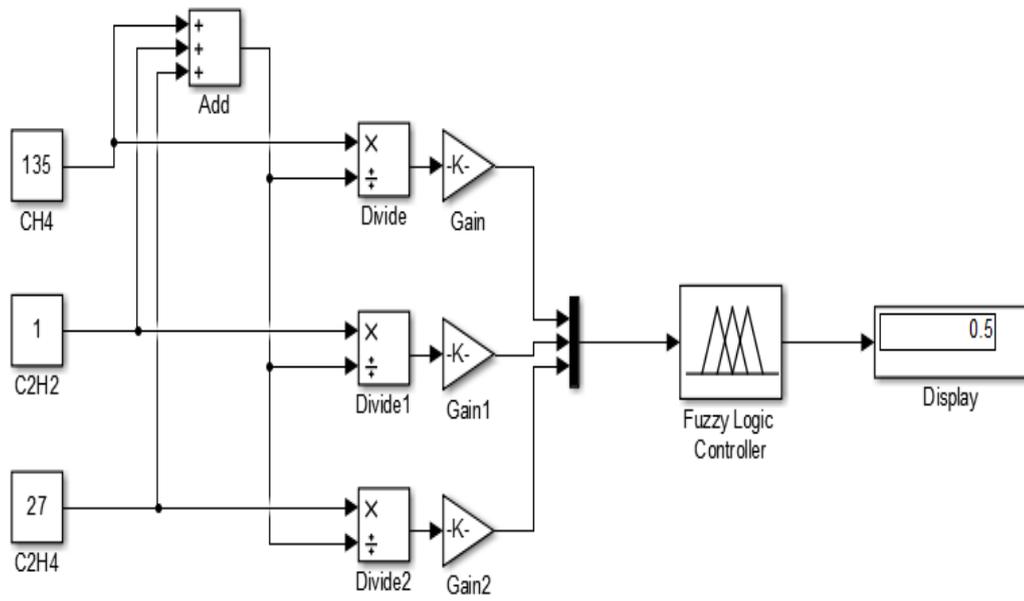
### 13. Trafo 2 Kenjeran



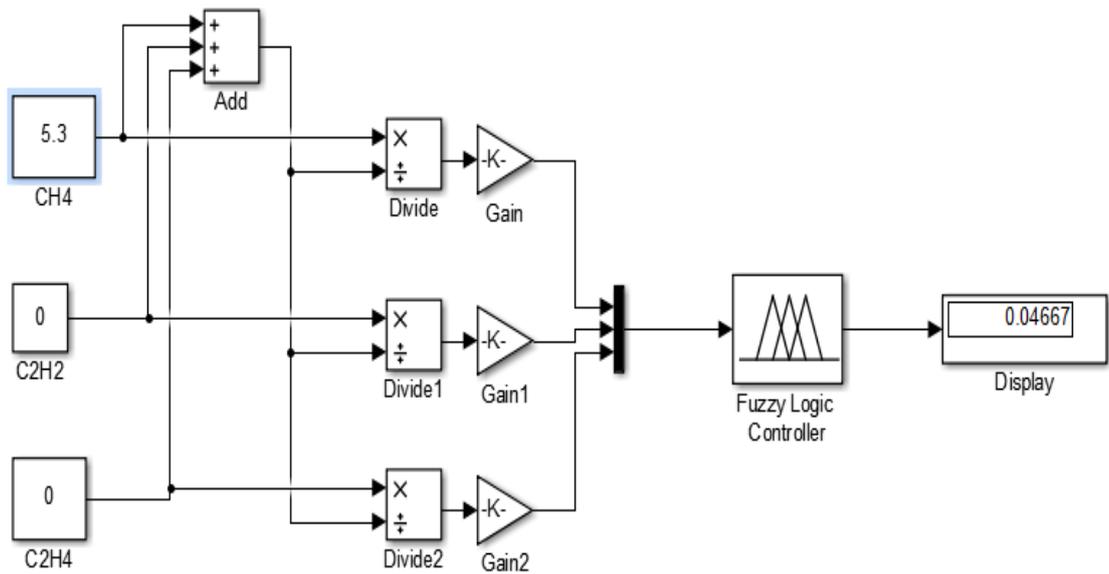
### 14. Trafo 3 Kenjeran



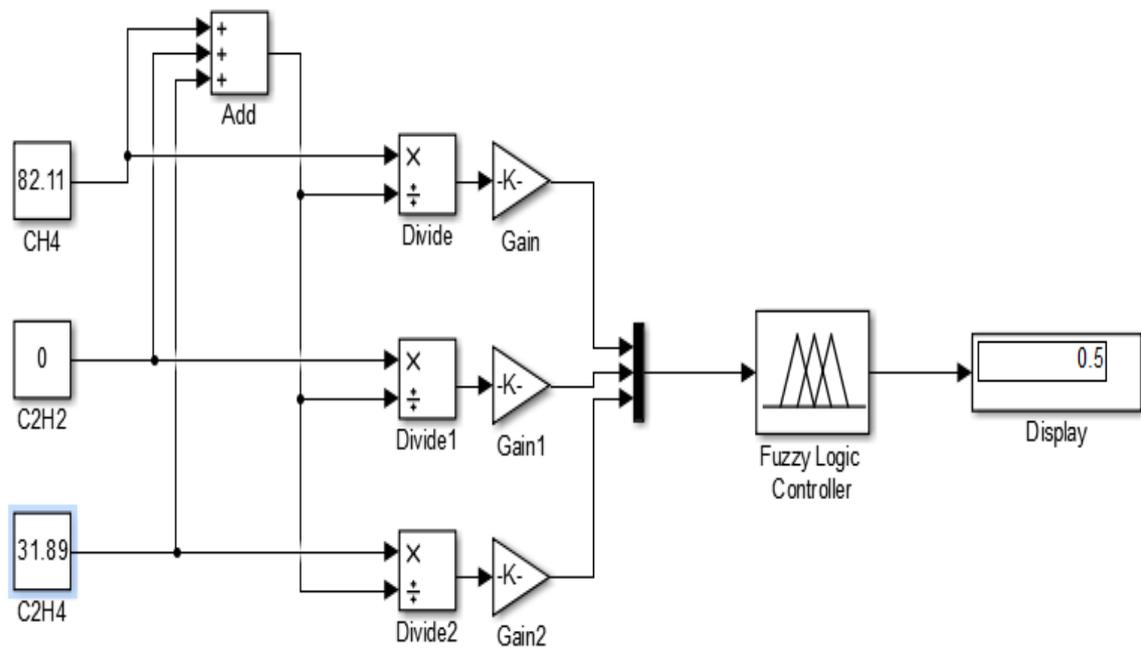
### 15. Trafo 2 Krembangan



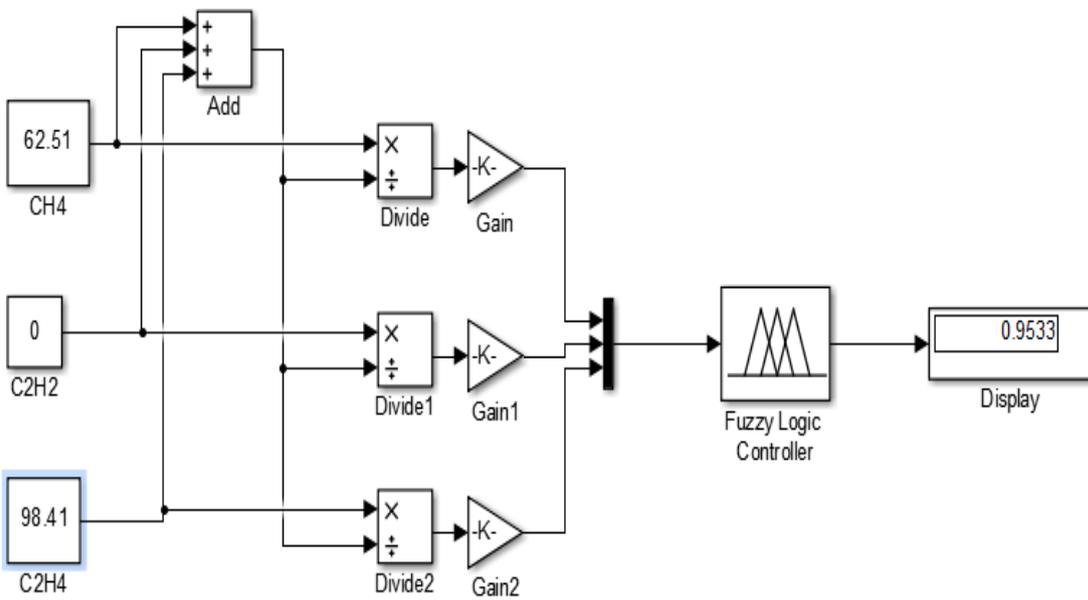
### 16. Trafo 3 Krembangan



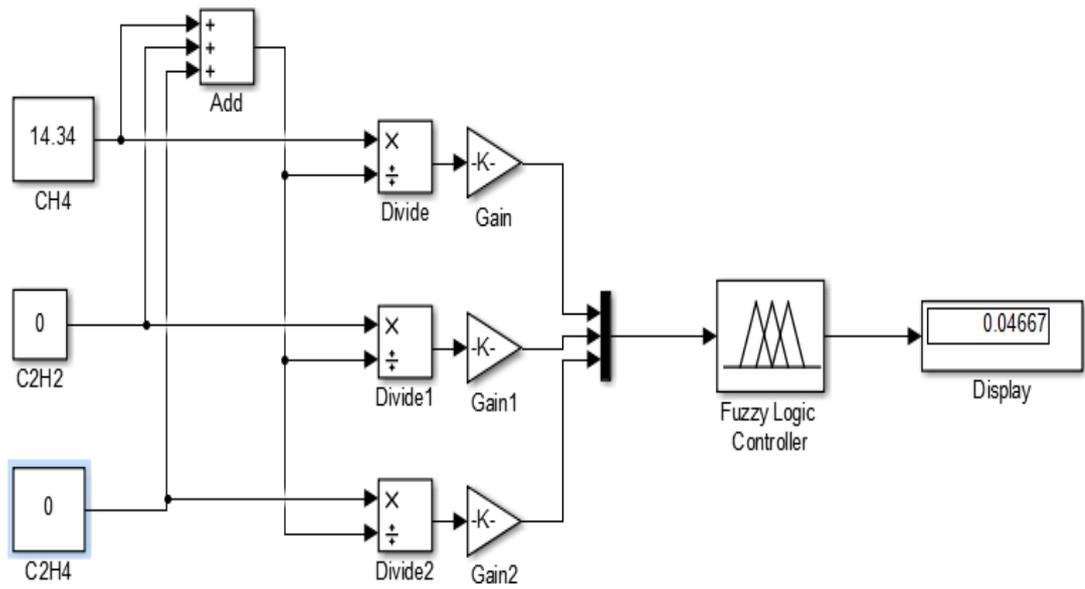
### 17. Trafo 1 Kupang



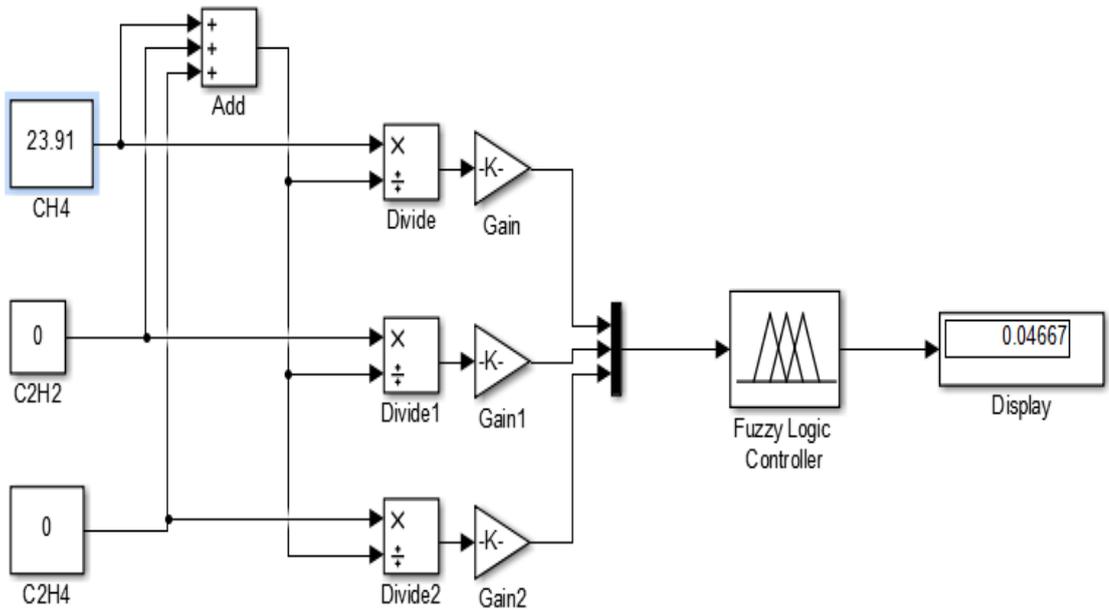
### 18. Trafo 2 Kupang



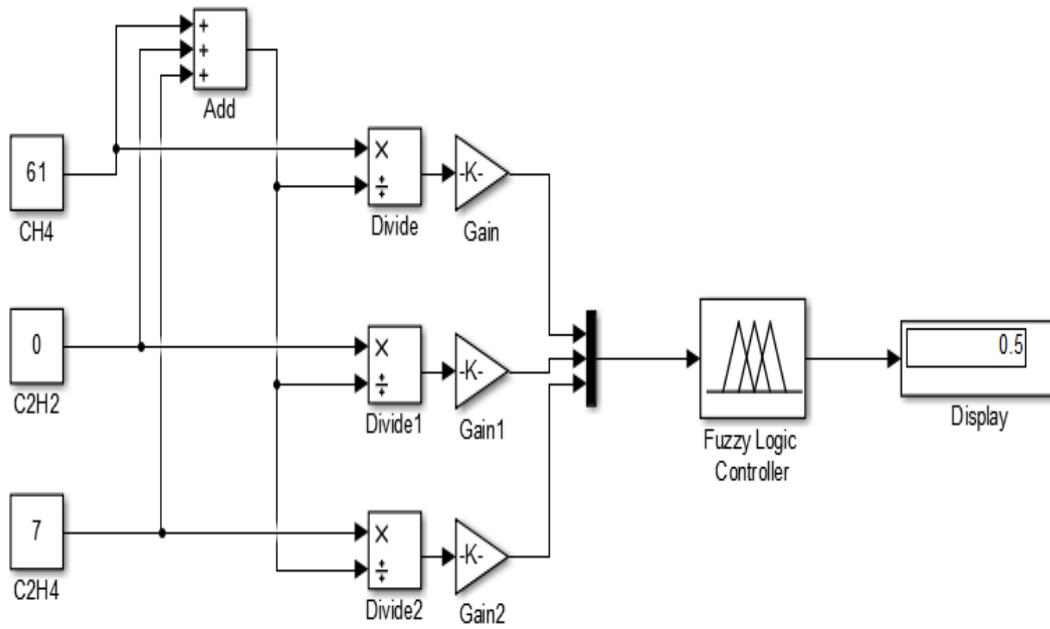
### 19. Trafo 1 Ngagel



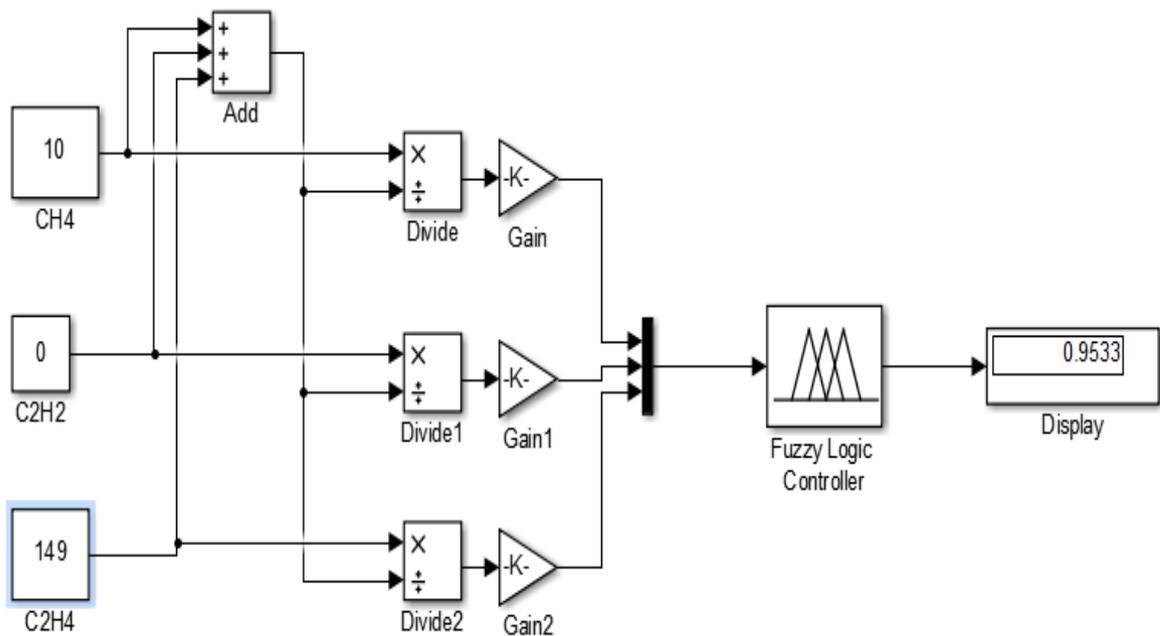
### 20. Trafo 1 Perak



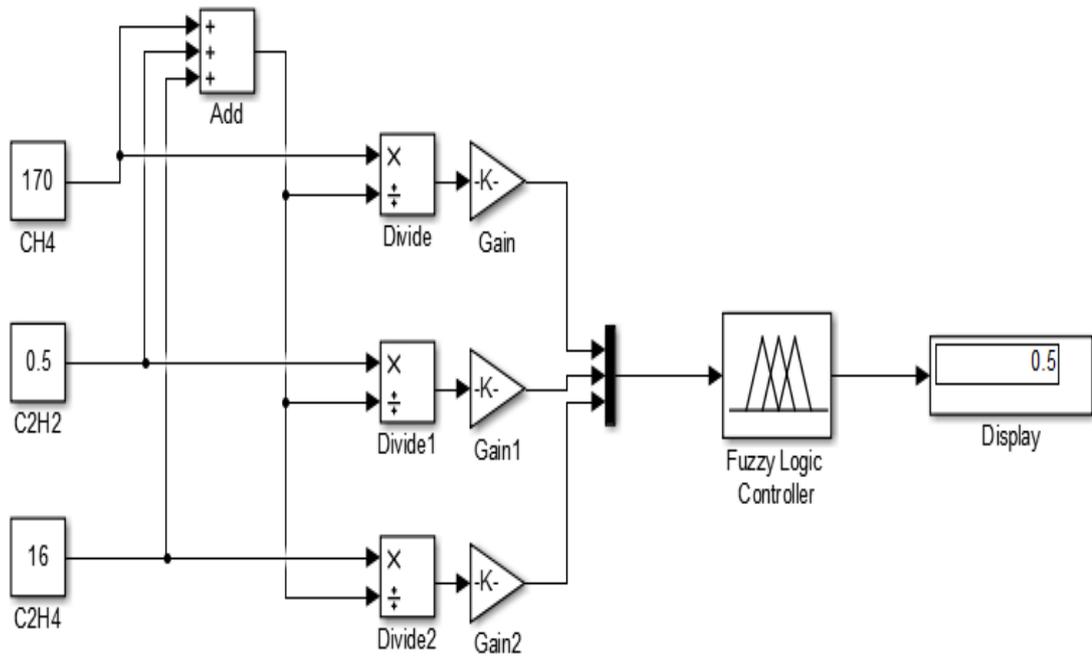
## 21. Trafo 1 Rungkut



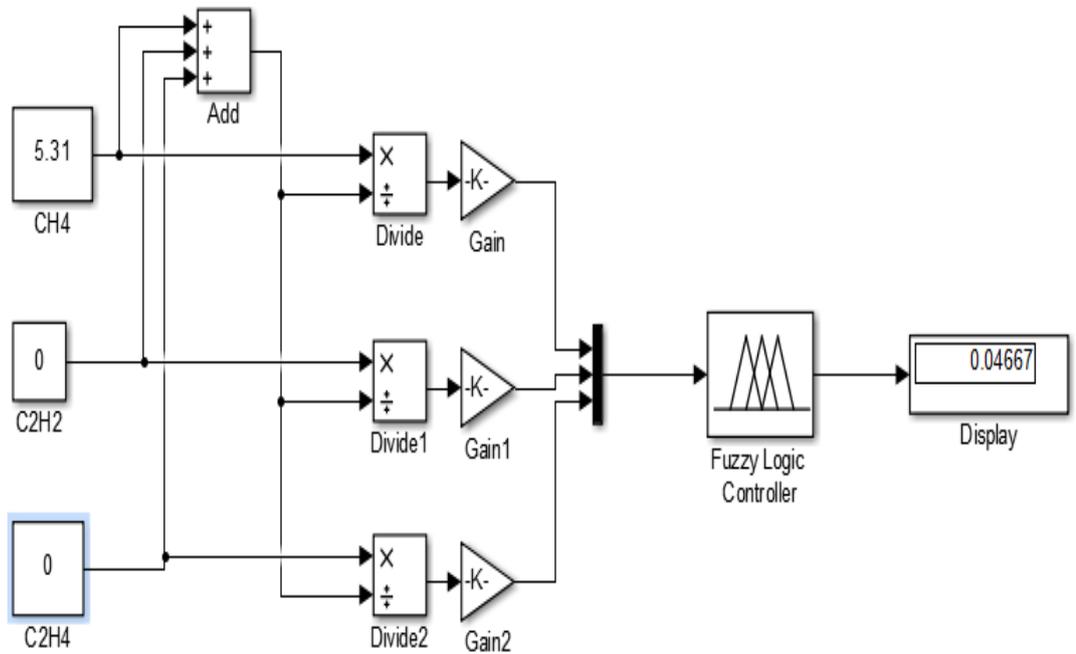
## 22. Trafo 2 Rungkut



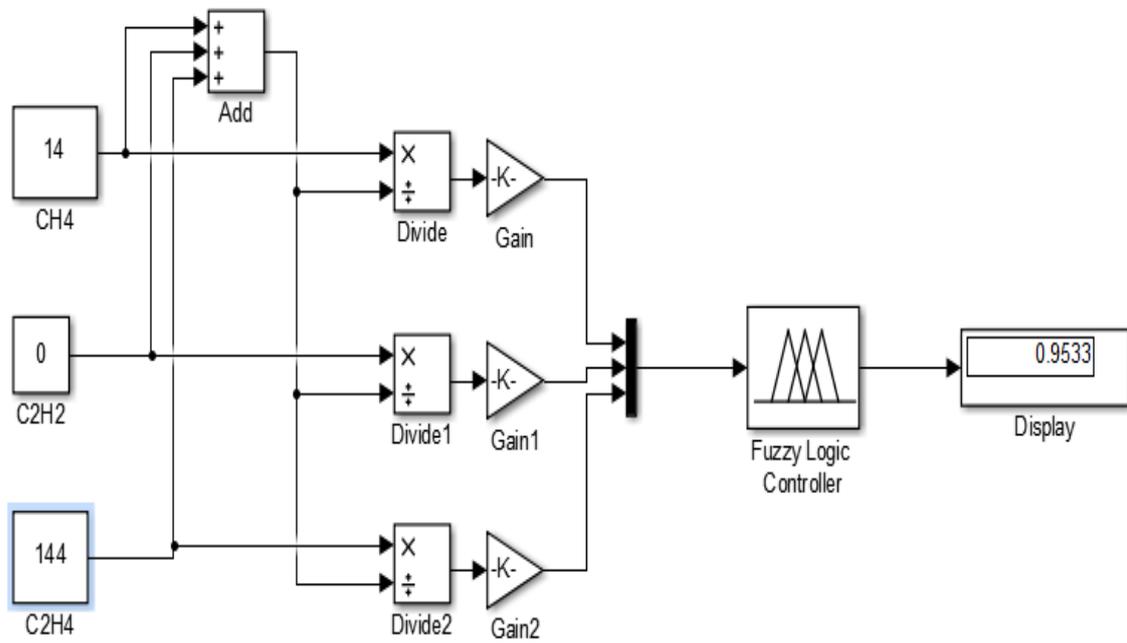
### 23. Trafo 3 Rungkut



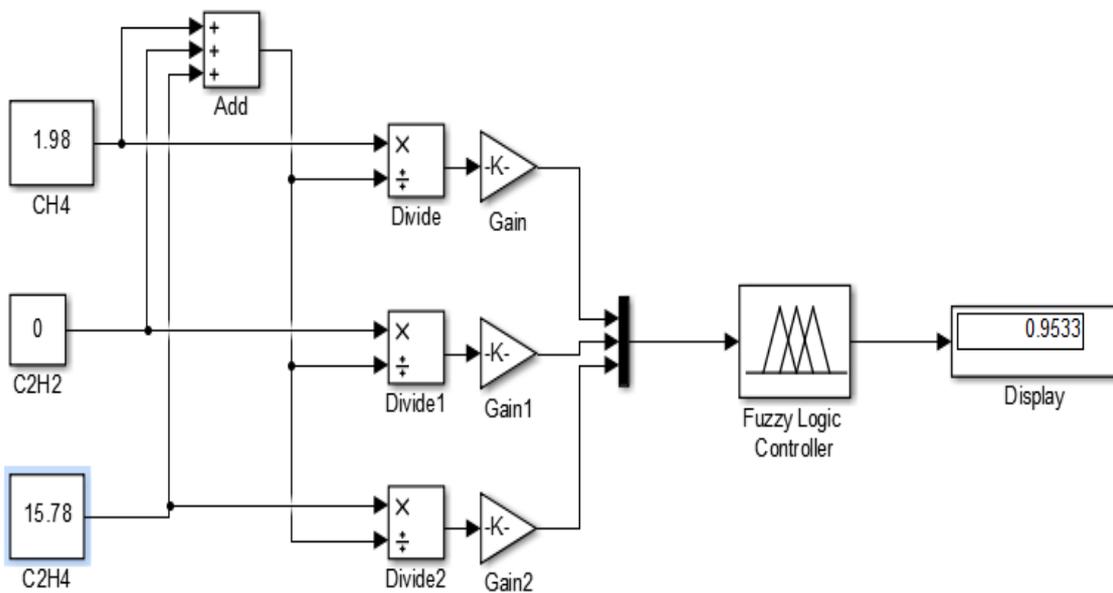
### 24. Trafo 4 Rungkut



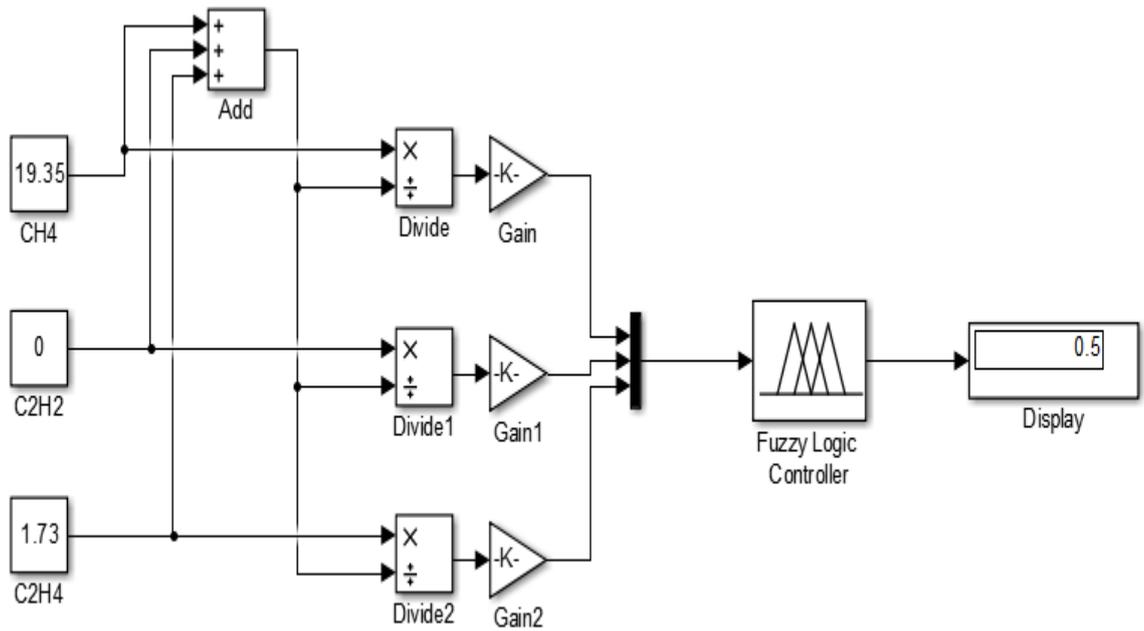
## 25. Trafo 5 Rungkut



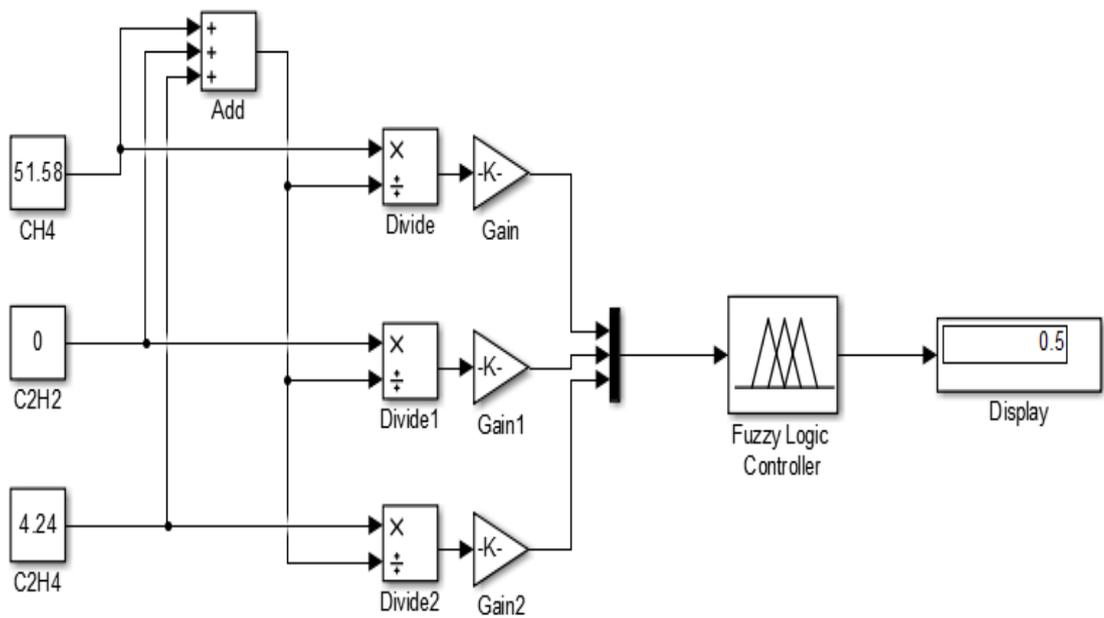
## 26. Trafo 1 Sawahan



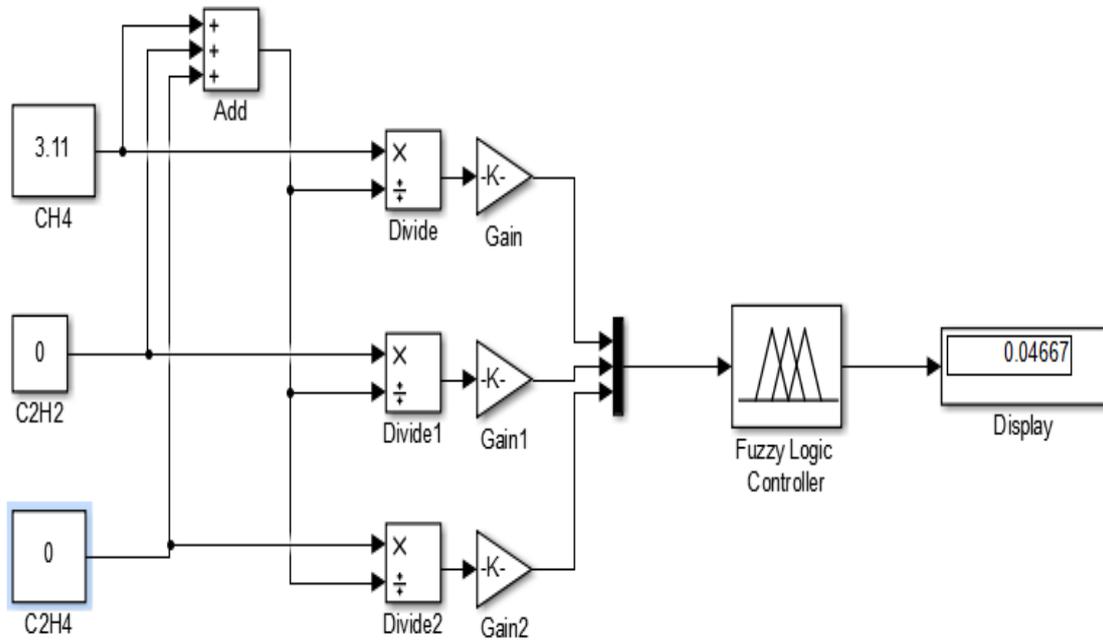
### 27. Trafo 3 Sawahan



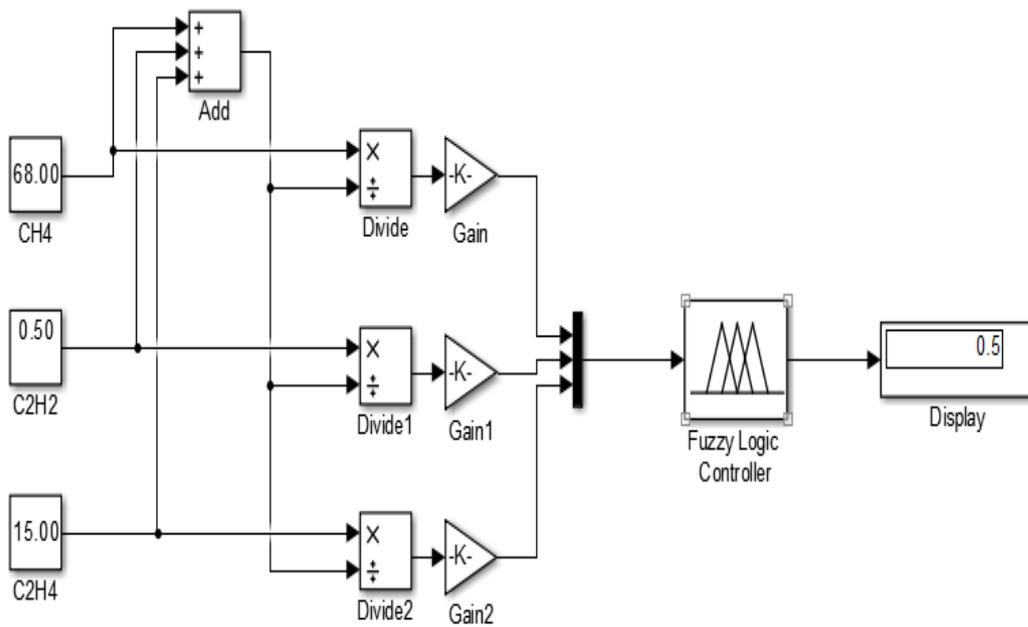
### 28. Trafo 1 Surabaya Selatan



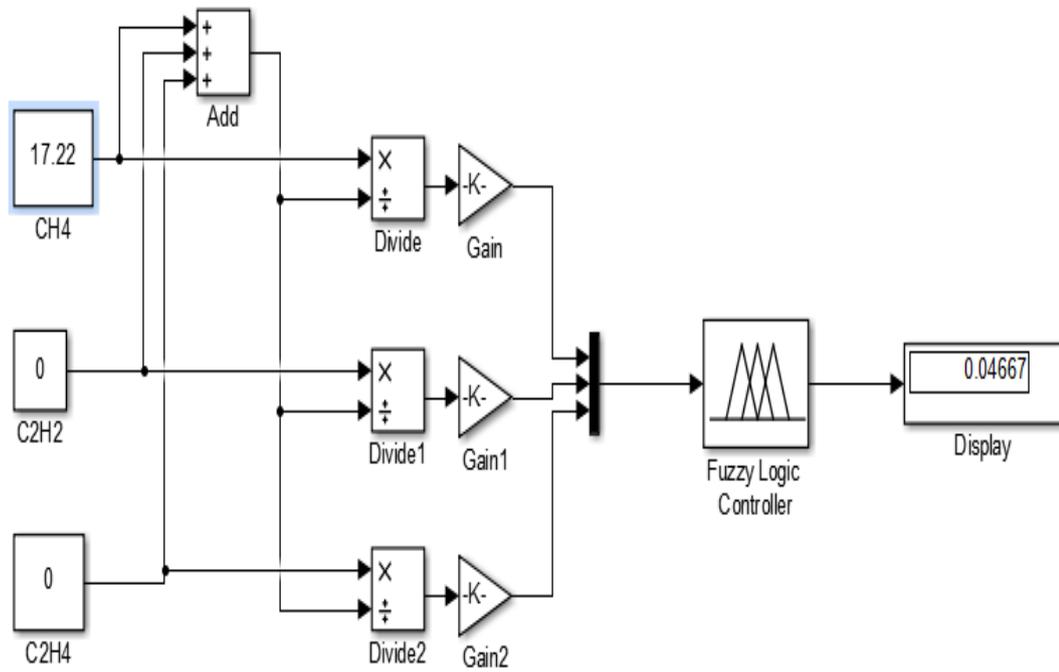
### 29. Trafo 2 Surabaya Selatan



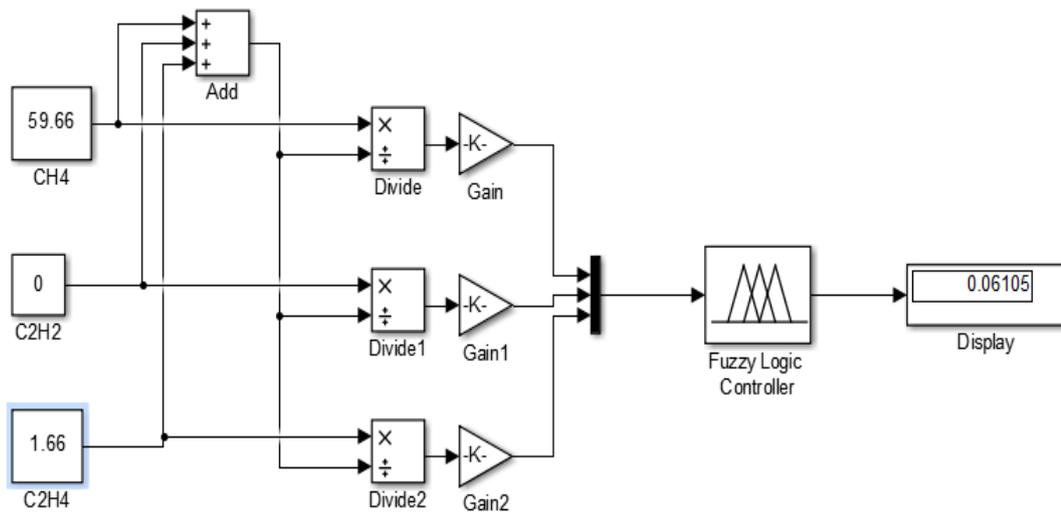
