

**ANALISA DAYA LISTRIK TERPASANG DAN PENENTUAN
KAPASITOR BANK BERBASIS *FUZZY LOGIC* PADA *MULTI BUILDING*
KAMPUS UNISSULA**

Untuk Memenuhi Persyaratan memperoleh Gelar Magister Teknik
Program Magister Teknik Elektro



Diajukan oleh
Ketut Budiman
MTE 20601700032

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2021**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis dengan judul:

ANALISA DAYA LISTRIK TERPASANG DAN PENENTUAN KAPASITOR BANK BERBASIS *FUZZY LOGIC* PADA *MULTI BUILDING* KAMPUS UNISSULA

Yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : Ketut Budiman
NIM : 20601700032

Telah dipertahankan di depan dewan penguji pada tanggal 3 Juni 2021
Susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama

Ketua Penguji


DR. Hj. Sri Artini Dwi Prasetyowati, M.Si


DR. Ir.H. Muhamad Haddin, MT

NIDN: 0620026501

NIDN: 0618066301

Pembimbing Pendamping

Penguji I


Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D


Ir. Suryani Alifah, MT., Ph.D

NIDN: 0628097501

NIDN: 0625036901

Penguji 2


DR. Ir.H. Novi Marlana, S.T., M.T

NIDN: 0015117601

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Megister Teknik
Tanggal 3 Juni 2021



Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D

NIDN: 0628097501

Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ketut Budiman

NIM : 20601700032

Judul Tesis : **ANALISA DAYA LISTRIK TERPASANG DAN
PENENTUAN KAPASITOR BANK BERBASIS
FUZZY LOGIC PADA MULTI BUILDING KAMPUS
UNISSULA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa judul dan isi tesis yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Magister (S2) Teknik Elektro tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa judul tesis tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 3 Juni 2021

Yang menyatakan,



Ketut Budiman

ABSTRACT

Electricity is the most important source of energy for human life, no less importance as a means of infrastructure for teaching and learning activities in educational institution, the electrical problem that arises at the UNISSULA campus was there were several buildings that required a continuous supply of electrical energy so that the media and practicum instrument in the laboratory can function optimally. However, in reality there were several electrical problems, either from PLN or the sub-optimal supply of substitute electrical energy. The result was disruption of teaching and learning process. One solution for the disconnection of electricity from PLN was to determine the electrical power installed in the buildings and installed other source to anticipate this problem namely installing generator set, improving the power factor by determining the value of the capacitor bank according to load changes with fuzzy logic so electrical power can be optimal.

This research discussed the evaluation of installed electrical power and determination of capacitor bank based on fuzzy logic, the model is designed as a single line diagram at the UNISSULA building, the parameters that were determined include the building's electrical load and the $\cos \phi$, the method was to determine the installed electrical power and the value of the installed capacitor bank requirement using fuzzy logic.

The result showed that installed power capacity at MDP of 6 buildings was 1 MVA, at UNISSULA with the type of conductor from MDP to SDP using a core NYY cable. The generator used was one with used 1 generator. The generator capacity used was 1 generator, its capacity was 1.3 MVA, with a fuel expenditure of 86.6 litres / hour, the total investment was IDR 2,193,956,956.00, fuzzy logic was able to predict the required value of installed capacitor bank based on changes on the load between 100 KVA to 1000 KVA and the measured $\cos \phi$ was : between 10 KVAR to 556 KVAR, with a measured $\cos \phi$ range of 0.5 to 0.8, with a target of improving $\cos \phi$ to 0.85 according to PLN standard. Sugeno fuzzy logic could be used as a forecasting tool in determining the value of bank capacitors based on installed power and measured $\cos \phi$ with an error value of up to 0.08%.

Keywords : *installed electrical power evaluation analysis, determination of the bank capacitor, multi building, UNISSULA campus, fuzzy logic*

ABSTRAK

Tenaga listrik merupakan sumber energi yang sangat penting bagi manusia, Tidak kalah penting juga sebagai sarana prasarana kegiatan belajar mengajar di sebuah institusi pendidikan, Permasalahan kelistrikan yang timbul di kampus UNISSULA adalah terdapat beberapa gedung yang membutuhkan suplai energi listrik secara terus menerus, agar media dan instrumen praktikum di laboratorium dapat berfungsi dengan optimal. Akan tetapi pada kenyataannya terdapat beberapa masalah kelistrikan, baik dari PLN atau suplai energi listrik pengganti yang belum optimal. Akibatnya adalah proses belajar mengajar terganggu. Salah satu solusi dari terputusnya aliran listrik dari PLN tersebut adalah dengan menentukan daya listrik terpasang pada sebuah gedung serta antisipasi sumber yang lain yaitu memasang generator set, perbaikan factor daya dengan menentukan nilai kapasitor bank sesuai perubahan beban dengan *fuzzy logic* agar daya listrik dapat optimal.

Penelitian ini membahas tentang analisa daya listrik terpasang dan penentuan kapasitor bank berbasis *fuzzy logic*, model ditetapkan sebagai sebuah single line diagram di UNISSULA, parameter yang ditentukan meliputi beban listrik gedung, dan $\cos \phi$, metode adalah dengan menentukan daya listrik terpasang dan nilai kebutuhan kapasitor bank terpasang, dengan *fuzzy logic*.

Hasil menunjukkan bahwa kapasitas daya terpasang pada MDP 6 gedung di UNISSULA terpasang 1 MVA, dengan jenis penghantar dari MDP ke SDP menggunakan kabel NYY 4 core.

Kapasitas generator, adalah dengan 1 generator, berkapasitas 1,3 MVA, dengan pengeluaran bahan bakar 86,6 liter /jam, total investasi Rp 2.193.956.956,- logika *fuzzy* mampu untuk memprediksi nilai kapasitor bank terpasang yang dibutuhkan berdasarkan perubahan beban Antara 100KVA sampai 1000KVA dan $\cos \phi$ terukur adalah: antara 10 KVAR hingga 556 KVAR, dengan rentang $\cos \phi$ terukur 0,5 sampai 0,8, dengan target perbaikan $\cos \phi$ menjadi 0,85 sesuai dengan standart PLN. Logika *Fuzzy* Sugeno dapat dipakai sebagai alat peramalan dalam menentukan nilai kapasitor bank berdasarkan daya terpasang dan $\cos \phi$ terukur dengan nilai eror mencapai 0,08%.

Kata kunci : analisa daya listrik terpasang dan penentuan kapasitor bank, multi building kampus UNISSULA, berbasis *fuzzy logic*.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokatuh

Segala puji bagi ALLAH SWT atas karunia-Nya maka penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan penelitian dengan judul ” **ANALISA DAYA LISTRIK TERPASANG DAN PENENTUAN KAPASITOR BANK BERBASIS *FUZZY LOGIC* PADA *MULTI BUILDING* KAMPUS UNISSULA**”.

Penyusunan tesis ini adalah merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister pada Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Dalam penyelesaian tesis ini banyak pihak yang berjasa kepada penulis, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Dr. Novi Marlyana, ST., MT. Selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Arief Marwanto, ST., M.Eng., PhD. Selaku ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknologi dan Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Dosen pembimbing I, DR. Hj. Sri Artini Dwi Prasetyowati, M.Si. dan Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D. selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan memberikan semangat untuk penulis, sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini.
4. Seluruh staf dosen pengajar prodi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang
5. Ibu, bapak, istri dan anak anak tercinta atas semua dukungan dan do'a hingga selesainya penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari segi materi, maupun penyajian, untuk itu saran dan kritik yang membangun, sangat diharapkan dalam penyempurnaan penelitian ini.

Wassalamualaikum Warohmatullahi wabarokatuh.

Semarang, 2021

Penulis

Ketut Budiman



MOTTO

- Allah tidak membebani seseorang itu melainkan sesuai dengan kesanggupannya. (Q.S. Albaqoroh : 286)
- Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar. (Q.S. Al Anfal :46)
- Awali harimu dengan Bismillah.
- Menuntut Ilmu itu wajib bagi seorang muslim. (H.R Ibnu majah)
- Barang siapa menempuh jalan untuk mendapatkan ilmu, Allah akan memudahkan baginya jalan menuju syurga. (H.R Muslim)
- Setinggi apapun pendidikan anda tetaplah merasa bodoh dan butuh ilmu.
- Berbuat baiklah kepada siapapun.



DAFTAR ISI

ALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	iv
ABSTRACT.....	v
ABSTRAK.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
MOTTO	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Permasalahan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Penelitian	4
1.4. Tujuan Dan Manfaat Penelitian.....	4
1.4.1. Keaslian Penelitian	4
1.4.2. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	6
2.1. Kajian Pustaka	6
2.2. Landasan Teori	8
2.2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik	8
2.2.2. Transformator	11
2.2.3. Karakteristik Kualitas Daya Listrik.....	13
2.2.3.1. Kualitas Tenaga	13
2.2.3.2 Kualitas Arus	14
2.2.3.3. Daya Listrik	14
2.2.4. Penyusutan Eneгри pada Jaringan Distribusi	16
2.2.5. Penyusutan Energi pada Penyulang.....	16

2.2.6. Penyusutan Energi Pada Transformator Distribusi	24
2.2.7. Penyusutan Energi Pada Sambungan	28
2.3. Generator	30
2.4. Analisis Load Flow	31
2.4.1. Pemodelan Load Flow	31
2.4.2. Metode Penyelesaian Analisis Load Flow	35
2.4.3. Aliran Daya Optimal	36
2.4.4. Pemodelan Beban	37
2.5. Logika Fuzzy	38
BAB III METODE PENELITIAN	43
3.1. Model Penelitian	43
3.2. Metode Penelitian	44
3.2.1. Tempat Dan Waktu Penelitian	44
3.2.2. Peralatan Penelitian	44
3.2.3. Perancangan Sistem	44
3.3. Tahap Pelaksanaan Penelitian	45
3.4. Analisa Kebutuhan Sistem	45
3.5. Studi Pustaka	45
3.6. Metode Pengumpulan Data	46
3.7. Prosedur Penelitian	46
3.8. Flowchart Langkah Penelitian	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1. Hasil Penelitian	48
4.1.1. Jenis Kabel dan Luas Penampang	49
4.1.2. Perhitungan Daya	50
4.1.3. Pemodelan Simulink	51
4.2. Pembahasan Jaringan dan Simulasi Generator	52
4.2.1. Karakteristik Beban Jaringan	52
4.2.2. Transmision Line / Kabel Transmisi (TL)	52
4.2.3. Generator	53
4.2.4. Beban Statis Jaringan	54

4.3. Hasil Pemodelan Generator	55
4.3.1. Model Jaringan dengan 1 Generator.....	55
4.3.2. Model Jaringan dengan 2 Generator.....	58
4.3.3. Model Jaringan dengan 3 Generator.....	61
4.3.4. Model Jaringan dengan 6 Generator.....	64
4.4. Perbandingan Beban Biaya untuk Variasi Penggunaan Generator	67
4.5. Hasil dan Pembaasan Kapasitor Bank	68
4.6. Proses Perhitungan Logika Fuzzy Metode Sugeno	70
4.6.1. Pembentukan Himpunan Fuzzy.....	70
4.6.2. Pembentukan Fuzzy Rule	71
4.6.3. Implementasi Program.....	75
4.6.4. Implementasi Kapasitor Bank Terpasang.....	82
BAB V PENUTUP.....	84
5.1. Kesimpulan	84
5.2. Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	86



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Datasheet Kabel NYY.....	19
Tabel 2.2. Kemampuan Hantar Arus Kabel NYY	19
Tabel 2.3. Faktor Kunci Isolasi pada Berbagai Macam Kabel	22
Tabel 2.4 Hubungan antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi Ruginya.....	27
Tabel 2.5 Spesifikasi Generator	31
Tabel 3.1. Karakteristik Beban Jaringan	44
Tabel 4.1. Data MCCB terpasang pada SDP masing masing Gedung	49
Tabel 4.2. Diameter Kabel Berdasarkan Datasheet Kabel NY Yi	49
Tabel 4.3. Spesifikasi Generator	53
Tabel 4.4. Hasil Hubungan Daya dengan Biaya	54
Tabel 4.5. Beban Statis.....	54
Tabel 4.6. Penjelasan Instalasi Model 1.....	56
Tabel 4.7. Tegangan Masuk Dan Keluar Kabel.....	56
Tabel 4.8. Penjelasan Instalasi Model 2.....	59
Tabel 4.9. Tegangan Keluar Kabel	59
Tabel 4.10. Penjelasan Instalasi 3 Generator Model.....	62
Tabel 4.11. Tegangan Keluar Kabel 3 Generator Model 1	63
Tabel 4.12. Penjelasan Instalasi Model 6 Generator.....	65
Tabel 4.13. Tegangan Keluar Kabel 6 Generator	66
Tabel 4.14. Perbandingan Biaya Generasi Daya.....	67
Tabel 4.15. Variasi Beban, Cos phi dan Kapasitor Bank yang Dibutuhkan	70
Tabel 4.16. Penentuan Variabel Penelitian	70
Tabel 4.17. Rule Base Fuzzy Sugeno	71
Tabel 4.18. Nilai Kapasitor Bank yang Harus di Butuhkan Berdasarkan Input Daya Terpasang dan Cos phi Terukur (Fuzzy Sugeno)	81
Tabel 4.19. Contoh Konfigurasi Kapasitor Bank Terpasang Untuk Mendapatkan Total Nilai Kapasitor Yang Di Butuhkan Secara Tepat.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Penampang Kabel Distribusi.....	20
Gambar 2.2.	Diagram Phase yang Menunjukkan Jatuh Tegangan Akibat Daya Reaktif.....	23
Gambar 2.3.	Model Generator	30
Gambar 2.4.	Fungsi Keanggotaan Fuzzy	39
Gambar 2.5.	Fungsi Linear Turun.....	39
Gambar 2.6.	Fungsi Segitiga.....	40
Gambar 2.7.	Fungsi Linear Naik.....	40
Gambar 3.1.	Model Penelitian	43
Gambar 3.2.	Alur Kegiatan Penelitian	47
Gambar 4.1.	Model 1 Simulink dari APP ke 6 Beban	51
Gambar 4.2.	Model 1 Generator	55
Gambar 4.3.	Profil Tegangan pada Tiap Bus pada Model 1.....	57
Gambar 4.4.	Model 2 Generator	58
Gambar 4.5.	Profil Tegangan pada Tiap Bus pada Model 2.....	60
Gambar 4.6.	Model 3 Generator	62
Gambar 4.7.	Pola Perubahan Voltase 3 Generator.....	63
Gambar 4.8.	Model 6 Generator	64
Gambar 4.9.	Profil Tegangan pada Tiap Bus pada 6 Generator 3	66
Gambar 4.10.	Himpunan Fuzzy dari Variabel Daya Terpasan	73
Gambar 4.11.	Himpunan Fuzzy Dari Variabel Cos phi Terukur	74
Gambar 4.12.	Penerapan Masalah Ke Dalam Aplikasi.....	75
Gambar 4.13.	Fungsi Keanggotaan Variabel Input Daya Terpasang S	76
Gambar 4.14.	Fungsi Keanggotaan Variabel Input Cos phi	77
Gambar 4.15.	Fungsi Keanggotaan Variabel Output QC Kapasitor Bank Terpasang	78
Gambar 4.16.	Aturan Fuzzy Berdasarkan Variabel Linguistik	79
Gambar 4.17.	Rule View (Hasil Optimasi/ Defuzzifikasi)	80

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tenaga listrik merupakan sumber energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia, baik untuk kegiatan industri, kegiatan komersial maupun dalam kehidupan sehari-hari rumah tangga, energi listrik juga dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan penerangan dan juga proses produksi yang melibatkan barang-barang elektronik dan alat-alat/mesin industri[1]. Tidak kalah penting juga sebagai sarana prasarana proses kegiatan belajar mengajar di sebuah institusi pendidikan, baik sekolah dasar hingga perguruan tinggi, yang menggunakan instrumen, alat-alat laboratorium serta media pembelajaran yang menggunakan energi listrik [2].