### 30. Trafo 1 Simpang



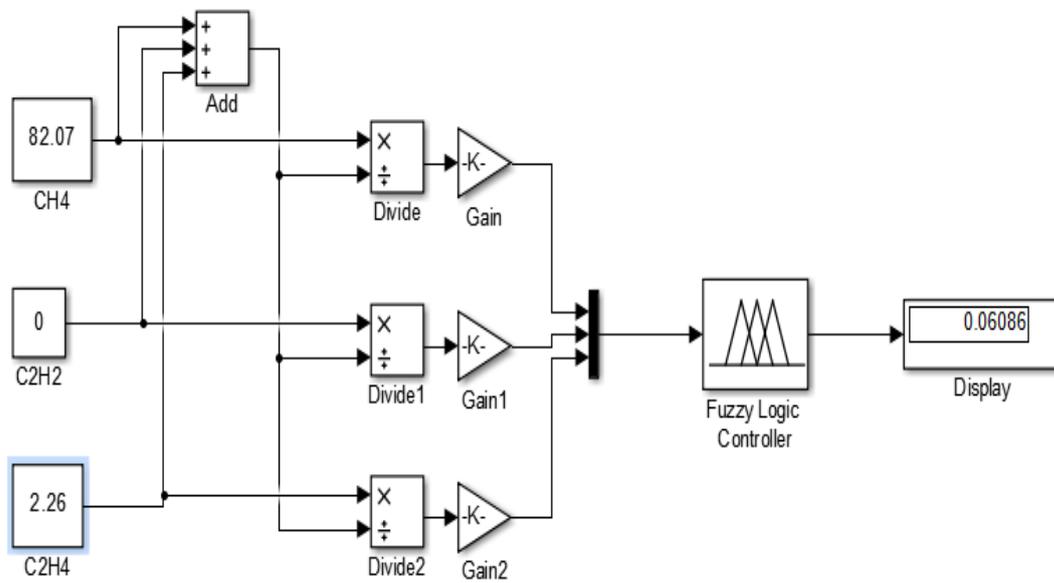
### 31. Trafo 2 simpang



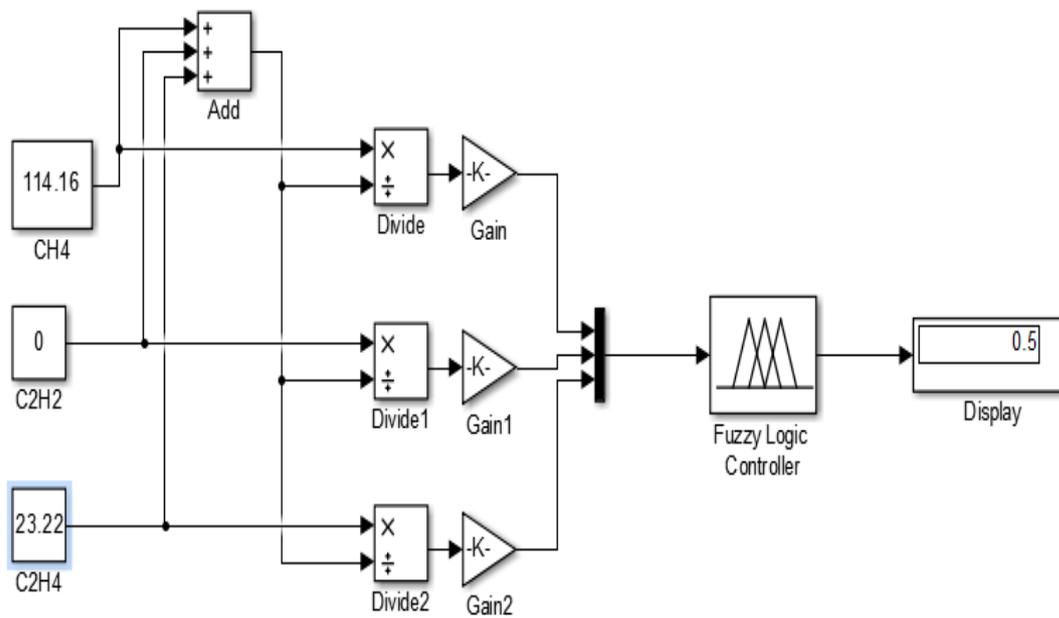
### 32. Trafo 1 Sukolilo



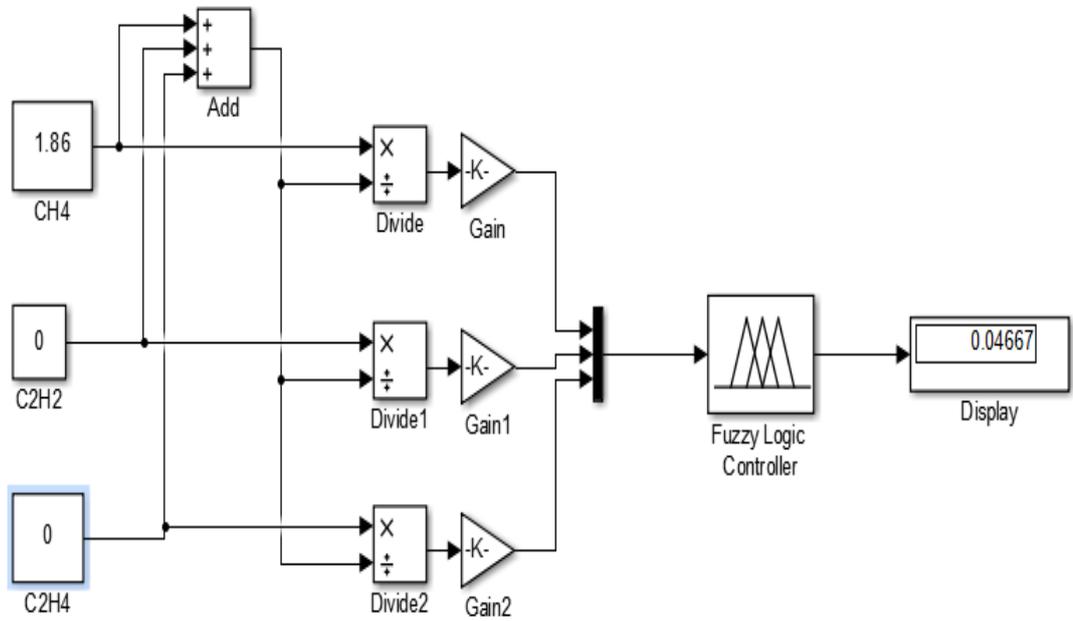
### 33. Trafo 2 Sukolilo



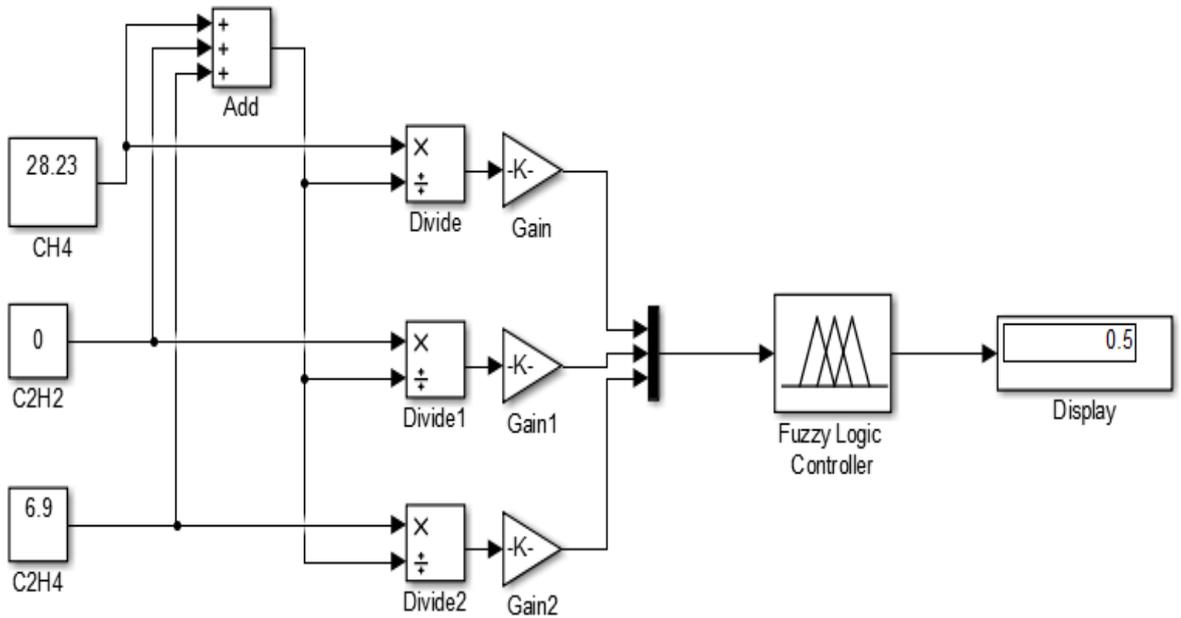
### 34. Trafo 3 Sukolilo



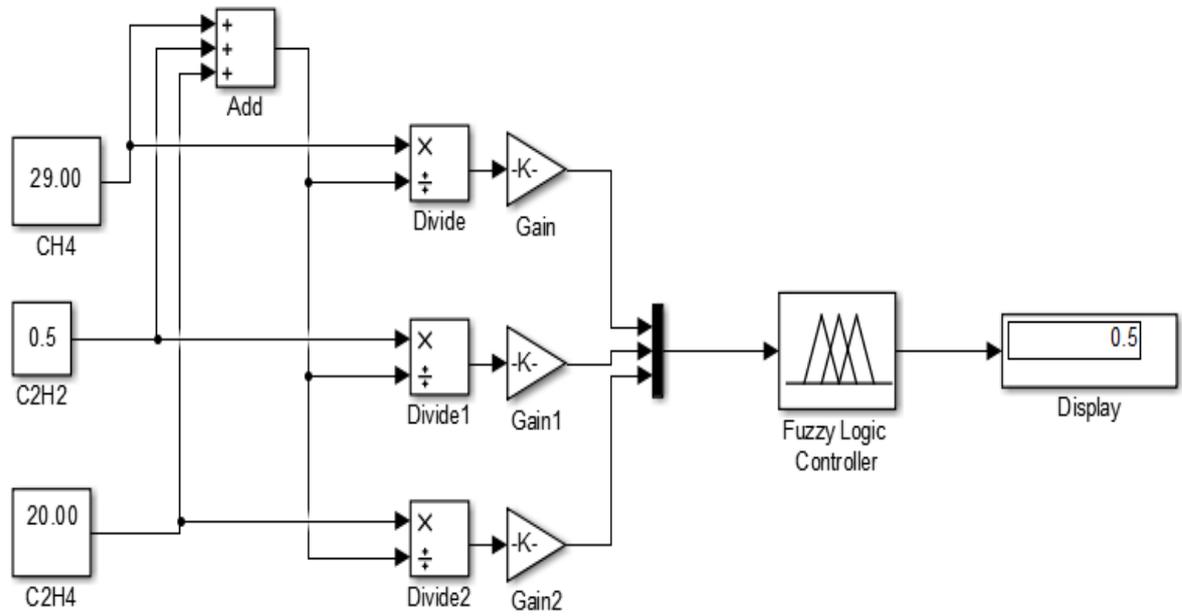
35. Trafo 4 Sukolilo



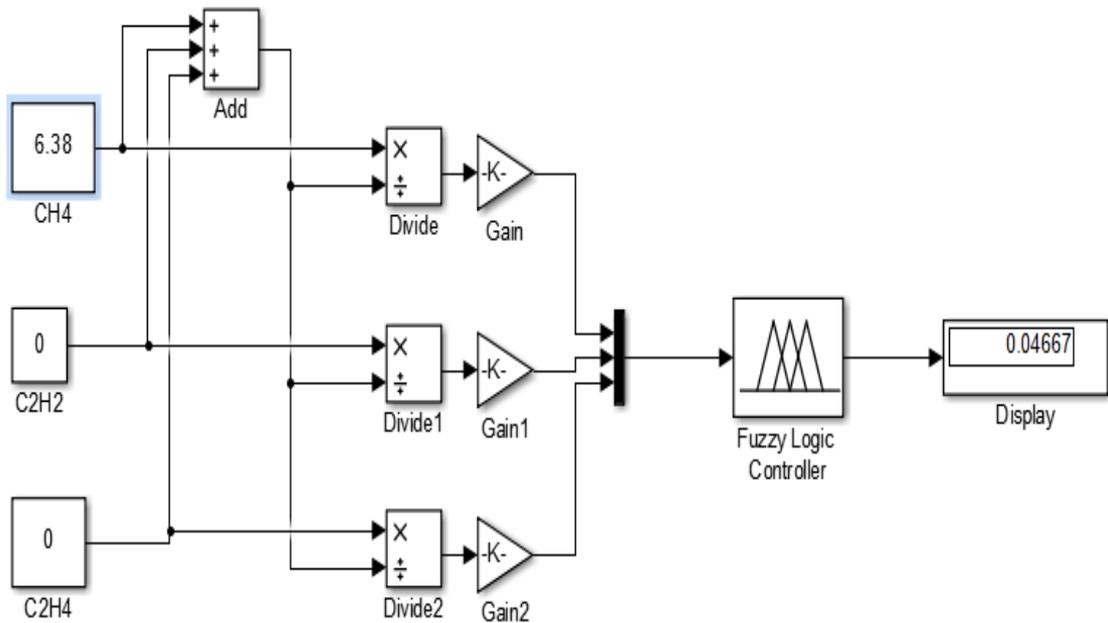
36. Trafo 2 Ujung



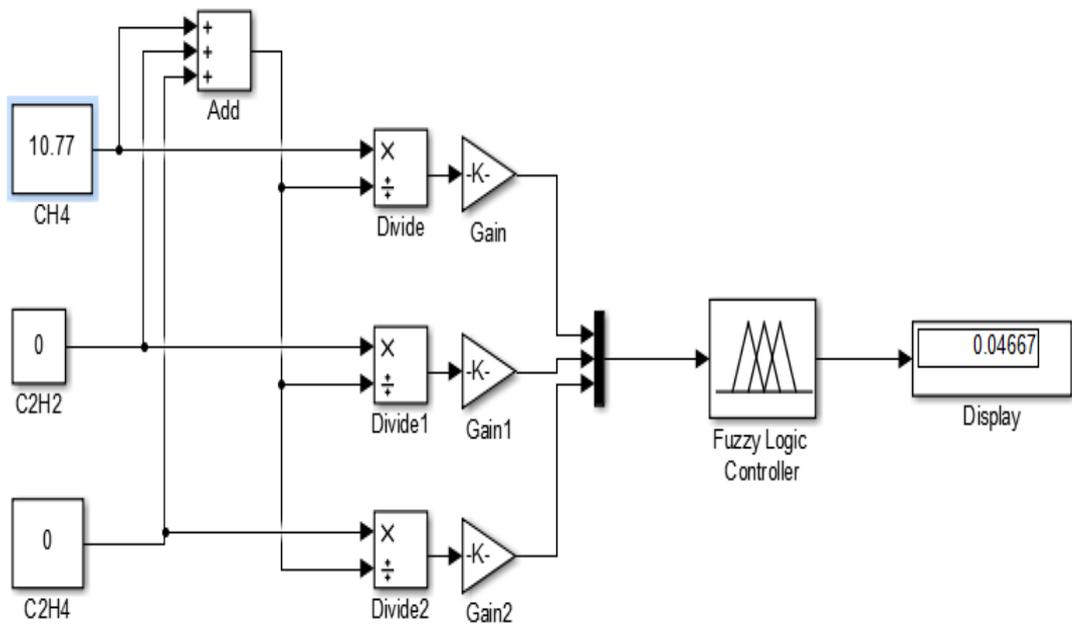
### 37. Trafo 1 Undaan



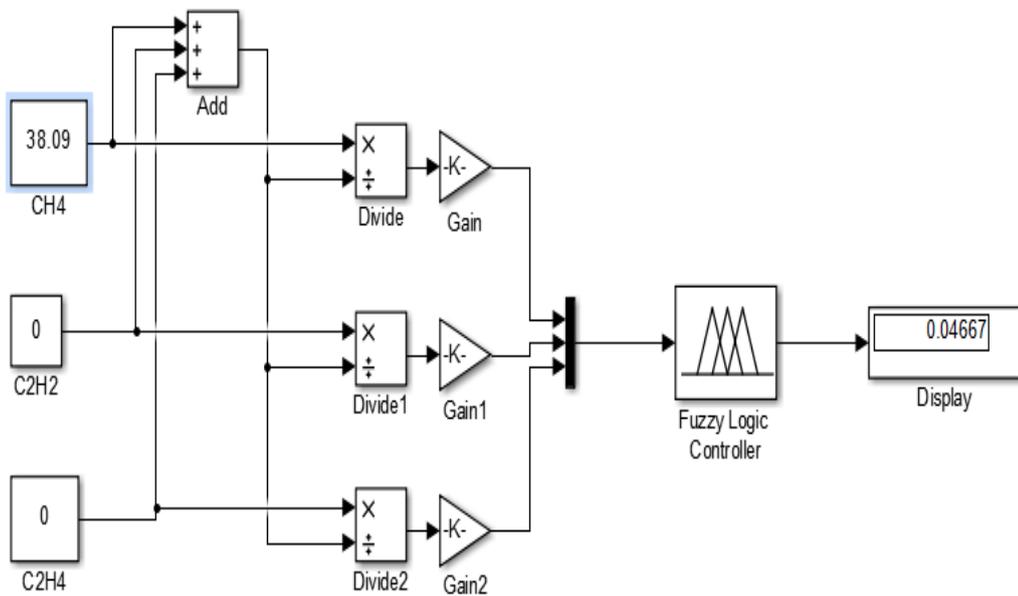
### 38. IBT 1 Waru



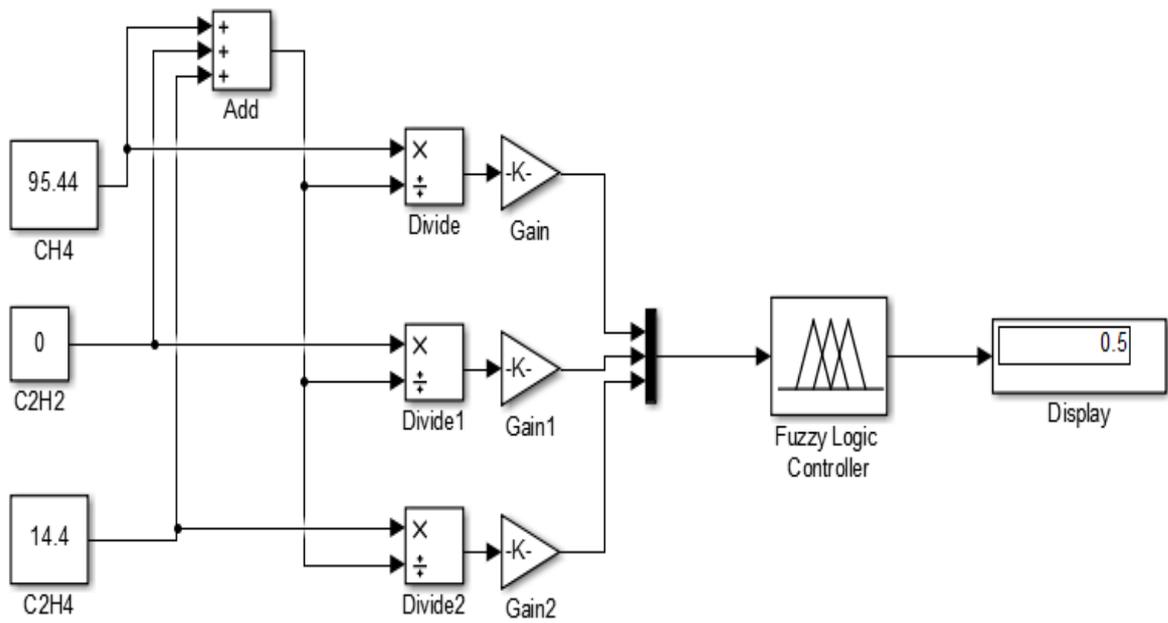
### 39. IBT 2 Waru



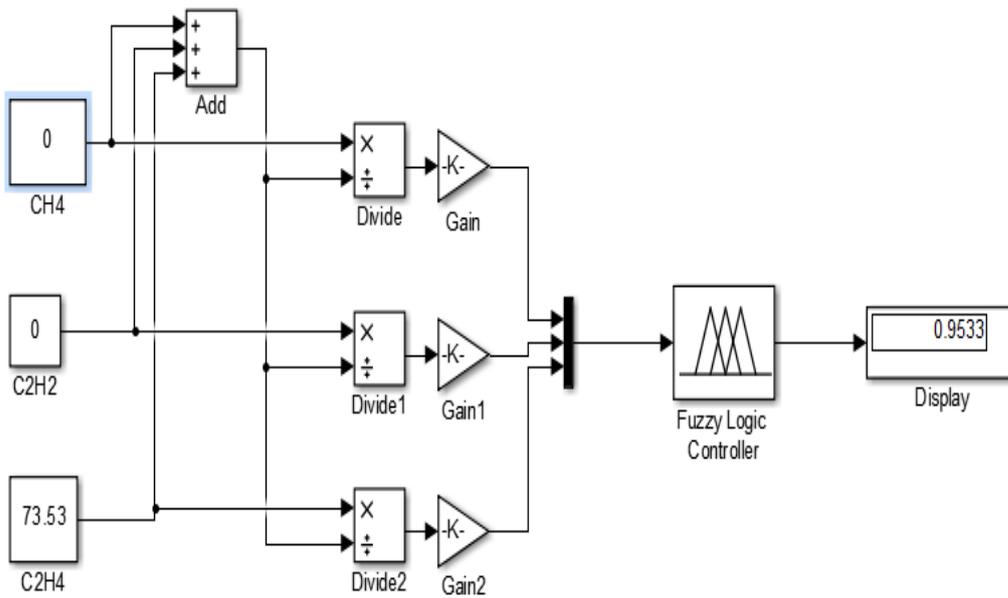
### 40. Trafo 3 Waru



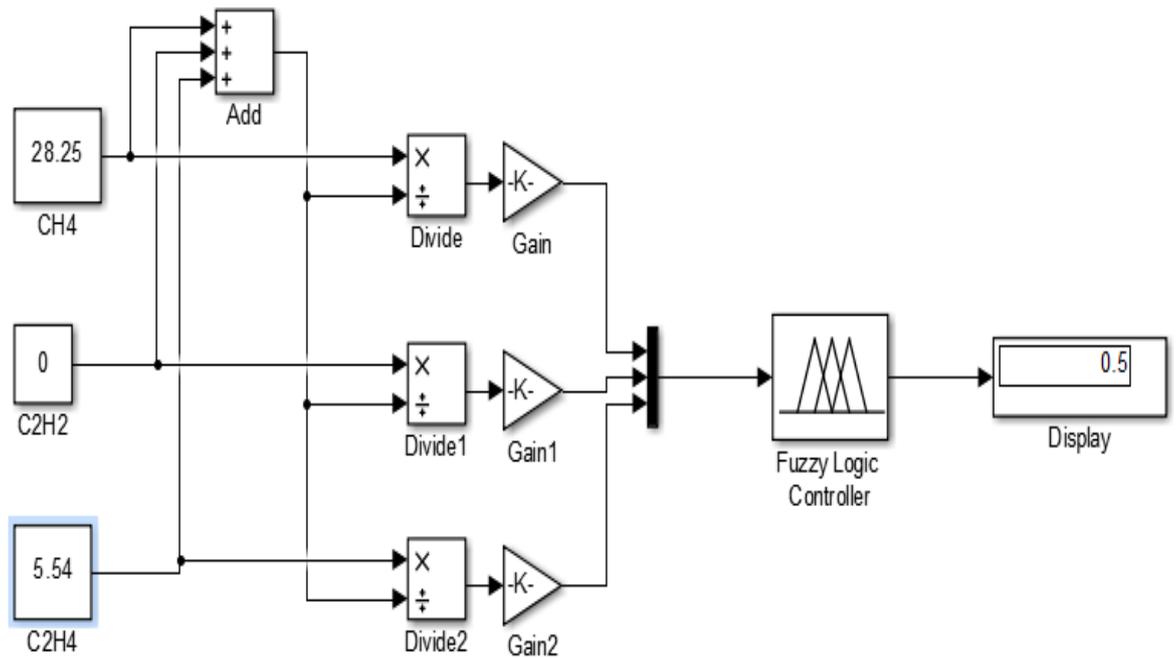
#### 41. Trafo 4 Waru



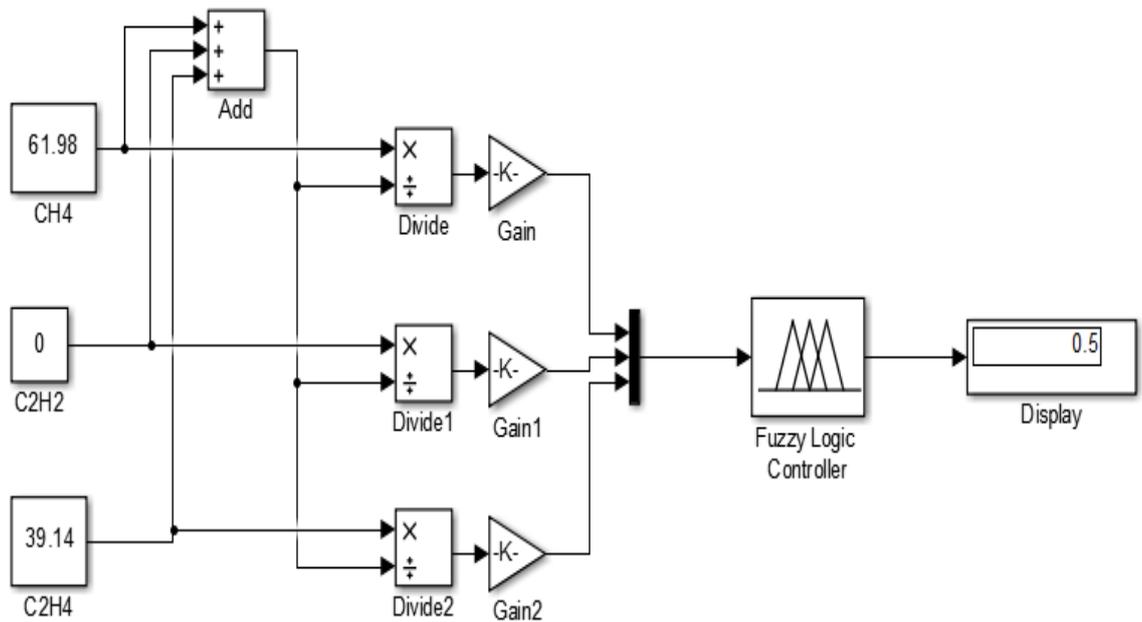
#### 42. Trafo 5 Waru



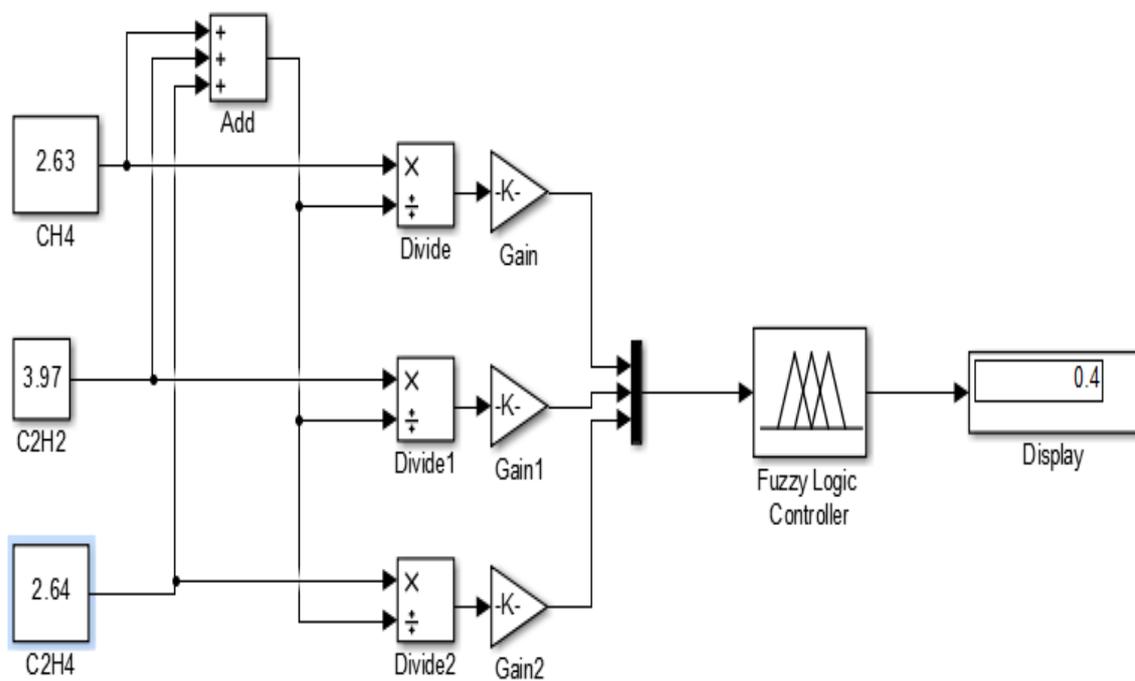
#### 43. Trafo 6 Waru



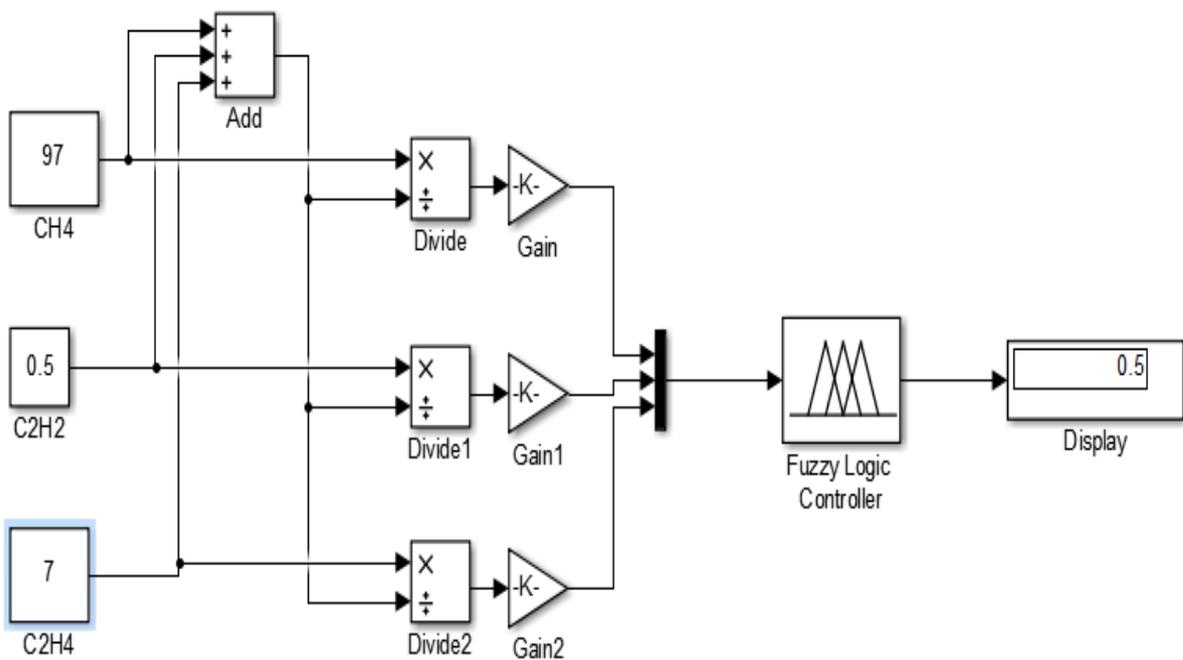
#### 44. Trafo 1 Wonokromo



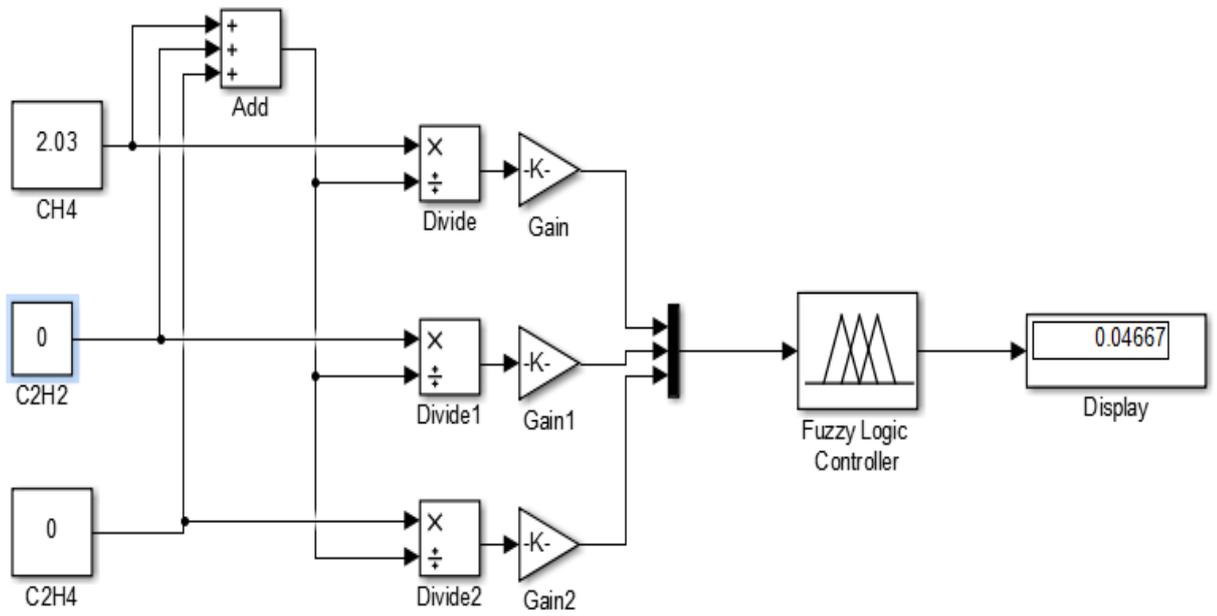
#### 45. Trafo 2 Wonokromo



#### 46. Trafo 1 Porong



47. Trafo 2 Porong



## Lampiran 5: Bahasa Pemrograman Matlab Untuk Model Fuzzy

```
[System]
Name='cobaduval2'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=54