Maka untuk memenuhi kebutuhan daya listrik pada gedung *multi building* kampus Universitas Sultan Agung (UNISSULA) perlu adanya langkah yang strategis untuk mengatasi masalah kelistrikan. Mengingat begitu besar dan pentingnya manfaat energi listrik sebagai sarana prasarana pada gedung perkuliahan maka perlu adanya langkah penentuan daya listrik terpasang di setiap gedung agar tidak menimbulkan *trip* (padam akibat daya listrik kurang). Selain menentukan daya listrik terpasang perlu adanya suplai energi cadangan apabila sumber PLN mengalami padam.

Sumber energi pembangkit listrik terutama yang berasal dari sumber daya tak terbarukan keberadaannya juga terbatas, maka untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut, perlu menjaga kelestariannya sumber energi tersebut, juga perlu mengupayakan langkah-langkah strategis yang dapat menunjang penyediaan energi listrik secara efektif dan efisien, baik dilihat dari sumber generator pembangkit PLN maupun dari sumber pembangkit yang lain, jaringan distribusi maupun beban yang dibutuhkan [3].

Permasalahan kelistrikan yang timbul di kampus UNISSULA adalah terdapat enam (6) gedung yang berdekatan yaitu gedung Mini Teaching, Pumanisa, Akademi Kebidanan, Fakultas Kedokteran B dan C, Fakultas Teknologi dan

Industri, serta gedung Fakultas Kedokteran A (denah gedung terdapat pada lampiran 1). Seluruh gedung tersebut membutuhkan suplai energi listrik yang terus menerus, contohnya laboratorium kedokteran yang terdapat alat pendingin yang harus hidup selama 24 jam terus menerus, agar media dan instrumen praktikum di laboratorium kedokteran tersebut dapat berfungsi dengan optimal. Akan tetapi pada kenyataannya terdapat beberapa masalah kelistrikan, baik dari suplai PLN yang mengalami pemadaman akibat perbaikan jaringan atau pemadaman bergilir, bahkan akibat daya terpasang pada langganan listrik yang belum tercukupi, atau suplai energi listrik pengganti yang belum tersedia.

Unissula merupakan universitas terkemuka di Indonesia dan telah meneguhkan diri sebagai *World Class Islamic University*. UNISSULA secara konsisten mengembangkan empat strategi pendidikan yang menjadi ciri khas dan keunggulan tersendiri di antara ribuan universitas di Indonesia. Unissula mengembangkan Budaya Akademik Islami (BudAi) dalam aktivitas pembelajarannya guna membangun karakter mahasiswa agar menjadi pribadi yang berakhlakul karimah dan memiliki kompetensi sesuai bidangnya masing masing serta memperkuat kompetensi bahasa internasionalnya baik bagi dosen, tenaga kependidikan maupun mahasiswa. dan membangun Jaringan pendidikan internasional. [4]

Ketersediaan bahan baku produksi listrik yang semakin menipis terutama dari bahan bakar minyak bumi, yang bisa mengakibatkan pemutusan bergilir, Serta keterbatasan lahan untuk membangun sebuah gedung yang standar [5]. Konstruksi bangunan jaman sekarang yang kurang mengedepankan azas keandalan sistem kelistrikan contohnya bangunan gedung gelap ketika tidak ada pencahayaan dari matahari, bangunan panas ketika tidak ada mesin pendingin udara, memicu pengguna gedung untuk mewajibkan adanya suplai energi listrik secara terus menerus adanya aliran listrik. Sementara pelayanan energi dan pembagian energi listrik yang kadang mengalami kegagalan sistem misalnya pemutusan sementara atau mati karena adanya gangguan atau mati secara bergilir, merupakan dampak dari terbatasnya energi listrik yang dapat disediakan oleh PLN.

Akibat dari semua permasalahan tersebut adalah proses belajar mengajar terganggu. Selain itu, di gedung laboratorium yang terdapat instrumen bisa mengalami kerusakan dan media praktikum bisa mati. Salah satu solusi dari terputusnya aliran listrik dari PLN tersebut adalah dengan menentukan daya listrik terpasang pada sebuah gedung serta antisipasi sumber yang lain yaitu memasang sel surya (*solar cell*) atau generator set pada gedung tersebut. Spesifikasi instalasi generator set yang banyak dan berbeda mengakibatkan suplai energi yang dihasilkan akan berbeda pula, diantaranya adalah banyaknya generator set, jarak penempatan generator, dan jenis penghantar, besar penghantar yang digunakan [6].

Solusi terhadap permasalahan yang ada agar suplai energi listrik terpenuhi secara terus menerus pada gedung *multi building* di kampus UNISSULA, sehingga sarana prasarana serta proses belajar mengajar di kampus UNISSULA dapat berfungsi dengan baik adalah dengan cara menentukan daya listrik terpasang pada gedung tersebut, serta menentukan kapasitas generator set dan jenis penghantar. Hal ini dapat dilakukan dengan simulasi penentuan kapasitas daya listrik terpasang di gedung *multi building* serta sistem penempatan generator set untuk mendistribusikan energi listrik ke beban antar gedung dan perbaikan faktor daya dengan menentukan nilai kapasitor bank sesuai beban dengan fuzzy logic agar sistem distribusi daya listrik optimal.

1.2 Permasalahan Penelitian

Permasalahan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Bagaimana menentukan Moulded Circuit Breker (MCCB) Main Distribution Panel (MDP) yang terpasang pada masing masing gedung.
- b) Bagaimana cara menentukan kapasitas daya terpasang pada listrik *multi building* kampus UNISSULA.
- c) Bagaimana cara menentukan luas penampang serta jenis kabel yang digunakan.
- d) Bagaimana cara menentukan jumlah dan kapasitas generator set yang terpasang pada *multi building* kampus UNISSULA.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat dilakukan lebih focus dan mendalam, maka penulis memandang permasalahan penelitian perlu dibatasi. Oleh sebab itu, penulis membatasi batasan masalah sebagai berikut:

- a) Penelitian hanya pada enam gedung kampus UNISSULA.
- b) Penentuan kapasitas daya listrik terpasang pada kampus UNISSULA.
- c) Jenis kabel untuk distribusi 6 gedung menggunakan jenis NYY.
- d) Daya listrik disesuaikan dengan beban masing masing gedung.
- e) Penelitian dengan 1 merk genset.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dan manfaat dari penelitian ini adalah:

- a) Menentukan kapasitas Daya listrik terpasang pada Enam (6) gedung kampus UNISSULA
- b) Menentukan jenis penghantar listrik pada gedung kampus UNISSULA.
- c) Menentukan kapasitas dan jumlah generator set dengan metode software matlab *Power System Analysis Toolbox* (PSAT)
- d) menentukan nilai kapasitor bank sesuai perubahan beban dengan fuzzy logic.

1.4.1 Keaslian Penelitian

Berdasarkan penelusuran serta tinjauan pustaka yang telah dilakukan terkait dengan penelitian “Analisa Daya Listrik Terpasang dan Penentuan Kapasitor Bank berbasis *Fuzzy logic* Pada *Multi Building* Kampus UNISSULA”, maka ditemukan penelitian yang terkait yaitu. “Analisa Kebutuhan Daya Terpasang pada Gedung Kantor Bupati Halmahera Barat” [7]. Penelitian ini menitik beratkan pada penghitungan kebutuhan daya listrik terpasang pada satu gedung dengan menghitung 70% hingga 80% beban puncak sesuai standart Intensitas Konsumsi Energi (IKE), dengan memasang Daya sebesar 105 kVA maka penggunaan daya beban maksimum sebesar 84 kVA adalah sangat efisien. Sedangkan daya terpasang di lokasi adalah 197,4 kVA.

“Analisa kebutuhan daya listrik di gedung perkuliahan 10 lantai Universitas Pakuan Bogor” [8]. Penelitian ini berhasil Menghitung kapasitas daya listrik satu gedung, dan menghitung faktor daya, dengan memperbaiki kualitas daya menggunakan Kapasitor bank.

Penelitian tersebut belum mensimulasikan multi building, penelitian hanya dilakukan pada satu gedung. Adapun yang akan peneliti lakukan adalah analisa daya listrik terpasang dan Penentuan Kapasitor Bank berbasis *Fuzzy logic* pada *Multi Building* Kampus UNISSULA. Pada penelitian ini melakukan simulasi berapa daya listrik terpasang pada *multi building* beserta kapasitas generator set terpasang dengan menggunakan matlab Simulink PSAT serta menentukan jenis kabel penghantar antar gedung tersebut dan menentukan Kapasitor bank berbasis *fuzzy logic*.

1.4.2 Manfaat Penelitian

Adapun yang menjadi manfaat dari penelitian yang akan dilakukan adalah:

- a) Manfaat bagi UNISSULA adalah mengetahui kapasitas daya listrik terpasang sekaligus kapasitas dan jumlah generator set serta jenis penghantarnya, serta menentukan kapasitor bank berbasis *fuzzy logic* yang digunakan pada 6 (enam) gedung kampus UNISSULA.
- b) Manfaat bagi ilmuwan, agar bisa mensimulasikan kapasitas daya listrik terpasang dengan luas penampang penghantarnya serta pemasangan generator pada *multi building* dimana saja agar dalam penempatan generator tersebut lebih optimal, serta pemasangan kapasitor bank berbasis *fuzzy logic*.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan kapasitas daya terpasang dan generator set adalah sebagai berikut

- a. “Pemodelan Generator Induksi Doubly-Fed yang Terhubung ke Sistem Distribusi Berbasis Emegasim Real-Time Digital Simulator” [9]. Penelitian ini mensimulasikan beberapa buah generator untuk di distribusikan dalam 1 jaringan untuk mendapatkan hasil yang stabil. Dengan sistem emagasim real time digital simulator, Penempatan beberapa generator distribusi pada jaringan tegangan menengah untuk mendapatkan tegangan yang optimal. Menggunakan PSO standart IEEE 16 bus.
- b. “Penempatan Dan Ukuran Optimal Multidistributed Generation (DG) Termasuk Model Beban Yang Berbeda Menggunakan PSO” [10]. Penelitian ini berhasil menempatkan beberapa generator distribusi pada jaringan tegangan menengah untuk mendapatkan tegangan yang optimal. Menggunakan PSO standart IEEE 16 bus.
- c. “Analisis Dampak. Pemasangan Distibuted Generation (DG) Terhadap Profil Tegangan Dan Rugi-Rugi Daya Sistem Distribusi Standar IEEE 18 Bus” [11]. Penelitian ini berhasil menghitung rugi daya dari dampak pemasangan generator distribusi pada menengah dengan metode matrik, standart Ieee 18 Bus dengan standart IEEE18 bus.
- d. “Pemasangan Generator-Set Sebagai Catu Daya Pengganti Pada Masjid Lailatul Qadar Btp Blok Af Makassar” [12]. Penelitian ini menjelaskan tentang Teknik pemasangan catu daya pengganti PLN, yaitu generator set yang akan di pasang pada Masjid Lailatul Qodar.

- e. “Kajian Penghematan Pemakaian Daya Listrik Untuk Mereduksi Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Sfc) Generator Set Cadangan (Studi Kasus Pada Gedung Politeknik Muara Teweh)” [13] penelitian ini meneliti tentang seringnya pemadaman listrik di kota muara teweh akibat kemampuan suplai PLN yang kurang, sehingga dibutuhkan penghematan energi listrik serta mereduksi konsumsi bahan bakar generator set.
- f. “Studi Perencanaan Pemasangan Genset Emergency Pada Gedung C Fakultas Teknik Universitas Riau” [15]. Penelitian ini membahas tentang kebutuhan dan skema penggunaan beban otomatis. Analisis penggunaan beban berdasarkan kebutuhan. Hasil analisis digunakan menentukan prioritas penggunaan generator listrik. Dari hasil simulasi ETAP 12.6 didapatkan bahwa emergency power prioritas pertama adalah 12,8 A, prioritas kedua 1,7 A, prioritas ketiga 1,5 A, prioritas keempat 1,7 A, prioritas kelima 1,7 A, prioritas keenam 1.9 A, prioritas ketujuh 1.9 A, dan prioritas kedelapan 5,6 A. Skema pengguna yang dimuat secara otomatis disimulasikan menggunakan Proteus 8 profesional.
- g. “Evaluasi Perencanaan Kebutuhan Daya Listrik Terpasang Pada Instalasi Gedung Harco Glodog Jakarta” [16], penelitian ini membahas tentang perhitungan daya terpasang berdasarkan PUILL 2000.

Penelitian sebelumnya menitik beratkan pada perhitungan manual dan hanya satu gedung dan tidak di simulasikan pada matlab Simulink, sehingga untuk menentukan daya listrik di gedung-gedung lainnya harus menghitung ulang dan belum meneliti pada kebutuhan *multi building* dan dihitung berdasarkan IKE serta catatan harian.

Penelitian ini membahas simulasi terhadap analisa daya listrik terpasang pada *multi building* beserta jumlah dan kapasitas generator set yang di butuhkan dengan menggunakan matlab PSAT, serta menentukan jenis penghantarnya dan menentukan kapasitor bank sesuai perubahan beban dengan *fuzzy logic*.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah. pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penarik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi [17].

Sistem tenaga listrik dihasilkan dari pusat pembangkit listrik, seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD dengan tegangan yang biasanya merupakan tegangan menengah 20 kV. Lokasi pembangkit tenaga listrik biasanya berada jauh dari pengguna tenaga listrik, Untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pembangkit ini, maka diperlukan penggunaan saluran tegangan tinggi 150/70 kV (STT), atau saluran tegangan ekstra tinggi 500 kV (SUTET). Tegangan tinggi atau extra tinggi ini diperoleh dengan transformator penaik tegangan (*step up transformer*). Pemakaian tegangan tinggi ini diperlukan untuk berbagai alasan efisiensi, antara lain, penggunaan penampang penghantar menjadi efisien, karena tegangan dinaikkan maka arus yang mengalir akan menjadi lebih kecil. Setelah saluran transmisi mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang dapat merupakan suatu daerah industri atau suatu kota, tegangan melalui Gardu Induk (GI) diturunkan menjadi tegangan menengah (TM) 20 kV. Di setiap Gardu Induk sesungguhnya merupakan suatu pusat beban untuk daerah pelanggan tertentu, bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga daya yang dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik harus selalu berubah. Perubahan daya yang dilakukan di pusat pembangkit ini bertujuan untuk mempertahankan tenaga listrik tetap pada frekuensi 50 Hz. Proses perubahan tersebut dikoordinasikan dengan Pusat Pengaturan Beban (P3B) [17].

Tegangan menengah dari GI ke Gardu-gardu Distribusi (GD) ini di saluran melalui distribusi primer. Dari saluran distribusi primer, Tegangan Menengah (TM) diturunkan menjadi Tegangan Rendah (TR) 220/380 V. Tegangan rendah dari gardu distribusi disalurkan melalui saluran tegangan rendah ke konsumen tegangan rendah [18].

Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen (beban), merupakan hal penting untuk dipelajari. Mengingat penyaluran tenaga listrik ini, prosesnya melalui beberapa tahap, yaitu dari pembangkit tenaga listrik penghasil energi listrik, disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) langsung ke gardu induk. Dari gardu induk tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), dan melalui gardu distribusi langsung ke jaringan distribusi sekunder (SUTR), tenaga listrik dialirkan ke konsumen. Dengan demikian sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan tenaga listrik kepada pihak pemakai melalui jaringan tegangan rendah (SUTR), sedangkan suatu saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam daya yang besar [19].

Sistem tenaga listrik secara umum dibagi menjadi empat bagian utama, diantaranya [19]:

- Pembangkitan
- Saluran transmisi
- Distribusi
- Instalasi

Pembangkitan [19]:

- Generator-generator dan prime mover
- Tegangan yang dibangkitkan 3-13 kV
- Peralatan pengatur tegangan dan frekuensi
- Transformator tegangan tinggi

Saluran transmisi [19]:

- Saluran-saluran transmisi tegangan tinggi (isolator, arrester)
- Tegangan 70-150 kV (tegangan tinggi) dan 500 kV (tegangan extra tinggi)
- Transformator pengatur daya aktif dan reaktif

Distribusi [19]:

- Saluran yang menghubungkan ke beban
- Tegangan 11-33 kV

Transformator-transformator gardu dan tiang Instalasi [19]:

- Saluran beban terhubung ke peralatan
- Tegangan 110-400 V
- Beban-beban listrik (motor, trafo, peralatan listrik, dll).

Bagian-bagian Sistem Distribusi Listrik

1. Jaringan Subtransmisi

Jaringan subtransmisi berfungsi menyalurkan daya listrik dari sumber daya besar menuju gardu induk yang terletak di daerah tertentu. Biasanya menggunakan tegangan tinggi (70-150 kV) ataupun tegangan extra tinggi (500 kV) dalam penyaluran tegangannya, hal dilakukan untuk berbagai alasan efisiensi, antara lain, penggunaan penampang penghantar menjadi efisien, karena arus yang mengalir akan menjadi lebih kecil, ketika tegangan tinggi diterapkan [7].

2. Gardu Induk Distribusi

Gardu Induk distribusi dibagi menjadi dua bagian yaitu Gardu Induk dan Gardu Hubung :

- a. Gardu Induk (GI) berfungsi menerima daya listrik dari jaringan subtransmisi dan menurunkan tegangannya menjadi tegangan jaringan distribusi primer (Jaringan Tegangan Menengah/JTM). Jadi pada bagian ini terjadi penurunan tegangan dari tegangan tinggi ataupun tegangan extra tinggi ke tegangan menengah 20 kV [7].
- b. Gardu Hubung (GH) berfungsi menerima daya listrik dari gardu induk yang telah diturunkan menjadi tegangan menengah dan menyalurkan atau membagi daya listrik tanpa merubah tegangannya melalui jaringan distribusi primer (JTM) menuju gardu atau transformator distribusi [7].

3. Jaringan Distribusi Primer/Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan distribusi primer berfungsi menyalurkan daya listrik, menjelajahi daerah asuhan ke gardu/ transformator distribusi. Jaringan distribusi primer

dilayani oleh gardu hubung atau langsung dari gardu induk dan atau dari pusat pembangkit [7].

4. Gardu Distribusi (GD)

Gardu distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan primer (tegangan menengah) menjadi tegangan sekunder (tegangan rendah) yang biasanya 127/220 Volt atau 220/ 380 Volt [7].

5. Jaringan Distribusi Sekunder/ Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan distribusi sekunder berfungsi untuk menyalurkan/ menghubungkan sisi tegangan rendah transformator distribusi ke konsumen menggunakan jaringan hantaran udara 3 phase 4 kawat dengan tegangan distribusi sekunder 127/ 220 Volt atau 220/380 Volt. Kecuali untuk daerah-daerah khusus dengan pertimbangan keindahan, keselamatan dan keandalan yang tinggi dipergunakan sistem kabel bawah tanah [7].

6. Sambungan Rumah

Pada sambungan rumah, biasanya tegangan yang diterima sebesar 110-400 Volt, yaitu tegangan saluran beban menghubungkan kepada peralatan. Pada sambungan rumah, tegangan yang diterima disesuaikan antara 220/380 Volt [7].

2.2.2 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta

merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik [18].

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan dengan persamaan (2.1) [18].

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (2.1)$$

S : Daya Transformator (kVA)

V : Tegangan Sisi Primer (kV)

I : Arus Jala jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh dapat digunakan persamaan (2.2) [18].

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.2)$$

I_{FL} : Arus beban penuh (A)

S : Daya transformator (kVA)

V : Tegangan sisi sekunder trafo (kV)

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap phase pada sisi sekunder trafo (phase R, phase S, phase T) mengalir arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). *Losses* pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan pada persamaan (2.3) [18].

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.3)$$

P_N : Losses penghantar netral trafo (Watt)

I_N : Arus pada netral trafo (A)

R_N : Tahanan netral trafo (Ω)

Sedangkan losses yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan persamaan (2.4) [18].

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.4)$$

P_G : Losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G : Arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G : Tahanan pembumian netral trafo (Ω)

2.2.3 Karakteristik Kualitas Daya Listrik

2.2.3.1 Kualitas Tenaga

1. Fluktuasi Tegangan (*Voltage Fluctuation*)

Fluktuasi tegangan merupakan rentang perubahan tegangan maksimum dan minimum [20]. Besarnya tegangan sangat mempengaruhi operasi dari suatu peralatan, apabila tegangan yang disuplai ke peralatan melebihi tegangan nominalnya maka akan terjadi beberapa kerugian diantaranya adalah timbulnya arus yang melebihi nominalnya, hal ini selain akan memperburuk operasi peralatan juga dapat memperpendek *lifetime* peralatan tersebut. Demikian pula sebaliknya, apabila tegangan yang di suplai ke peralatan lebih rendah dari tegangan nominalnya maka akan menyebabkan operasi peralatan yang buruk, bahkan dapat menyebabkan peralatan tidak dapat beroperasi (apabila tegangan kurang dari tegangan start peralatan). Toleransi tegangan lebih pada sisi beban-beban listrik adalah $\pm 10\%$ dari tegangan nominal [21].

2. Tegangan Tidak Seimbang

Tegangan tidak seimbang terjadi apabila tiap phase mempunyai besar dan sudut tegangan yang tidak standar, sehingga tegangan antar phase menjadi tidak sama. Ketidakseimbangan tegangan sangat mempengaruhi kinerja beban tiga phase (seperti motor, trafo dsb). Hal ini akan menyebabkan timbulnya peningkatan temperatur, konsumsi kwh dan penurunan kemampuan operasi (*derating capacity*). Apabila terjadi ketidakseimbangan tegangan sebesar $\pm 5\%$ maka akan meningkatkan temperatur sebesar 50%, di mana hal ini membutuhkan energi listrik $\pm$ sebesar 10% dari kebutuhan daya totalnya. Bahkan pada motor-motor listrik akan mengakibatkan *derating capacity* motor listrik tersebut, dengan kata lain akan menurunkan kemampuan maksimal dari motor listrik tersebut [22].

3. Harmonik Tegangan (*Voltage Harmonic*)

Harmonik tegangan merupakan gelombang distorsi yang merusak bentuk gelombang fundamental (sinusoidal) tegangan, sehingga bentuk gelombang

tegangan menjadi buruk (tidak sinusoidal murni). Harmonik tegangan ini dapat menyebabkan terjadinya pemanasan dan kualitas operasi yang buruk pada kinerja peralatan. Besarnya toleransi harmonik tegangan (THD-V) yang diperbolehkan adalah sebesar 3%. Harmonik pada tegangan ini umumnya dipengaruhi oleh harmonik arus yang dihasilkan oleh beban/peralatan listrik [22].

2.2.2.2 Kualitas Arus

Harmonik arus merupakan gelombang distorsi yang merusak bentuk gelombang fundamental (sinusoidal) arus, sehingga bentuk gelombang arus menjadi tidak sinusoidal murni [23]. Penyebab utama timbulnya Harmonik adalah peralatan yang bersifat non-linier, seperti komputer, peralatan elektronik, *robotics* (sistem kontrol), balast lampu elektronik, *variabel speed drives*, *frequency inverters*, *USP (Uninterrupted Power Supply)*, *DC Drives*, *battery chargers*. Adanya harmonik arus ini akan menyebabkan beberapa kerugian pada operasi peralatan diantaranya overheating, operasi peralatan yang tidak reliable, netral overloading, penurunan lifetime peralatan dan peningkatan konsumsi kwh (arus) [23].

2.2.2.3 Daya Listrik

1. Daya listrik

Daya listrik (*electrical power*) adalah jumlah energi yang diserap atau dihasilkan dalam sebuah sirkuit/rangkaian. Sumber energi seperti tegangan listrik akan menghasilkan daya listrik sedangkan beban yang terhubung dengannya akan menyerap daya listrik tersebut. Dengan kata lain, daya listrik adalah tingkat konsumsi energi dalam sebuah sirkuit atau rangkaian listrik. Kita mengambil contoh lampu pijar dan *heater* (pemanas) [25].

Lampu pijar menyerap daya listrik yang diterimanya dan mengubahnya menjadi cahaya sedangkan heater mengubah serapan daya listrik tersebut menjadi panas. Semakin tinggi nilai watt-nya semakin tinggi pula daya listrik yang dikonsumsi [25].

Persamaan yang digunakan menggunakan rumus persamaan (2.5) [25] :

$$P = V \times I \times \cos \phi \times \sqrt{3} \quad (2.5)$$

P = daya listrik (W)

V = tegangan Listrik (V)

I = arus listrik (I)

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

Daya puncak merupakan besar operasi beban maksimum, besarnya beban puncak menjadi referensi untuk menentukan besar langganan kapasitas kVA kepada produsen Listrik PLN. Penentuan Kapasitas kVA harus disesuaikan dengan besarnya beban puncak agar dicapai yang optimum antara usaha memenuhi kapasitas beban puncak dengan usaha untuk meminimumkan besar langganan kVA [25].

2. Faktor Daya (*Power Faktor*)

Faktor daya atau power faktor (pf) merupakan rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya nyata (VA). Faktor daya mempunyai nilai range antara 0–1 dan dapat juga dinyatakan dalam persen [26]. Faktor daya merupakan pergeseran phase antara tegangan dan arus, didapat dari hasil perkalian bilangan kompleks. Faktor daya dapat bersifat leading dan lagging PF lead umumnya disebabkan oleh beban-beban yang bersifat kapasitif, sedangkan faktor daya bersifat *lagging* disebabkan oleh beban-beban yang bersifat induktif. Faktor daya yang rendah dapat menimbulkan efek-efek yang merugikan, seperti memperbesar rugi-rugi saluran, pemborosan kapasitas sistem (kVA), dan mengurangi efisiensi sistem (kW). Perbaikan faktor daya dapat dilakukan dengan menerapkan kapasitor bank pada sistem peralatan yang disebut dengan *PFCC (Power Faktor Correction Capasitor)*, namun peralatan seperti ini dapat menimbulkan efek-efek yang merugikan seperti [27] :

- *Overvoltage*
- Rentan terhadap surja dan transien,
- Memperbesar harmonik.
- Menimbulkan resonansi, $X_C = X_L$, dan pemanasan.
- Menyebabkan faktor daya menjadi lead pada kondisi beban rendah
- Memperbesar torsi dan KW

2.2.4 Penyusutan Energi Pada Jaringan Distribusi

Rugi rugi atau bisa dikatakan sebagai susut energi merupakan fenomena yang umum terjadi di suatu sistem tidak mungkin memiliki efisiensi sebesar 100%. Artinya selalu ada bagian dari daya yang hilang ketika disalurkan, sehingga tidak seluruh daya yang dikirimkan dapat sampai kepada konsumen. Daya yang hilang dalam jumlah waktu tertentu dikatakan sebagai energi yang hilang. Penyusutan energi pada jaringan distribusi ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian, antara lain [23]:

1. Penyusutan energi pada penyulang
2. Penyusutan energi pada transformator distribusi
3. Penyusutan energi pada persambungan (*jointing*)

2.2.5 Penyusutan Energi Pada Penyulang

Penyulang merupakan bagian dari sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan antara Gardu Induk (GI) dengan gardu-gardu distribusi yang tersebar diseluruh wilayah pelayanan. Penyulang sendiri dapat dipisahkan menjadi beberapa bagian, antara lain [28]:

1. Konduktor Phase

Pada bagian penyulang ini konduktor phase merupakan bagian dari penyulang yang terbuat dari bahan logam. Umumnya bahan yang digunakan berupa aluminium atau tembaga. Karena terbuat dari bahan logam, maka konduktor yang dipakai memiliki nilai resistansi (R) tertentu. Resistansi dari konduktor pada kabel

merupakan bagian penting dari impedansi yang digunakan untuk studi kegagalan dan studi aliran daya. Resistansi memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap kapasitas arus yang dapat dibawa oleh kabel [28].