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='input1'
Range=[0 100]
NumMFs=6
MF1='mf2':'trapmf',[69 71 85 87]
MF2='mf3':'trapmf',[83 85 87 90]
MF3='mf4':'trapmf',[85 87 96 98]
MF4='mf5':'trapmf',[93 96 98 100]
MF5='mf6':'trapmf',[96 98 100 102]
MF6='mf1':'trapmf',[0 0 71 74]

[Input2]
Name='input2'
Range=[0 100]
NumMFs=8
MF1='mf1':'trapmf',[0 0 13 15]
MF2='mf2':'trapmf',[10 13 15 18]
MF3='mf7':'trimf',[74 79 83]
MF4='mf4':'trapmf',[25 29 50 53]
MF5='mf5':'trapmf',[46 50 60 64]
MF6='mf6':'trapmf',[56 60 77 80]
MF7='mf3':'trapmf',[13 15 29 32]
MF8='mf8':'trapmf',[77 80 100 100]

[Input3]
Name='input3'
Range=[0 100]
NumMFs=6
MF1='mf1':'trimf],[-2 0 4]
MF2='mf2':'trapmf',[0 2 20 22]
MF3='mf3':'trimf',[18 21.5 25]
MF4='mf4':'trapmf',[21.5 23 40 42]
MF5='mf5':'trapmf',[38 40 50 52]
MF6='mf6':'trapmf',[48 50 100 100]

[Output1]
Name='output1'
Range=[0 1]
NumMFs=6
```

```

MF1='PD': 'trimf', [-0.4 0 0.15]
MF2='D1': 'trimf', [0.05 0.2 0.35]
MF3='D2': 'trimf', [0.25 0.4 0.55]
MF4='T1': 'trimf', [0.45 0.6 0.75]
MF5='T2': 'trimf', [0.65 0.8 0.95]
MF6='T3': 'trapmf', [0.85 1 1 1.5]

```

[Rules]

```

6 8 1, 2 (1) : 1
6 8 2, 2 (1) : 1
6 8 3, 2 (1) : 1