Variabel umum yang mempengaruhi resistansi adalah suatu suhu dari konduktor tersebut, dapat dikatakan bahwa resistansi meningkat seiring dengan peningkatan suhu sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (2.6) [28].

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{M+t2}{M+t1} \quad (2.6)$$

R_{t2} = resistansi pada saat suhu $t_2, ^\circ\text{C}$
 R_{t1} = resistansi pada saat suhu $t_1, ^\circ\text{C}$
 M = koefisien temperatur untuk material tertentu
 = 228.1 untuk aluminium
 = 234.5 untuk tembaga

Untuk jangkauan suhu yang luas, resistansi akan meningkat hampir linier terhadap suhu baik pada aluminium maupun pada tembaga. Efek dari suhu terhadap kenaikan resistansi dapat disederhanakan sebagai persamaan (2.7) [28].

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha (t_2 + t_1)] \quad (2.7)$$

α = koefisien temperatur dari resistansi
 = 0.00404 untuk 61.2% aluminium IACS pada suhu 20°C
 = 0.00347 untuk 6201-T81 aluminium *alloy* pada suhu 20°C
 = 0.00383 untuk tembaga *hard-drawn* pada suhu 20°C
 = 0.0036 untuk aluminium-*clad steel* pada suhu 20°C

Sehingga dari persamaan (2.5) dan (2.6) diatas di dapat hubungan bahwa $\alpha = \frac{1}{M}$

Yang perlu diperhatikan dalam permasalahan ini adalah ketika jaringan transmisi masuk ke dalam GI, maka tegangan sistem akan diturunkan dari tegangan tinggi untuk transmisi (150 kV) menjadi tegangan menengah (20 kV) sehingga dengan besarnya daya yang sama, penurunan tegangan akan sejalan dengan kenaikan arus pada sistem. Arus yang besar pada konduktor dapat menimbulkan

rugi rugi daya yang besar pada konduktor tersebut karena fungsi arus merupakan kuadrat pada persamaan daya yang hilang, sebagai dinyatakan pada persamaan (2.8) [28].

$$P_{\text{losses}} = I^2 R \quad (2.8)$$

P_{losses} = daya yang hilang pada rangkaian, Watt

I = arus yang mengalir pada rangkaian, Ampere

R = hambatan pada rangkaian, Ohm

Arus dengan besar 4 ampere membuat daya yang hilang 16 kali lebih besar dibandingkan arus sebesar 1 ampere pada konduktor dengan hambatan yang sama. Sementara total energi yang hilang akibat terjadinya susut daya ini dapat diperhitungkan berdasarkan persamaan (2.9) [28].

$$VD_{pu} = \frac{S_r (r \cos \theta + x \sin \theta) l}{V_s^2} \quad (2.9)$$

2. Kabel Distribusi

Penghantar/kabel merupakan penyalur energi listrik. Pemilihan kabel sangat berpengaruh terhadap daya listrik dan perlindungan/isolasi terhadap arus bocor yang bisa menyebabkan bahaya arus listrik. Arus listrik adalah mengalirnya elektron secara terus menerus dan berkesinambungan pada konduktor akibat perbedaan jumlah elektron pada beberapa lokasi yang jumlah elektronnya tidak sama. Satuan arus listrik adalah ampere [28].

Pada umumnya kabel yang digunakan untuk distribusi terdiri atas konduktor phase, kemudian terdapat pelindung yang terbuat dari semikonduktor, isolasi kabel tersebut, pelindung isolator yang terbuat dari semikonduktor, kawat netral atau pelindung, dan pada akhirnya selubung penutup. Sebagian besar kabel distribusi merupakan kabel dengan konduktor tunggal. Terdapat dua jenis kabel, yaitu kabel dengan netral yang tersusun secara konsentrik dan kabel daya. Kabel dengan netral konsentrik umumnya memiliki konduktor yang terbuat dari aluminium, isolasi padat, dan netral yang tersusun secara konsentrik. Netral konsentrik terbuat dari beberapa kawat tembaga yang dililit mengitari isolasi [28].

Netral yang konsentrik merupakan netral yang sesungguhnya. Artinya kawat netral tersebut dapat membawa arus balik pada sistem pentanahan. Kabel distribusi

bawah tanah untuk kawasan perumahan umumnya memiliki netral yang saluran utama tiga phase dan penyaluran daya tiga phase untuk kebutuhan industri dan kebutuhan komersial lainnya.

Untuk menentukan jenis dan luas penampang penghantar listrik dapat dilihat pada Tabel 2.1 [26].

Tabel 2.1. Datasheet Kabel NYY [26]

Size	No. of Wire and Shaped of Conductor		Nominal Thickness		Approximately		Min. Bending Diameter	Std. Length per reel
			Insulation	Outer Sheath	Overall Diameter	Net. Weigh		
mm ²	pcs	shape	mm	mm	mm	kg/km	mm	m
1,5	1	Re	0,8	1,8	12	213	216	1000
	7	rm			12,4	224	223	
2,5	1	Re	1	1,8	13	273	234	500
	7	Rm			13,6	292	245	
4	1	Re	1,2	2,1	15,1	385	272	300
	7	Rm			15,8	413	284	
6	1	Re	1,4	2,3	16,3	490	293	300
	7	Rm			17,2	527	310	
10	7	Rm	1,6	2,5	19,4	743	349	300
16	7	Rm			21,8	1035	392	
25	7	Rm	1,8	2,7	25,9	1541	466	300
35	7	Rm			28,6	1999	515	
50	19	sm	2,2	2,9	30	2498	540	300
70	29	Sm			34,1	3374	614	
95	37	Sm	2,4	3,1	38,7	4536	697	300
120	37	Sm			42,6	5676	767	
150	37	Sm	2,4	3,1	46,3	6910	833	300
185	37	Sm			52,2	8596	940	
240	37	Sm	2,4	3,1	58,5	11087	1053	300
300	37	Sm			65,4	13549	1177	

Tabel 2.2. Kemampuan Hantar Arus Kabel NYY [26]

Size	DC Resistance at 20°C		Current Carrying Capacity at 30°C		Conductor Short Circuit Current Capacity at			DC Voltage Test
	Conductor (max)	Insulation (min)	In Ground	In Air	0,1 second	0,5 second	1,0 second	
mm ²	Ohm/km	M.ohm.km	A	A	kA	kA	kA	
1,5	12,1	50	24	18	0,67	0,30	0,21	8,5 kV for 5 minutes
2,5	7,41		32	25	1,12	0,50	0,36	
4	4,61		41	34	1,80	0,80	0,57	
6	3,0		52	44	2,69	1,20	0,85	
10	1,83		69	60	4,49	2,01	1,42	
16	1,15	40	89	80	7,18	3,21	2,27	8,5 kV for 5 minutes
25	0,727		116	105	11,23	5,02	3,55	
35	0,525		138	130	15,72	7,03	4,97	

Tabel 2.2. Kemampuan Hantar Arus Kabel NYY [26]

50	0387		165	160	22,45	10,4	7,10
70	0,268		05	200	31,43	14,06	9,94
95	0,193	30	245	45	42,66	19,08	13,49
120	0,153		280	25	53,89	24,10	17,04
150	0,124		315	325	67,36	30,12	21,30
185	0,0991	20	355	370	83,07	37,15	26,27
240	0,0754		415	435	107,77	48,20	34,08
300	0,0601		465	500	134,71	60,25	42,06

Sementara itu kabel daya memiliki konduktor phase yang terbuat dari tembaga atau aluminium, isolasi padat, dan umumnya pita pelindung tipis yang terbuat dari tembaga. Untuk keperluan rangkaian distribusi, kabel daya digunakan untuk aplikasi penyulang saluran utama, penyulang rangkaian dan untuk aplikasi tiga phase dengan arus besar lainnya. Selain dua jenis kabel utama tersebut, juga terdapat kabel untuk keperluan aplikasi dengan tegangan menengah seperti kabel daya dengan tiga konduktor phase, kabel yang tahan terhadap api, kabel dengan fleksibilitas tinggi, dan kabel bawah laut sesuai Gambar 2.1 [29].



Gambar 2.1. Penampang Kabel Distribusi [29]

Bagian yang perlu mendapat perhatian utama dari suatu kabel adalah isolasinya. Beberapa hal kunci yang perlu mendapat perhatian di dalam isolasi kabel adalah sebagai berikut [29] :

a. Konstanta Dielektrik (Permitivitas)

Faktor ini mempengaruhi kapasitas dari kabel. Konstanta dielektrik merupakan perbandingan dari kapasitansi dengan material isolasi terdapat kapasitansi dengan konfigurasi yang sama di ruang hampa. Kabel dengan kapasitansi yang lebih besar dapat menarik arus *charging* yang lebih besar [29].

b. Resistivitas Volume

Arus bocor yang melalui isolasi merupakan fungsi dari resistivitas isolasi terhadap arus searah (DC). Resistivitas isolasi menurun seiring dengan kenaikan suhu. Isolasi pada saat ini memiliki resistivitas yang sangat tinggi sehingga hanya sedikit sekali arus resistif yang dapat mengalir dari konduktor menuju isolasi [29].

c. Rugi Dielektrik

Seperti pada kapasitor, kabel memiliki rugi dielektrik. Kerugian ini diakibatkan oleh pergerakan dipol dipol di dalam polimer atau sebagai akibat dari pergerakan muatan pembawa di dalam isolasi. Rugi dielektrik memiliki kontribusi terhadap arus resistif bocor pada kabel. Rugi rugi dielektrik akan meningkat seiring dengan frekuensi, temperatur, dan tegangan pengoperasian [29].

d. Faktor Disipasi (loss angle, loss tangent, $\tan \delta$,dan pendekatan nilai PF)

Faktor disipasi merupakan perbandingan dari arus resistif yang muncul oleh kabel terhadap arus kapasitif yang muncul (I_R/I_X). Karena arus bocor umumnya kecil, maka faktor disipasi dapat digunakan sebagai pendekatan nilai faktor daya, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (2.10) [29].

$$Pf = I_R/|I| = I_R / \sqrt{I_R^2 + I_X^2} \approx I_R / I_X = \text{faktordisipasi} \quad (2.10)$$

Beberapa faktor kunci untuk kabel dengan isolasi yang berbeda-beda ditunjukkan oleh Tabel 2.3 [19].

Tabel 2.3. Faktor Kunci Isolasi pada Berbagai Macam Kabel [19]

	Konstanta dielektrik 20°C	Loss Angle Tan δ 20°C	Resistansi Volume 20°C	Rugi dielektrik tahunan W/1000ft	Kekuatan implus V/mil	Penyerapan air ppm
PILC	3.6	0.003	10^{11}	N / A	1000-2000	25
PE	2.3	0.0002	10^{14}	N / A		100
XLPE	2.3	0.0003	10^{14}	8	3300	350
TR-XLPE	2.4	0.001	10^{14}	10	3000	< 300
EPR	2.7 – 3.3	0.005-0.008	10^{13} - 10^{14}	28 - 599	1200-2000	1150-3200

Nilai kapasitansi yang muncul lebih signifikan dibandingkan nilai kapasitansi pada kawat saluran udara. Nilai kapasitansi dari kabel dengan konduktor tunggal ditunjukkan oleh persamaan (2.11) [19] :

$$C = \frac{0.00736\varepsilon}{\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)} \quad (2.11)$$

C = kapasitas, $\mu\text{F}/1000\text{ft}$

0.00736 = konstanta dielektrik ruang hampa (ε_0)

ε = konstanta dielektrik bahan (2.3 untuk XLPE, 3 untuk EPR)

d = diameter bagian dalam dari isolasi

D = diameter bagian luar isolasi

Pengaruh dari adanya nilai kapasitansi dari kabel akan menimbulkan daya reaktif pada sistem, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan (2.12) [19] :

$$Q_{\text{var}} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V_{\text{LG,kV}}^2 \quad (2.12)$$

Q_{var} = var/ 1000ft/ phase

f = frekuensi dari sistem, Hz

C = Kapasitansi, $\mu\text{F}/1000\text{ft}$

$V_{\text{LG,KV}}$ = tegangan saluran ke tanah, kV

Pada kabel untuk distribusi terdapat nilai hambatan yang muncul selain hambatan resistif yang berasal dari konduktor phasesnya. Nilai hambatan yang lain ini akan menentukan impedansi total dari kabel yang digunakan. Yang mempengaruhi nilai impedansi total tersebut adalah nilai reaktansi yang berasal dari rangkaian yang bersifat induktif dan bagian rangkaian yang bersifat kapasitif [19].

Nilai reaktansi proposional terhadap induktansi dari rangkaian dan induktansi akan menyebabkan tegangan yang berlawanan dengan perubahan aliran arus. Arus bolak balik (AC) selalu berubah, sehingga nilai reaktansi akan selalu menciptakan tegangan sebagai akibat dari aliran arus. Jarak antar konduktor akan menentukan komponen eksternal dari nilai reaktansi tersebut. Nilai induktansi berdasarkan oleh wilayah yang dipengaruhi oleh lingkaran arus, sehingga wilayah yang lebih besar (jarak antar konduktor yang lebih lebar) akan menimbulkan nilai induktansi yang besar juga. Pada kawat saluran udara, nilai reaktansi induktif terutama berdasarkan jarak pemisahan antar konduktor dan bukan ukuran dari konduktor tersebut, bukan pula jenis logam yang digunakan untuk konduktor tersebut, serta bukan kemampuan regang dari konduktor tersebut. Nilai reaktansi antara dua konduktor yang paralel dalam ohm per mil adalah seagaimana pada persamaan (2.13) [19].

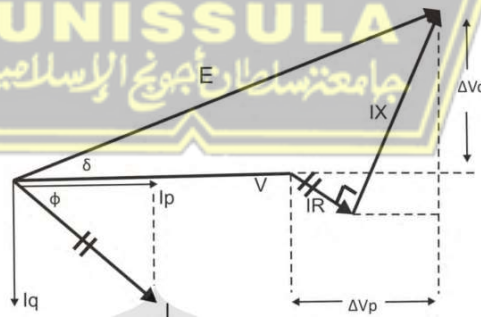
$$X_{ab} = 0.2794 \frac{f}{60} \log_{10} \frac{d_{ab}}{GMR} \quad (2.13)$$

f = frekuensi, Hz

d_{ab} = jarak di antara konduktor, feet

GMR = jari-jari rata-rata secara geometris dari kedua konduktor, feet

Dengan adanya reaktisitas pada jaringan maka dapat timbul daya reaktif. Daya reaktif dapat menimbulkan jatuh tegangan pada sisi penerima [19].



Gambar 2.2. Diagram Phase yang Menunjukkan Jatuh Tegangan Akibat Daya Reaktif [19]

Sebagaimana di perlihatkan pada Gambar 2.2, dari gambar tersebut, maka terlihat bahwa dengan adanya daya reaktif akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan di sisi penerima. Hubungan antara daya reaktif dengan jatuh tegangan ditunjukkan oleh persamaan (2.14) sampai (2.15) [19].

$$\begin{aligned} E^2 &= (V + \Delta V_p)^2 + \Delta V_q^2 \\ &= (V + RI \cos \phi + XI \sin \phi)^2 + (XI \cos \phi - RI \sin \phi)^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$E^2 = \left(V + \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V}\right)^2 + \left(\frac{XP}{V} - \frac{RQ}{V}\right)^2 \quad (2.15)$$

Adanya jatuh tegangan di sisi penerima merupakan indikator adanya susut energi pada jaringan. Karena untuk beban dengan kebutuhan suplai dayayang tetap, seperti pada motor-motor industri, penurunan tegangan akan menyebabkan terjadinya peningkatan arus. Sedangkan telah dibahas diawal bahwa dengan adanya arus yang besar, maka rugi rugi saluran akibat arus (I^2R) juga akan semakin besar, sehingga energi yang hilang pada jangka waktu tertentu juga akan besar. Hubungan antara tegangan dengan arus pada beban yang membutuhkan sulpai daya tetap dituliskan dalam persamaan (2.16) [19].

$$P = VI \cos \theta \quad (2.16)$$

P = daya yang dibutuhkan oleh motor motor (besarnya tetap)

V = tegangan operasi, Volt

i = arus pada rangkaian, Ampere

$\cos \theta$ = faktor daya ketika daya yang dibutuhkan konstan, maka penurunan tegangan akan diikuti dengan kenaikan arus.

2.2.6 Penyusutan Energi pada Transformator Distribusi

Transformator merupakan komponen dalam jaringan tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik dari suatu tingkat tegangan ke suatu tingkat tegangan lainnya. Sebuah transformator terdiri dari atas dua pasang kumparan yang terhubung oleh medan magnetik. Medan magnetik akan menghantarkan seluruh energi (kecuali pada auto transformator). Pada transformator yang ideal, tegangan pada sisi masukan dan keluaran berhubungan dengan perbandingan lilitan dari transformator tersebut, sebagaimana dapat dituliskan dalam persamaan (2.17) [19].

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (2.17)$$

N_1 dan N_2 merupakan jumlah lilitan dan V_1 dan V_2 adalah tegangan pada kumparan 1 dan kumparan 2. Pada transformator yang sesungguhnya, tidak semua

fluks berada diantara dua kumparan tersebut dapat disalurkan. Fluks yang bocor tersebut akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan diantara kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga besarnya tegangan akan lebih akurat ditunjukkan oleh persamaan (2.18) [19].

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 - X_L I_1 \quad (2.18)$$

X_L merupakan reaktansi bocor dalam satuan ohm yang dilihat dari sisi kumparan primer, dan I_1 merupakan arus yang keluar dari kumparan primer. Arus pada transformator juga dipengaruhi oleh jumlah lilitan yang ada pada transformator tersebut, seperti pada persamaan (2.19) [19].

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \text{ atau } N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.19)$$

Transformator memiliki inti yang bersifat magnetik yang berfungsi untuk membawa medan magnetik yang besar. Baja yang dipergunakan sebagai inti di dalam transformator memiliki permeabilitas lebih dari 1000 kali dari permeabilitas udara. Apabila pada sisi primer (sisi sumber, sisi tegangan tinggi) diberikan suatu nilai tegangan tertentu pada sisi sekunder (sisi beban, sisi tegangan rendah) tidak ada beban yang terpasang, maka kumparan akan menarik arus eksitasi dari sistem yang menimbulkan medan magnetik sinusoidal di inti transformator. Fluks yang muncul pada lilitan akan menyebabkan ggl balik pada kumparan yang akan membatasi arus yang masuk ke dalam transformator. Transformator tanpa beban (no load) pada sisi sekundernya akan menarik arus yang kecil sekali (hanya berupa arus eksitasi) yang besarnya sekitar 0.5% dari total arus yang mengalir pada transformator pada saat berbeban penuh. Pada sisi sekunder yang tidak terbeban, maka fluks sinusoidal akan menciptakan tegangan rangkaian terbuka (open-circuit voltage) yang nilainya sama dengan nilai tegangan pada sisi primer dikalikan dengan perbandingan jumlah lilitan. Ketika kita tambahkan beban pada sisi sekunder dari transformator, maka beban akan menarik arus melalui kumparan sekunder. Umumnya pada rangkaian yang bersifat induktif, arus yang semakin besar akan menciptakan fluks yang lebih banyak, tetapi tidak pada transformator. Peningkatan gaya pada arus pada satu kumparan akan berlawanan dengan penurunan gaya dari arus yang mengalir pada kumparan yang lainnya [19].

Sebagian besar arus magnetisasi merupakan daya reaktif, tetapi tetap memiliki unsur daya real. Daya pada transformator dapat mengalami penyusutan pada bagian inti transformator melalui beberapa hal, antara lain [21]:

1. Histerisis

Karena dipol-dipol magnet berubah arah, maka terjadi peningkatan panas pada inti transformator sebagai akibat adanya tumbukan antar dipol dipol magnetik tersebut. Rugi histeris merupakan fungsi dari volume inti, frekuensi, dan kepadatan fluks maksimum sebagaimana dituliskan pada persamaan (2.20) [21]:

$$P_h \propto V_e f B^{1.6} \quad (2.20)$$

V_e = volume dari inti

f = frekuensi

B = kepadatan fluks maksimum

2. Arus Eddy

Arus Eddy pada bahan penyusun transformator akan menyebabkan rugi rugi resistif (I^2R). Fluks dari inti akan menginduksi arus Eddy sehingga menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan fluks pada transformator. Rugi arus Eddy merupakan fungsi dari volume inti, dan kepadatan fluks, ketebalan lempeng, resistivitas dari material penyusunan inti sebagaimana dituliskan dalam persamaan (2.21) [21].

$$P_e \propto V_e B^2 f^2 t^2 / r \quad (2.21)$$

t = ketebalan lempeng

r = resistivitas dari material inti

Inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan secara signifikan mengurangi susut pada bagian inti, kurang lebih menjadi ¼ dari susut yang terjadi pada inti yang terbuat dari bahan baja-silikon, antara 0.005% sampai 0.01% dari rating transformator. Inti dari bahan *amorphous* memiliki rugi histerisis yang rendah. Rugi arus Eddy juga sangat rendah karena material memiliki resistivitas yang tinggi dan ketebalan lempeng yang sangat tipis

(ketebalannya mencapai 1 mm). Transformator dengan inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan memiliki ukuran yang lebih besar daripada transformator biasa pada rating yang sama dan memiliki biaya pengaduan yang lebih tinggi. Rugi pada saat transformator dibebani, rugi ada saat transformator tanpa beban, dan harga semuanya memiliki hubungan [21].

Sehingga pada transformator jumlah penyusutan total yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.22) [21].

$$L_{\text{total}} = P_2 F_{\text{ls}} L_{\text{total}} + L_{\text{no-load}} \quad (2.22)$$

L_{total} = susut rata rata, kW

P = beban puncak transformator, per unit

F_{ls} = faktor susut, per unit

$L_{\text{no-load}}$ = susut tanpa beban, kW

L_{load} = susut berbeban, kW

Ketika kita ingin mengurangi rugi-rugi saat transformator berbeban maka akan meningkatkan rugi saat transformator tidak berbeban dan begitu pula kebalikannya ditunjukn pada Tabel 2.4. [21].

Tabel 2.4. Hubungan antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi Ruginya [21]

Untuk Menurunkan No Load Losses	No Load Losses	Load Losses	Biaya
Mengunakan material dengan rugi lebih rendah	Lebih rendah	Tidak berubah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan fluks dengan cara :	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
1) Memperbesar CSA (cross section area)		Lebih tinggi	Lebih tinggi
2) Menurunkan tegangan / jumlah lilitan	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
Menggunakan material konduktor yang memiliki rugi rugi rendah	Tidak berubah	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan arus dengan cara memperbesar CSA (cross section area)	lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi panjang daerah yang di lewati arus dengan cara :			
1) Mengurangi CSA inti	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih redah
Meningkatkan tegangan / jumlah lilitan			

2.2.7 Penyusutan Energi pada Sambungan

Persambungan merupakan salah satu hal yang penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Sambungan ini sedikit banyak menentukan keefisienan sistem atau peralatan listrik tersebut. Seperti kontaktor, saklar dan rele adalah salah satu contoh peralatan yang listrik yang harus bisa berfungsi dengan baik apabila dalam keadaan rangkaian tertutup. Pada kondisi normal, arus akan mengalir pada rangkaian tertutup, dan akan langsung terputus apabila dalam rangkaian terbuka. Namun kondisi maksimal dari rangkaian tersebut sangat sulit untuk dicapai karena banyak faktor-faktor lain yang menyebabkan kondisi di lapangan sehingga rangkaian tertutup tidak bekerja dengan maksimal. Banyak faktor-faktor lain yang menyebabkan kondisi di lapangan berbeda dengan teori yang ada. Busur lingkaran (arcing) merupakan fenomena yang muncul pada persambungan. Busur listrik memiliki beberapa efek negatif yang harus diperhatikan seperti munculnya interferensi elektromagnetik, merusak permukaan kontak pada saklar, panas yang dihasilkan dapat menyebabkan permukaan kontak meleleh, dan yang paling berbahaya ialah dapat mencederaikan atau menyebabkan kematian pada manusia akibat kontak fisik secara langsung [21].

Busur listrik merupakan fenomena arus bisa melewati celah antara permukaan listrik elektrik seperti dua permukaan kontak pada konektor terpisah. Busur listrik dapat muncul pada kontak yang tertutup, yaitu ketika kedua permukaan saling mendekati sebelum keduanya benar-benar bersentuhan. Busur listrik juga bisa muncul pada kontak yang terbuka, yaitu pada saat permukaan kontak terpisah antara satu dengan lainnya [21].

Konektor elektrik atau saklar harus dapat melewatkan arus antara kedua permukaan kontak apabila dalam posisi tertutup. Hal ini menandakan adanya tegangan pada permukaan kontak. Apabila konektor tidak terhubung, atau saklar dalam posisi terbuka, arus akan berhenti mengalir tetapi tegangannya akan tetap ada. Tegangan ini baru akan hilang apabila sumber tegangannya diputus. Pada keadaan yang tepat, tegangan ini akan menyebabkan munculnya busur pada celah antara kedua permukaan [21].

Busur dapat muncul baik pada permukaan kontak yang terbuka maupun yang tertutup. Dalam kondisi tertutup, tegangan minimum busur turun sebagaimana kedua permukaan kontak saling mendekati. Apabila sumber tegangan terlalu rendah, tidak akan terbentuk busur dan arus hanya akan mulai mengalir apabila kedua permukaan saling bersentuhan. Dengan sumber tegangan yang cukup, busur penutupan akan muncul pada tegangan minimum busur turun sampai bawah tegangan sumber [21].

Busur penutupan diawali dengan elektron meninggalkan katoda dan berpindah melewati celah kontak menuju anoda. Selama perjalanan, elektron akan bertabrakan dengan molekul ionisasi gas di udara. Cahaya yang muncul dari busur berasal dari energi molekul gas. Elektron akan menuju anoda dan memanaskannya sehingga dapat melepaskan ion-ion positif ke celah tersebut. Ion-ion positif ini bersamaan dengan campuran gas yang terjadi juga akan terbombardir dan memanaskan katoda. Elektron, ion metal, ion gas dan metal yang menguap semua membentuk kolom busur [21].

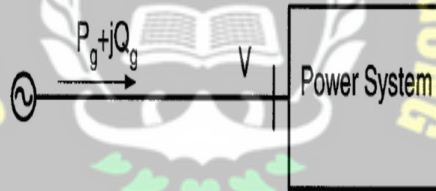
Busur listrik juga dapat muncul bila kedua permukaan kontak terpisah yang menyebabkan terputusnya arus pada rangkaian. Hal ini terjadi bila arus dan tegangan beban yang besar terganggu sebagaimana ditemukan pada saklar atau rele. Busur terbuka dapat terjadi dengan cara yang berbeda. Ada nilai yang pasti dari resistansi elektrik sebagaimana arus ditekan melewati jalur yang kecil melewati permukaan. Dengan permukaan kontak yang mulai terpisah, tekanan berkurang baik dari jumlah maupun ukurannya. Ini mendorong nilai arus yang semakin besar yang melewati sisa jalurnya dan resistansi elektrik bertambah. Sementara nilai resistensi yang besar akan menyebabkan penyusutan energi karena saluran resistif juga akan semakin besar [21].

2.3. Generator

Generator arus bolak-balik (AC) atau alternator adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik [30].

Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi elektromagnetis. Rotor diputar oleh penggerak mula (prime mover) sehingga kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu [31].

Sudah diketahui bahwa generator merupakan elemen yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Generator adalah penyedia daya sesungguhnya, yang juga memainkan peran dukungan daya reaktif dengan menghasilkan MV atau menyerap surplus daya reaktif dari sistem atas permintaan operator sistem. Model generator statis hanya diilustrasikan pada Gambar 2.3. [32].



Gambar 2.3. Model Generator [32]

Kemampuan generator untuk menghasilkan daya dan memberikan dukungan (Pembangkitan / penyerapan) dibatasi oleh empat kondisi berikut [32]:

1. Peringkat daya dari penggerak utama;
2. Peringkat daya dari alternator;
3. Arus eksitasi maksimum;
4. Ketidakstabilan pada faktor daya utama.

Keempat batasan tersebut menentukan kemampuan generator secara keseluruhan, dapat ditentukan dengan Tabel 2.5. [32]

Tabel 2.5. Spesifikasi Generator

No	kVA	Frek (Hz)	Voltase	Power Factor	Konsumsi bahan bakar maks (lt / jam)	Harga Generator
1	45	50	230/400	0.8	12.9	222,075,000
2	60	50	230/400	0.8	13.9	241,650,000
3	80	50	230/400	0.8	14.8	274,050,000
4	100	50	230/400	0.8	22.6	367,975,000
5	135	50	230/400	0.8	32.4	475,925,000
6	150	50	230/400	0.8	38.2	510,400,000
7	200	50	230/400	0.8	45.8	615,125,000
8	250	50	230/400	0.8	56.0	721,000,000
9	350	50	230/400	0.8	76.0	853,250,000
10	400	50	230/400	0.8	85.0	886,950,000
11	500	50	230/400	0.8	106.0	1,055,800,000
12	600	50	230/400	0.8	129.0	1,260,450,000
13	725	50	230/400	0.8	155.0	1,726,312,500
14	1100	50	230/400	0.8	172.0	2,039,850,000
15	1300	50	230/400	0.8	226.0	2,193,500,000

Selanjutnya dengan menggunakan data dari pabrikasi untuk genneator merek Perkins tersebut, dengan menggunakan software SPSS diperoleh model persamaan hubungan daya yang digenerasi dengan kebutuhan bahan bakar diperoleh sebagai Persamaan (2.23) [32].

$$C_i = a + bP_{gi} + c P_{gi}^2 \quad (2.23)$$

2.4. Analisis Load Flow

2.4.1. Pemodelan Load Flow

Dalam sistem daya listrik, beberapa peralatan seperti generator maupun trafo dapat dilakukan pengontrolan. Dengan melakukan kontrol dengan benar, maka sistem dapat mencapai suatu tujuan yang ditentukan, seperti meminimalkan biaya pembangkitan, meminimalkan MW, memaksimalkan transfer MW, dan lain-lain [32].