6 3 1, 2 (1) : 1
6 3 2, 2 (1) : 1
6 3 3, 2 (1) : 1
1 8 1, 2 (1) : 1
1 8 2, 2 (1) : 1
1 8 3, 2 (1) : 1
1 3 1, 2 (1) : 1
1 3 2, 2 (1) : 1
1 3 3, 2 (1) : 1
2 8 1, 2 (1) : 1
2 8 2, 2 (1) : 1
2 8 3, 2 (1) : 1
2 3 1, 2 (1) : 1
2 3 2, 2 (1) : 1
2 3 3, 2 (1) : 1
6 4 6, 3 (1) : 1
6 4 5, 3 (1) : 1
6 4 4, 3 (1) : 1
6 5 6, 3 (1) : 1
6 5 5, 3 (1) : 1
6 5 4, 3 (1) : 1
6 6 6, 3 (1) : 1
6 6 5, 3 (1) : 1
6 6 4, 3 (1) : 1
1 7 4, 3 (1) : 1
1 2 4, 3 (1) : 1
2 2 4, 3 (1) : 1
2 7 4, 3 (1) : 1
4 8 2, 4 (1) : 1
4 3 3, 4 (1) : 1
4 3 4, 4 (1) : 1
4 6 4, 4 (1) : 1
4 6 3, 4 (1) : 1
4 5 2, 4 (1) : 1
5 1 6, 5 (1) : 1
5 2 6, 5 (1) : 1
4 2 6, 5 (1) : 1
4 1 6, 5 (1) : 1
3 1 6, 5 (1) : 1
3 2 6, 5 (1) : 1
2 2 6, 5 (1) : 1
2 1 6, 5 (1) : 1
6 1 6, 6 (1) : 1
6 2 6, 6 (1) : 1
6 7 6, 6 (1) : 1
6 4 6, 6 (1) : 1

```

1 1 6, 6 (1) : 1  
1 2 6, 6 (1) : 1  
1 7 6, 6 (1) : 1  
1 4 6, 6 (1) : 1  
5 1 1, 1 (1) : 1

## Lampiran 6 Tahapan AHP

Matriks  
kriteria usia

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	1,00	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	1,00	0,85	1,00
B	1,57	1,00	1,33	5,14	1,57	5,14	1,64	1,57	1,33	1,57
C	1,17	0,75	1,00	3,86	1,17	3,86	1,23	1,17	1,00	1,17
D	0,30	0,19	0,26	1,00	0,30	1,00	0,32	0,30	0,26	0,30