1. Fungsi Batasan

Dalam sistem yang biasanya dioperasikan, kendala operasional (constraint) harus diperhatikan. Dalam penelitian ini, batasan berikut ini akan dipertimbangkan [32]:

a. Batasan kesamaan

Pada setiap bus, daya nyata dan reaktif harus seimbang dengan persamaan (2.24) [32].

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i V_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (2.24)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{shij} / 2) - V_i V_j g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + V_i V_j b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)$$

Dengan P_{gi} dan Q_{gi} adalah pembangkit MW dan arus MVar pada bus i ; P_{di} dan Q_{di} adalah beban MW dan MVar di bus i ; V_i dan V_j adalah tegangan pada bus i dan bus j -masing dan θ_i dan θ_j adalah sudut fase pada bus i dan bus j [32].

b. Batasan ketidaksamaan

- 1) Semua generator pembangkit tenaga dan reaktif harus berada dalam batasan teknis dengan persamaan (2.25) sampai (2.26) [32].

$$0 \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (i \in \text{Generator}) \quad (2.25)$$

$$Q_{gi}^{\min} - \frac{Q_{gi}^{\min} - Q_{ci}^{\min}}{P_{gi}^{\max}} P_{gi} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} - \frac{Q_{gi}^{\max} - Q_{ci}^{\max}}{P_{gi}^{\max}} P_{gi} \quad (i \in \text{Generator}) \quad (2.26)$$

- 2) Semua tegangan bus harus berada dalam batas yang ditentukan persamaan (2.27) [32].

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (i \in \text{Node}) \quad (2.27)$$

- 3) Semua aliran harus berada dalam batas yang ditentukan persamaan (2.28) [32].

$$S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \leq S_{ij}^{\max} \quad (i, j \in \text{Lines}) \quad (2.28)$$

P_{ij} : aliran daya nyata;

Q_{ij} : aliran daya reaktif

P_{ij} dan Q_{ij} tergantung pada tegangan dan sudut serta pada parameter aliran,

Dengan g_{ij} dan b_{ij} masing-masing adalah konduktansi dan susut masing-masing; dan b_{shij} adalah garis Ketangkasan [32].

2. Fungsi Tujuan

Tujuan tergantung pada persyaratan sistem dan pada operator sistem. Dalam penelitian ini ini, tujuan berikut dipertimbangkan [30].

- Untuk menentukan besarnya tegangan dan sudut fase di semua node pengumpan.
- Untuk menentukan aliran garis di setiap bagian garis yang ditentukan dalam Kilo Watt (KW) dan KVAR, ampere dan derajat atau ampere dan faktor daya.
- Untuk menentukan rugi daya.
- Untuk menentukan total input ke feeder Kilo Watt (KW) dan KVAR.
- Untuk menentukan daya aktif dan reaktif dari beban berdasarkan model yang ditentukan untuk beban.

Selanjutnya tujuan yang berkaitan dengan penelitian ini adalah upaya untuk meminimalkan harga bahan bakar yang digunakan dalam rangkaian penggunaan generator disajikan dalam perumusan matematik pada persamaan (2.29) [30]:

$$\text{Min} \quad C_t = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.29)$$

Distribusi daya nyata yang optimal pada pembangkit dapat dipengaruhi oleh beroperasinya generator yang efisien, biaya bahan bakar, dan rugi daya pada saluran transmisi. Beberapa generator seringkali dapat beroperasi secara efisien dalam sistem tenaga namun hal itu tidak menjamin bahwa biaya operasinya minimum. Hal ini disebabkan oleh biaya bahan bakar yang tinggi. Jika generator

pembangkit berada ditempat yang jauh maka rugi daya pada saluran transmisi dapat menjadi besar sehingga generator menjadi tidak ekonomis [30].

Hubungan antara konsumsi bahan bakar terhadap daya yang dibangkitkan pembangkit dirumuskan oleh persamaan (2.30) [30]:

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.30)$$

C_i , = konsumsi bahan bakar unit ke-i (m³ /h atau liter/jam)

P_i = daya yang dibangkitkan generator unit ke-i (kW)

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = konstanta hubungan bahan bakar dan daya yang dihasilkan unit ke- i.

K

Konstanta $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ didapatkan dengan menentukan 3 (tiga) titik potong antara konsumsi bahan bakar (y_i) dan daya yang dibangkitkan atau beban (x_i) yang dipikul unit pembangkit terlebih dahulu. Tiga titik potong tersebut adalah titik x_1y_1 (pada beban rendah), x_2y_2 (pada beban menengah) dan x_3y_3 (pada beban tinggi) yang ketiga titik tersebut diambil pada sembarang titik [30].

Kurva biaya bahan bakar menunjukkan sebuah ukuran bagaimana biaya yang dikeluarkan akan menghasilkan tambahan daya selanjutnya. Total biaya operasi meliputi biaya bahan bakar, tenaga kerja, persediaan peralatan/bahan dan perawatan/pemeliharaan [30].

Dalam suatu sistem tenaga dengan sejumlah n pembangkit, konsumsi bahan bakar total pembangkitan dapat dihitung dengan persamaan (2.31) sampai (2.33) [30].

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.31)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \beta_i P + \gamma_i P^2 \quad (2.32)$$

Dan

$$P_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.33)$$

C_t adalah total biaya produksi.

C_i adalah biaya produksi dari pembangkit ke i

P_i adalah daya nyata dari pembangkitan ke i

P_D adalah total daya nyata pada permintaan beban
n adalah jumlah seluruh dari stasiun.

Salah satu langkah penting dalam pengoptimalan pembangkitan daya adalah dengan memperhitungkan kehilangan daya pada sistem. Kerugian transmisi merupakan faktor utama dan mempengaruhi pengiriman daya yang optimal dari pembangkit [30].

2.4.2. Metode Penyelesaian Analisis *Load Flow*

Secara umum terdapat tiga metode yang sebagian besar digunakan untuk solusi Masalah *Load flow* [32].

1. Teknik Gauss-Seidel :

Metode solusi ini dinamai berdasarkan matematikawan Jerman, Carl Friedrich Gauss dan dikembangkan oleh Philipp Ludwig von Seidel. Metode ini didefinisikan untuk matriks dengan elemen diagonal non-nol, tetapi konvergen hanya jika matriksnya definitif simetris maupun positif atau secara diagonal dominan [32].

Teknik Gauss-Seidel (GS) merupakan teknik iterasi untuk memecahkan satu set persamaan aljabar non-linear. Pada mulanya vektor solusi awal ditentukan solusi vektor yang diasumsikan. Nilai revisi dari variabel ini diperoleh dengan mengevaluasi persamaan dengan mensubstitusi di dalamnya nilai-nilai sekarang dari variabel yang lain. Prosedur yang sama diikuti untuk semua variabel lain yang menyelesaikannya iterasi penuh. Proses ini kemudian diulang hingga vektor solusi menyatu dalam batas kesalahan yang diizinkan. Tingkat konvergensi cukup sensitif terhadap nilai-nilai awal yang diasumsikan [32].

2. Teknik Newton-Raphson.

Teknik Newton-Raphson adalah proses iteratif di mana satu himpunan persamaan non-linear simultan yang dipertimbangkan menjadi satu himpunan persamaan simultan linier menggunakan deret Taylor. Dalam sistem daya dengan N-bus ada n persamaan untuk aliran daya aktif P_i dan n-persamaan untuk aliran daya reaktif Q_i . Jumlah yang tidak diketahui adalah 2 (n-1) karena

tegangan pada slack atau swing bus diketahui dan konstan baik dalam besaran dan fase [32].

3. Teknik *Fast-Decoupled*.

Metode *fast decoupled* adalah turunan dari teknik Newton-Raphson yang dirancang dalam koordinat kutub dengan beberapa perkiraan yang menghasilkan algoritma cepat untuk solusi aliran beban. Meskipun metode ini membutuhkan lebih banyak iterasi daripada metode Newton-Raphson, tetapi masih mengkonsumsi waktu yang jauh lebih sedikit per iterasi dan solusi untuk masalah aliran muatan diperoleh dengan cepat. Metode ini menemukan banyak aplikasi dalam analisis kontingensi di mana banyak modal pemadaman harus disimulasikan atau solusi aliran beban diperlukan untuk kontrol on-line [32].

2.4.3. Aliran Daya Optimal

Secara praktis stasiun pembangkit tidak pernah berjarak sama dari pusat beban dan dengan demikian biaya bahan bakar mereka tidak pernah sama. Selain itu, pada umumnya kapasitas pembangkitan melampaui total permintaan dan ini berarti suatu bentuk kerugian. Oprmsi bertujuan untuk menyelidiki kebutuhan untuk penjadwalan pembangkitan. Dalam sistem daya yang saling berhubungan, tujuan utamanya adalah untuk menjaga dan melacak penjadwalan daya nyata dan daya reaktif pada setiap pembangkit listrik untuk mengurangi biaya operasi. Dengan demikian generator daya aktif dan daya reaktif memiliki fleksibilitas untuk bervariasi dalam batasan yang ditentukan untuk memenuhi permintaan beban dengan biaya operasi serendah mungkin. Metode oprmasi ini didefinisikan sebagai masalah *Optimal Power Flow* (OPF). Dapat dihitung dengan persamaan (2.34) sampai (2.35) [32].

$$I = \frac{P}{V} \quad (2.34)$$

$$VD_{pu} = \frac{S_r(r \cos \theta + x \sin \theta)l}{V_s^2}.$$

$$P_{loss} = I^2 R$$

$$P_i = P_1 - P_2 - P_{loss} \quad (2.35)$$

Pertimbangan-pertimbangan seperti operasi ekonomis, emisi bahan bakar fosil, keamanan sistem dan pelepasan air yang optimal pada pembangkit-pembangkit hidro terlibat dalam sistem yang optimal. Tujuan utama dari masalah pengiriman beban ekonomis adalah untuk meminimalkan total biaya pembangkit di berbagai stasiun pembangkit sambil memenuhi tuntutan beban dan rugi daya dalam transmisi [32].

Berdasarkan persyaratan masalah model OPF dapat menerapkan berbagai variabel kontrol dan kendala sistem. Di antara variabel kontrol, OPF dapat mencakup hal-hal berikut [32]:

- a. Pembangkit daya nyata dan daya reaktif.
- b. Pengaturan kapasitor.
- c. Beban MVA dan MVAr (Pelepasan beban)
- d. Transformator.

2.4.4. Pemodelan Beban

Pilihan-pilihan mengenai penguatan sistem dan kinerja sistem sebagian besar didasarkan pada hasil studi simulasi aliran daya dan stabilitasnya. Untuk melakukan analisis sistem daya, model harus terintegrasi untuk memasukkan semua komponen sistem yang relevan, seperti stasiun pembangkit, sub stasiun, transmisi dan distribusi perifer dan perangkat beban [32].

Banyak perhatian telah diberikan kepada pemodelan perangkat pembangkitan dan transmisi atau distribusi daya. Tetapi pemodelan beban telah menerima lebih sedikit perhatian dan tetap menjadi keterbatasan yang belum dijelajahi dan membawa banyak ruang untuk pengembangan di masa depan. Studi terbaru mengungkapkan bahwa representasi dan pemodelan beban dapat memiliki dampak besar pada hasil analisis [32].

Keunggulan pemodelan load dalam penerapan aliran daya:

- a. Variasi permintaan daya dengan tegangan memungkinkan kapasitas kontrol yang lebih baik.

- b. Perhitungan aktual dari permintaan daya aktif dan reaktif di bus masing-masing.
- c. Kontrol atas dan bawah tegangan pada bus beban.
- d. Meminimalkan kerugian.
- e. Peningkatan profil tegangan.
- f. Pengurangan Biaya Bahan Bakar

2.5. Logika *Fuzzy*

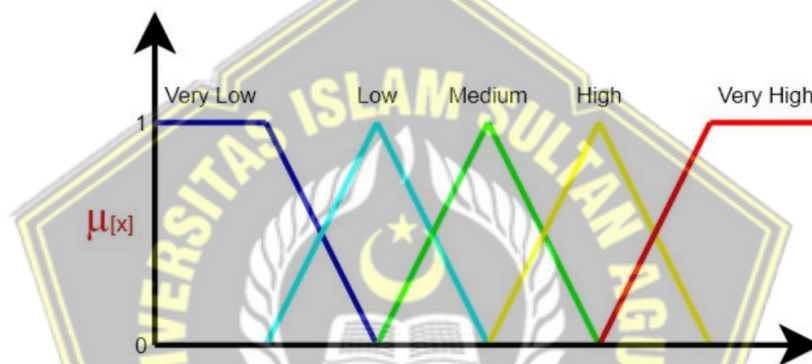
Konsep tentang logika *Fuzzy* diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Astor Zadeh pada tahun 1962. Dalam logika klasik dinyatakan bahwa segala sesuatu bersifat biner 0 atau 1, yang artinya adalah hanya mempunyai dua kemungkinan, “Ya atau Tidak”, “Benar atau Salah”, “Baik atau Buruk”, dan lain-lain. Akan tetapi, dalam logika *fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan berada di antara 0 dan 1. Artinya, bisa saja suatu keadaan mempunyai dua nilai “Ya dan Tidak”, “Benar dan Salah”, “Baik dan Buruk” secara bersamaan, namun besar nilainya tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya. Logika *fuzzy* dapat diterapkan untuk memecahkan masalah seperti sistem diagnosa penyakit, prediksi adanya gempa bumi dan longsor, klasifikasi dan pencocokan pola. Dapat diimplementasikan pada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, embedded system, jaringan PC, multi-channel atau workstation berbasis akuisisi data, dan sistem kontrol [33].