E	1,00	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	1,00	0,85	1,00
F	0,30	0,19	0,26	1,00	0,30	1,00	0,32	0,30	0,26	0,30
G	0,96	0,61	0,81	3,14	0,96	3,14	1,00	0,96	0,81	0,96
H	1,00	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	1,00	0,85	1,00
I	1,17	0,75	1,00	3,86	1,17	3,86	1,23	1,17	1,00	1,17
J	1,00	0,64	0,85	3,29	1,00	3,29	1,05	1,00	0,85	1,00
SUM	<b>9,48</b>	<b>6,06</b>	<b>8,07</b>	<b>31,14</b>	<b>9,48</b>	<b>31,14</b>	<b>9,91</b>	<b>9,48</b>	<b>8,07</b>	<b>9,48</b>

Normalisasi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	SUM	Priority factor	AX	$\lambda$
A	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	1,055	<b>0,11</b>	<b>1,06</b>	<b>10,00</b>
B	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	1,651	<b>0,17</b>	<b>1,65</b>	<b>10,00</b>
C	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	1,239	<b>0,12</b>	<b>1,24</b>	<b>10,00</b>
D	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,321	<b>0,03</b>	<b>0,32</b>	<b>10,00</b>
E	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	1,055	<b>0,11</b>	<b>1,06</b>	<b>10,00</b>
F	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,321	<b>0,03</b>	<b>0,32</b>	<b>10,00</b>