Sistem *fuzzy* merupakan penduga numerik yang terstruktur dan dinamis. Sistem ini mempunyai kemampuan untuk mengembangkan sistem intelijen dalam lingkungan yang tak pasti. Sistem ini suatu fungsi dengan logika fuzzy. Dalam logika *fuzzy* terdapat beberapa proses yaitu penentuan himpunan fuzzy, penerapan aturan IF-THEN dan proses inferensi *fuzzy* [35].

Ada beberapa metode untuk merepresentasikan hasil logika *fuzzy* yaitu metode Tsukamoto, Sugeno dan Mamdani. Pada metode Tsukamoto, setiap konsekuensi direpresentasikan dengan himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan monoton. Output hasil inferensi masing-masing aturan adalah z ,

berupa himpunan 26 biasa (crisp) yang ditetapkan berdasarkan -predikatnya. Hasil akhir diperoleh dengan menggunakan rata-rata terbobotnya [36].

Pada *fuzzy* sistem data sensor diukur secara nilai fisik dapat dikategorikan secara linguistik seperti sangat rendah, rendah, medium, tinggi, sangat tinggi. Fungsi dari member ship *fuzzy* logic dari sensor digunakan untuk menghitung derajat keanggotaan pada *fuzzy*. Setiap linguistik aturan diasosiasikan dengan sebuah *fuzzy* set yang secara spesifik mendefinisikan fungsi keanggotaannya. Definisi matematikanya dari fungsi keanggotaan A anggota himpunan U ditulis seperti pada Gambar 2.4. [37].



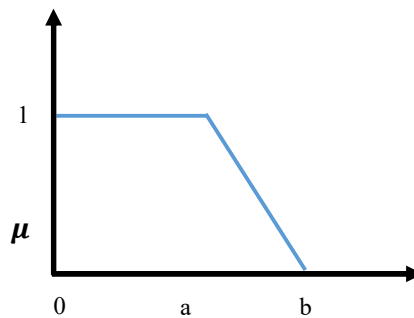
Gambar 2.4. Fungsi keanggotaan Fuzzy [37]

$$\mu_{XU} \rightarrow [0, 1]$$

(2.36)

Fungsi keanggotaan dari *Fuzzy* dari pembacaan sensor dapat didefinisikan dengan persamaan (2.37.) [37].

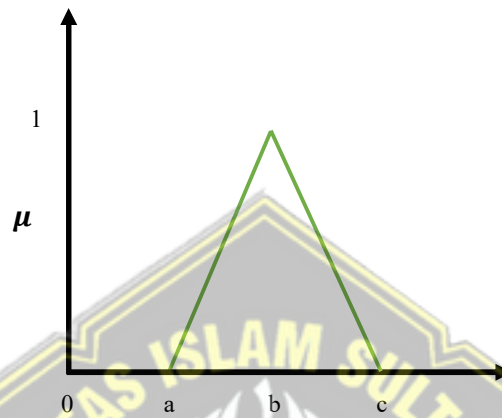
Fungsi Linear Turun



Gambar 2.5. Fungsi Linear Turun [37]

$$\mu[x] = \begin{cases} 1; & \text{jika } 0 \leq x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}; & \text{jika } a \leq x \leq b \\ 0; & \text{jika } x \geq b \end{cases} \quad (2.37)$$

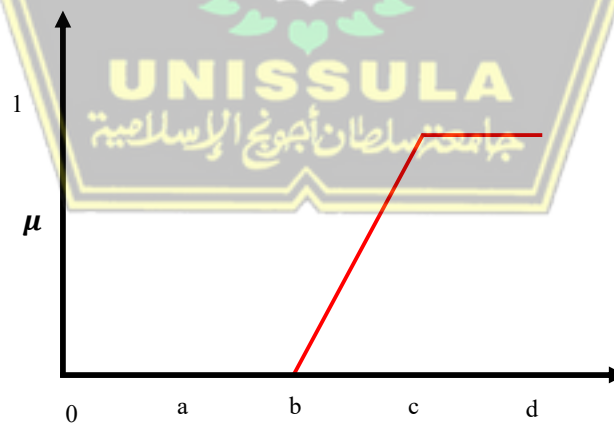
Fungsi Segitiga



Gambar 2.6. Fungsi Segitiga [37]

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & \text{jika } x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}; & \text{jika } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & \text{jika } b < x < c \end{cases} \quad (2.38)$$

Fungsi Linear naik



Gambar 2.7. Fungsi Linear Naik [37]

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & \text{jika } x \leq b \\ \frac{x-b}{b-a}; & \text{jika } b < x \leq c \\ 1; & \text{jika } x \geq c \end{cases} \quad (2.39)$$

Proses fuzzifikasi, yaitu proses perubahan masukan variabel fuzzy menjadi peubah *fuzzy* yang disajikan dalam bentuk himpunan–himpunan *fuzzy* dengan suatu fungsi keanggotaannya masing-masing. Sedangkan proses defuzzifikasi, yaitu mengubah besaran *fuzzy* yang disajikan dalam bentuk himpunan *fuzzy* keluaran dengan fungsi keanggotaannya untuk mendapatkan kembali bentuk tegasnya [37].

2.6. Menghitung Kebutuhan Kapasitor Bank pada Instalasi Listrik 3 Phase

Pada Instalasi listrik 3 phase, memiliki 3 macam daya, yaitu daya semu, daya aktif dan daya reaktif. untuk mendapatkan daya aktif semaksimal mungkin, tentunya kita harus memperbaiki faktor daya atau daya reaktif pada instalasi tersebut [38].

Berbagai alat listrik yang memiliki daya harmonik seperti Elektro motor, inverter, travo las, almpu mercury dan lainnya akan memberikan dampak terhadap tingginya kerugian-kerugian daya pada instalasi listrik [38].

Faktor daya yang paling baik adalah 1,00. sehingga bisa di dapat daya aktif yang mendekati atau sama dengan daya semu. factor daya dengan nilai 1,00 artinya Nilai daya semu sama dengan nilai daya aktif atau tidak terdapat kerugian-kerugian daya [38].

Namun untuk mencapai Faktor daya dnegan nlai 1,00 adalah suatu hal yang terbilang tidak bisa tercapai, maka biasanya Faktor daya yang paling baik ditetapkan sebesar antara 0,85 sampai 0,95 [38].

Untuk dapat menentukan besaran daya Kapasitor bank yang akan kita gunakan, terlebih dahulu kita harus mengenal 3 macam daya pada instalasi listrik 3 Phase, yaitu [38]:

1. Daya Semu

Daya yang tertulis pada suatu pembangkit listrik. Daya semu dihasilkan dari hasil teori perhitungan dengan satuan Volt Ampere (VA) [38]

2. Daya Aktif

Daya yang dihasilkan dari hasil perhitungan daya Semu dikalikan dengan Factor daya, daya aktif memiliki satuan Watt (W) [38].

3. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang terpakai sebagai energi pembangkitan flux magnetik sehingga timbul magnetisasi dan daya ini dikembalikan ke system karena efek induksi elektromagnetik itu sendiri, sehingga daya ini sebenarnya merupakan beban (kebutuhan) pada suatu sistem tenaga listrik. Daya Reaktif memiliki satuan Volt Ampere Reaktif (VAR) [38].

Untuk menghitung nilai kapasitor bank, dapat dihitung dengan persamaan (2.40) [38].

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (2.40)$$

Q_c = Daya Reaktif Kapasitor Bank yang Dibutuhkan

Q_1 = Daya Reaktif sebelum perbaikan

Q_2 = Daya Reaktif yang ingin dicapai

Untuk menghitung Daya reaktif (Q_c) dapat dihitung dengan persamaan (2.41) [38].

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.41).$$

Q = Daya Reaktif

S = Daya Terpasang atau daya semu (KVA)

P = Daya Aktif (KW)

$$P = S \cos \phi$$

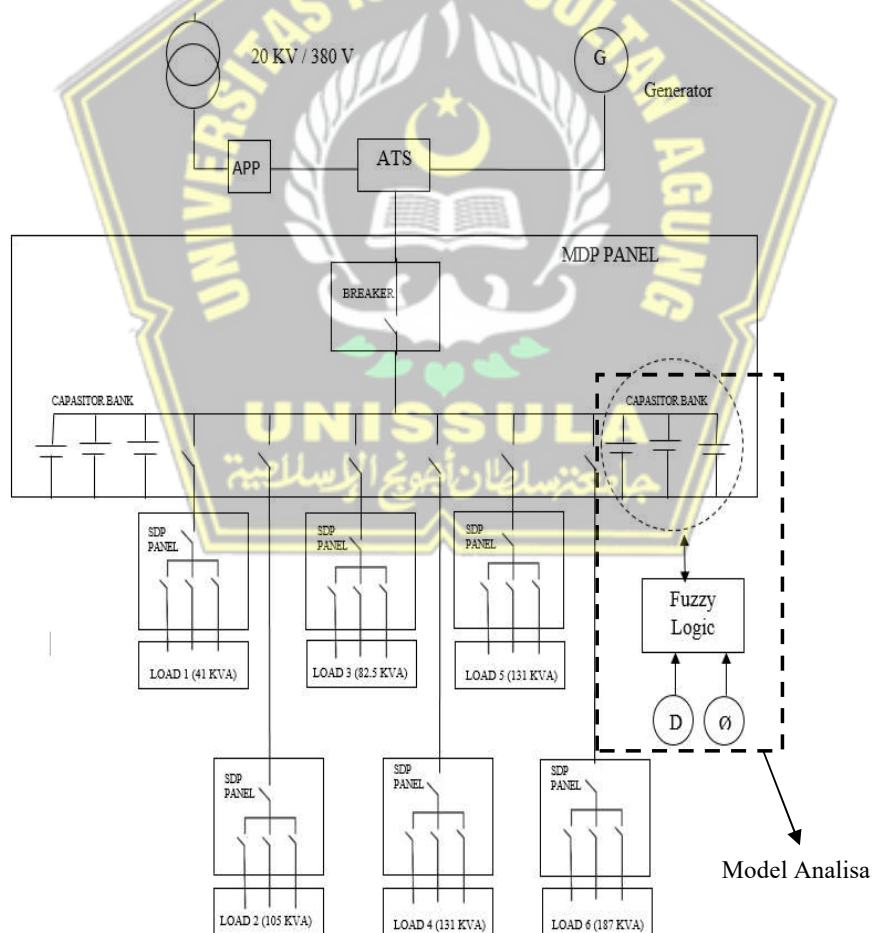
$$S = V \times I$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Model penelitian disusun untuk memberikan panduan secara sistematis dalam melakukan penelitian, susunan metode penelitian ini berdasarkan tujuan secara umum penelitian, yakni mendapatkan alternatif proses penelitian, dari tujuan secara umum kemudian dirancang menjadi ide penelitian, studi literature, pengumpulan data, menganalisa, dan menentukan besarnya kapasitas daya listrik terpasang pada gedung multi building, serta menentukan kapasitas generator set, dan jenis penghantar, model penelitian dapat disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Model Penelitian

Data karakteristik beban dan jaringan sebagai model penelitian pada Gambar 3.1. dapat di lihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. *Karakteristik Beban Jaringan*

beban	Nama gedung dan besarnya langganan	Beban (kVA)	Panjang kabel internal (meter)
1	Mini Teaching + Percetakan	41,5	35
2	Pumanisa	105	45
3	Akbid	82,5	70
4	Fakultas Teknologi dan Industri	131	65
5	Fakultas Kedokteran Gedung B&C	164	135
6	Fakultas Kedokteran Gedung A	187	200
Total Beban = 711 kVa		711	

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Universitas Islam Sultan Agung yang akan dimulai pada bulan Februari hingga April 2015.

3.2.2 Peralatan Penelitian

- Ampere Meter
- Volt Meter
- Meter manual
- Komputer (Matlab + toolbox simulink PSAT)

3.2.3 Perancangan Sistem

Perencanaan sistem penelitian yaitu mensimulasikan Daya listrik terpasang pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) dan generator set dengan matlab, gedung UNISSULA, yang sudah di ukur besarnya beban masing masing Gedung serta jarak antar gedung. Percobaannya adalah dengan mensimulasikan kapasitas dan jumlah generator set. serta menentukan jenis penghantar.

3.3 Tahap Pelaksanaan Penelitian

Untuk melakukan penelitian ini peneliti harus melakukan beberapa tahapan yaitu:

1. Mengumpulkan data beban masing masing gedung.
2. Mengumpulkan data jarak antar panel ke gedung
3. Mensimulasikan dengan simuling PSAT untuk menentukan daya listrik terpasang, serta kapasitas dan jumlah generator set yang harus disediakan agar mendapatkan hasil yang optimal.
4. mensimulasikan nilai kapasitor bank, sesuai perubahan daya dengan metode fuzzy logic

3.4 Analisa Kebutuhan Sistem

Analisa kebutuhan sistem merupakan tahap kegiatan untuk mengetahui kebutuhan pembangunan sistem terintegrasi, tujuan dari tahapan analisa kebutuhan ini adalah menentukan suatu kebutuhan proses dalam membangun jaringan distribusi tenaga listrik yang terkoneksi optimal, handal serta efisien dalam pendistribusian energi listrik ke seluruh gedung di UNISSULA.

Alasan utama yang harus dikembangkan dalam tahapan ini adalah di gedung Unissulla yang cukup banyak membuat aliran daya berbeda yaitu pada hambatan jenis kabel penghantar serta jarak,. Sehingga peneliti mencoba mencari solusi yaitu, jumlah generator set beserta dayanya optimal serta perbaikan factor daya..

3.5 Studi Pustaka

Studi pustaka dilakukan untuk mencari informasi - informasi tentang teori, metode dan konsep yang relevan dengan permasalahan. Sehingga dengan informasi – informasi tersebut dapat digunakan sebagai acuan dalam penyelesaian masalah. Studi pustaka yang dilakukan dengan mencari informasi dan referensi dalam bentuk *text book*, literatur, informasi dari internet maupun sumber-sumber lainnya yang berkaitan dengan penelitian ini.

3.6 Metode Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam rangka mencapai tujuan penelitian. Tujuan yang diungkapkan dalam bentuk hipotesis merupakan jawaban sementara terhadap pertanyaan penelitian. metode pengumpulan data bisa dilakukan dengan cara:

1. Wawancara

Merupakan cara untuk mendapatkan data dan informasi dengan mengadakan dialog langsung dengan Teknisi yang mengelola masing masing gedung tersebut.

2. Pembuatan Simulink PSAT dan Pengujian

Adapun dalam pembuatan Simulink, peneliti melakukan kegiatan dengan berorientasi pada data yang meliputi : perencanaan, analisis, desain, pembuatan Simulink, pengujian dan Simulasi di berbagai gedung.