G	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	1,009	<b>0,10</b>	<b>1,01</b>	<b>10,00</b>
H	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	1,055	<b>0,11</b>	<b>1,06</b>	<b>10,00</b>
I	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	1,239	<b>0,12</b>	<b>1,24</b>	<b>10,00</b>
J	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	1,055	<b>0,11</b>	<b>1,06</b>	<b>10,00</b>
SUM	<b>1,00</b>	<b>10,00</b>		<b>AVERG</b>	<b>10,00</b>									
													<b>CI</b>	<b>0,00</b>

Matriks  
kriteria  
risiko

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
B	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
C	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
D	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
F	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
G	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
H	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
I	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
J	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
SUM	<b>9,5</b>	<b>19</b>	<b>9,5</b>							

Hasil Normalisasi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	SUM	Priority factor	AX	$\lambda$
A	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
B	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,53	<b>0,05</b>	<b>0,53</b>	<b>10,00</b>
C	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
D	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
E	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
F	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
G	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
H	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
I	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
J	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	1,05	<b>0,11</b>	<b>1,05</b>	<b>10,00</b>
SUM	<b>1</b>	<b>10</b>			<b>10,00</b>									
													CI	<b>0,00</b>

Hasil Priority Factor kedua kriteria

	kriteria	
	usia	risiko
A	0,105505	0,105263
B	0,165138	0,052632
C	0,123853	0,105263
D	0,032110	0,105263
E	0,105505	0,105263
F	0,032110	0,105263
G	0,100917	0,105263
H	0,105505	0,105263
I	0,123853	0,105263
J	0,105505	0,105263

Dikalikan dengan bobot

bobot
0,6
0,4

Hasil perkalian priority factor dengan bobot

Trafo	Resultan	Peringkat
A	0,105408	3
B	0,120135	1
C	0,116417	2
D	0,061371	6
E	0,105408	3
F	0,061371	5
G	0,102656	4
H	0,105408	3
I	0,116417	2
J	0,105408	3

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



**SHANTI HARIANTI**, lahir di Surabaya pada tanggal 28 Juli 1986, berasal dari keluarga bersuku Jawa. Semenjak kecil beliau besar di Denpasar Bali, mengenyam pendidikan formal di SD 2 Saraswati Denpasar, setelah itu melanjutkan pendidikan di SLTPN 1 Denpasar, dan beruntung pula dapat melanjutkan ke SMUN 1 Denpasar dan lulus pada tahun 2004. Melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2005 dan lulus tepat 4 tahun pada 2009. Selanjutnya penulis diterima mengikuti OJT di PLN (Pesero) UPT Madiun sampai dengan diangkat pada tahun 2011 di bidang pemeliharaan proteksi.

Pada Tahun 2016 Mendapatkan SK Mutasi ke PLN APP Surabaya, sehingga mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan kuliah S2 di MMT ITS dengan Jurusan Manajemen Poyek pada tahun 2017 semester gasal. Penulis dalam hal ini mengambil judul tesis” Penentuan Prioritas Proyek Penggantian Transformator Tenaga dengan Menggunakan Metode Fuzzy dan AHP” sebagai syarat kelulusan S2.

Besar Harapan Penulis bisa menjadikan bahan literature studi kedepannya dan mungkin bisa menyempurnakan tesis yang kami susun.

Surabaya, Juni 2019

Penulis,

SHANTI HARIANTI  
NRP. 09211750023014