3.7 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian maka tahapan penelitian yang dilakukan

Secara umum penelitian ini terdiri dari dua prosedur utama yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan model penelitian, yaitu membuat single line diagram dari panel MDP dan SDP dari 6 gedung sisi timur kampus UNISSULA.
2. Menggambar pada matlab Simulink PSAT.
3. Memasukkan data beban dari masing masing gedung di sisi timur kampus UNISSULA.
4. Menentukan besarnya MCCB masing masing gedung.
5. Menentukan daya terpasang pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) listrik PLN.
6. Menentukan jumlah dan kapasitas genset.
7. Menentukan jenis kabel.
8. menentukan nilai kapasitor bank berdasarkan perubahan beban
9. Pembuatan laporan.

3.8 Flowchart Langkah Penelitian



Gambar 3.2. Alur Kegiatan Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil penelitian

Merujuk pada model penelitian pada Gambar 3.1. dan data beban pada Tabel 3.1. maka untuk menentukan besarnya MCCB terpasang dan sesuai perhitungan rumus 2.5, maka dapat dihitung:

Gedung 1 $I = \frac{41,5 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{41.500 \text{ VA}}{1,73 \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{41.500 \text{ VA}}{657,4}$ $I = 63,1 \text{ A} \cdot 3 \text{ Phase}$	Gedung 3 $I = \frac{82,5 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{82.500 \text{ VA}}{1,73 \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{82.500 \text{ VA}}{657,4}$ $I = 125,5 \text{ A} \cdot 3 \text{ Phase}$	Gedung 5 $I = \frac{164 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{164.000 \text{ VA}}{1,73 \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{164.000 \text{ VA}}{657,4}$ $I = 249 \text{ A} \cdot 3 \text{ Phase}$
Gedung 2 $I = \frac{105 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{105.000 \text{ VA}}{1,73 \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{105.000 \text{ VA}}{657,4}$ $I = 159,7 \text{ A} \cdot 3 \text{ Phase}$	Gedung 4 $I = \frac{131 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{131.000 \text{ VA}}{1,73 \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{131.000 \text{ VA}}{657,4}$ $I = 199 \text{ A} \cdot 3 \text{ Phase}$	Gedung 6 $I = \frac{187 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{187.000 \text{ VA}}{1,73 \times 380 \text{ V}}$ $I = \frac{187.000 \text{ VA}}{657,4}$ $I = 284 \text{ A} \cdot 3 \text{ Phase}$

Sesuai perhitungan pada gedung 1 maka didapat 63,1 Ampere sementara di MCCB pasaran tidak ada MCCB dengan nilai 63,1 sehingga di pasang dengan nilai diatas nya yang paling mendekati adalah 100A. Beban gedung 2 adalah 159,7 sehingga dipasang nilai diatas nya yang paling mendekati adalah 200A, Gedung 3 dengan perhitungan 125,5 Ampere, maka akan dipasang MCCB sesuai yang ada di pasaran adalah 150A. beban gedung 4 dengan perhitungan 199A maka akan dipasang MCCB sesuai nilai yang ada di pasar adalah 200A. beban gedung 5 dengan perhitungan 249 A maka akan dipasang MCCB sesuai nilai yang ada di pasar adalah 250 A. Beban gedung 6 dengan perhitungan 284A maka akan dipasang MCCB sesuai nilai dipasaran adalah 300A. data masing masing Gedung dapat disajikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data MCCB Terpasang pada SDP Masing-masing Gedung.

No	Nama gedung dan besarnya langganan	Beban (KVA)	Arus (Ampere meter)	Panjang kabel internal (meter)	MCCB terpasang Berdasarkan Datasheet
1	Mini Teaching + Percetakan	41,5	63,1	35	100 A
2	Pumanisa	105	159,7	45	200 A
3	Akbid	82,5	125,5	70	150 A
4	Fakultas Teknologi dan Industri	131	199	65	200 A
5	Fakultas Kedokteran Gedung B&C	164	249	135	250 A
6	Fakultas Kedokteran Gedung A	187	284	200	300 A
Total Beban = 721 kVa		711	1080,3		

4.1.1 Jenis Kabel Dan Luas Penampang

Merujuk dari data Tabel 3.1 maka dapat di tentukan jenis kabel NYY sesuai dengan Tabel data shet kabel pada Tabel 2.1. maka dapat di simpulkan pada grafik Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Diameter Kabel Berdaraskan Datasheet Kabel NYY

No	Nama gedung dan besarnya langganan	Beban (KVA)	Arus (Ampere meter)	Panjang kabel internal (meter)	Diameter Berdasarkan Datasheet
1	Mini Teaching + Percetakan	41,5	63,1	35	16 mm
2	Pumanisa	105	159,7	45	70 mm
3	Akbid	82,5	125,5	70	50 mm
4	Fakultas Teknologi dan Industri	131	199	65	70 mm
5	Fakultas Kedokteran Gedung B&C	164	249	135	95 mm
6	Fakultas Kedokteran Gedung A	187	284	200	150 mm
Total Beban = 721 kVa		711	1080,3		

Pada Gedung mini teaching dan percetakan arus sebesar 63,1 Ampere dengan MCCB 100 Ampere maka diameter kabel adalah NYY dengan ukuran 4 X 16 mm , karena di data sheet in air 63 tidak ada, yang ada 60 A dan diatas nya adalah 80A, agar luas penampang memadai dalam system transfer tegangan maka besar nya penampang harus lebih besar di banding dengan arus yang digunakan. maka dipakai data sheet yang 80 A. Gedung pumanisa dengan arus 159,7 dan MCCB 200 A maka luas penampang sesuai data sheet, adalah pada in air 200A yaitu 4 X 70mm. Gedung Akbid dengan arus 125,5 A dengan MCCB terpasang 150 A maka kabel yang di pakai adalah di in air 160A yaitu 4 X 50mm. Gedung Fakultas Teknologi dan Industri dengan arus 199 A dan MCCB terpasang 200 A maka kabel yang dipakai adalah in air 200A yaitu 4 X 70mm. Gedung fakultas kedokteran B dan C dengan arus 249A dengan mccb terpasang 250 A maka menggunakan kabel in air 245A yaitu kabel NYY 4 X 95 mm. Gedung Fakultas Kedokteran Gedung A dengan arus 284A dengan MCCB terpasang 300 A maka kabel yang di pakai adalah in air 315 yaitu 4 X 150 mm.

4.1.2. Perhitungan Daya

Merujuk pada model penelitian pada Gambar 3.1. dan data beban pada Tabel 3.1 maka, untuk menentukan daya listrik terpasang pada Alat pengukur dan Pembatas (APP) arus pada panel MDP enam (6) Gedung sisi timur kampus UNISSULA dapat dihitung dengan rumus sesuai persamaan (2.5) yaitu:

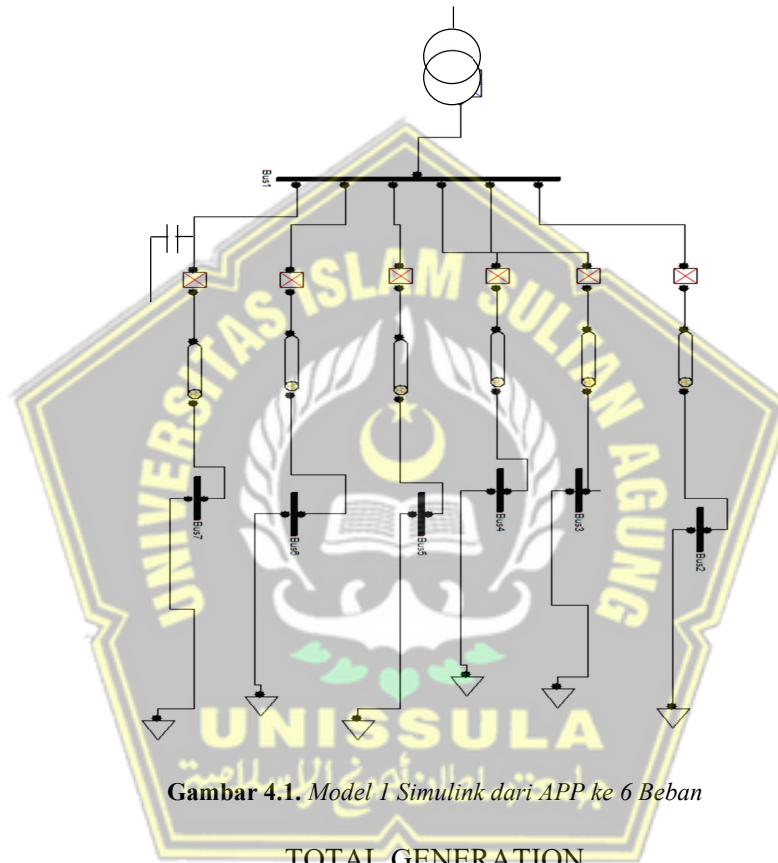
$$P = 380 \text{ Volt} \times 1.870,2 \text{ Ampere} \times 0,85 \times 1,73 = 1.045.049.058 \text{ VA}$$

$$\text{atau} = 1,04 \text{ MVA},$$

Jadi untuk memasang daya listrik di APP ke 6 gedung sisi timur kampus UNISSULA adalah 1 MVA.

4.1.3. Pemodelan Simulink

Untuk menentukan besarnya daya terpasang pada Alat pengukur dan Pembatas (APP) pada Panel MDP 6 gedung sisi timur kampus UNISSULA yang di gambarkan pada single line diagram Gambar 3.1., maka dapat di simulasikan pada sofwere Simulink seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Model 1 Simulink dari APP ke 6 Beban

TOTAL GENERATION

REAL POWER [MW]	1.0015
REACTIVE POWER [MVar]	0.72304

TOTAL LOAD

REAL POWER [MW]	1.0014
REACTIVE POWER [MVar]	0.73889

TOTAL LOSSES

REAL POWER [MW]	0.00014
REACTIVE POWER [MVar]	-0.01585

Berdasarkan hasil simulasi matlab Simulink psat, diperoleh bahwa daya listrik terpasang yang harus disediakan, dengan efektifitas pembangkit 85 % adalah sebesar 1,001 MVA, dan untuk penelitian berikutnya akan di sediakan daya 1 MVA.

4.2. Pembahasan Jaringan dan Simulasi Generator

4.2.1. Karakteristik Beban Jaringan

Pada hasil penelitian tesis ini menggunakan simulasi dengan penempatan generator untuk mensuplai seluruh gedung di UNISSULA dengan dihitung rugi - rugi tegangan dari jenis penghantar, biaya investasi dan operasionalnya. Simulasi kedua yaitu masing masing gedung UNISSULA dengan dihitung rugi-rugi tegangan dari jenis penghantar, biaya investasi dan operasionalnya. Selain itu simulasi juga dilakukan dengan menempatkan masing-masing satu buah generator untuk masing-masing gedung dan juga dengan kombinasi menggunakan satu generator untuk mensuplai beberapa gedung. Selanjutnya untuk beberapa simulasi tersebut akan dipilih rangkaian penempatan generator yang memiliki daya hilang yang paling rendah. Adapun data beban terdapat pada Tabel 3.1.

Berdasarkan data yang akan disimulasikan tersebut maka jumlah beban total adalah sebesar 711 kVA yang berasal dari 6 gedung yang berbeda. Data mengenai panjang kabel adalah merupakan panjang kabel instalasi yang ada di dalam gedung. Dengan demikian apabila setiap gedung yang akan dipasang generator maka masing-masing akan ditambah dengan kabel sepanjang 10 meter.

4.2.2. Transmission Line / Kabel Transmisi (TL)

Masing-masing gedung memiliki panjang kabel distribusi yang berbeda sehingga masing-masing memiliki resistansi yang berbeda. Diasumsikan kabel yang digunakan memiliki luas penampang 70 mm^2 . Kabel yang digunakan dalam hal ini adalah jenis kabel aluminium. Dengan menggunakan jenis kabel yang sama untuk seluruh instalasi maka diperoleh nilai Resistensi dan Reaktansi dari transmission line tersebut.

Resistansi $R = 0,497 \text{ Ohm/Km}$ Reaktansi $X = 0,103 \text{ Ohm /Km}$

Selanjutnya penelitian ini akan menguji sistem distribusi dan memvalidasi model dan metode yang dijelaskan dalam penelitian ini. Beberapa model akan disimulasikan dengan variasi penggunaan jumlah bus yang berbeda sesuai dengan bentuk jaringan yang akan disimulasikan. Berikut ini adalah beberapa model jaringan yang akan dianalisis.

4.2.3. Generator

Generator yang digunakan dalam simulasi penelitian ini adalah merek Perkins. Generator merek Perkins sendiri menyediakan berbagai varian daya yang dapat digenerasi. Spesifikasi dari generator Perkins adalah seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. *Spesifikasi Generator*

No	kVA	Frek (Hz)	Voltase	Power Factor	Konsumsi bahan bakar maks (lt / jam)	Harga Generator
1	45	50	230/400	0.8	12.9	222,075,000
2	60	50	230/400	0.8	13.9	241,650,000
3	80	50	230/400	0.8	14.8	274,050,000
4	100	50	230/400	0.8	22.6	367,975,000
5	135	50	230/400	0.8	32.4	475,925,000
6	150	50	230/400	0.8	38.2	510,400,000
7	200	50	230/400	0.8	45.8	615,125,000
8	250	50	230/400	0.8	56.0	721,000,000
9	350	50	230/400	0.8	76.0	853,250,000
10	400	50	230/400	0.8	85.0	886,950,000
11	500	50	230/400	0.8	106.0	1,055,800,000
12	600	50	230/400	0.8	129.0	1,260,450,000
13	725	50	230/400	0.8	155.0	1,726,312,500
14	1100	50	230/400	0.8	172.0	2,039,850,000
15	1300	50	230/400	0.8	226.0	2,193,500,000

Hasil pengolahan SPSS dengan menggunakan data pada Tabel 4.2. diperoleh hasil seperti pada Tabel 4.3.

Selanjutnya dengan menggunakan data dari pabrikasi untuk generator merek Perkins tersebut, dengan menggunakan software SPSS diperoleh model persamaan

hubungan daya yang digenerasi dengan kebutuhan bahan bakar, dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Hubungan Daya dengan Biaya

Model		Unstandardized Coefficients B	Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	2.490	1.455		1.712	.115
	P	209.717	9.873	.994	21.241	.000
	P2	1.367	11.991	.005	.114	.911

a. Dependent Variable: C

Merujuk dari persamaan (2.23)

$$C_i = 2,490 + 209,717 P_{gi} + 1,367 P_{gi}^2$$

Pafremeter α , β dan γ dalam persamaan tersebut selanjutnya digunakan untuk pengujian Optimal over Flow (OPF)

4.2.4. Beban Statis Jaringan

Beban statis ditentukan berdasarkan beban maksimal yang ada pada masing-masing gedung sebagaimana yang ditentukan sebelumnya seperti pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Beban Statis

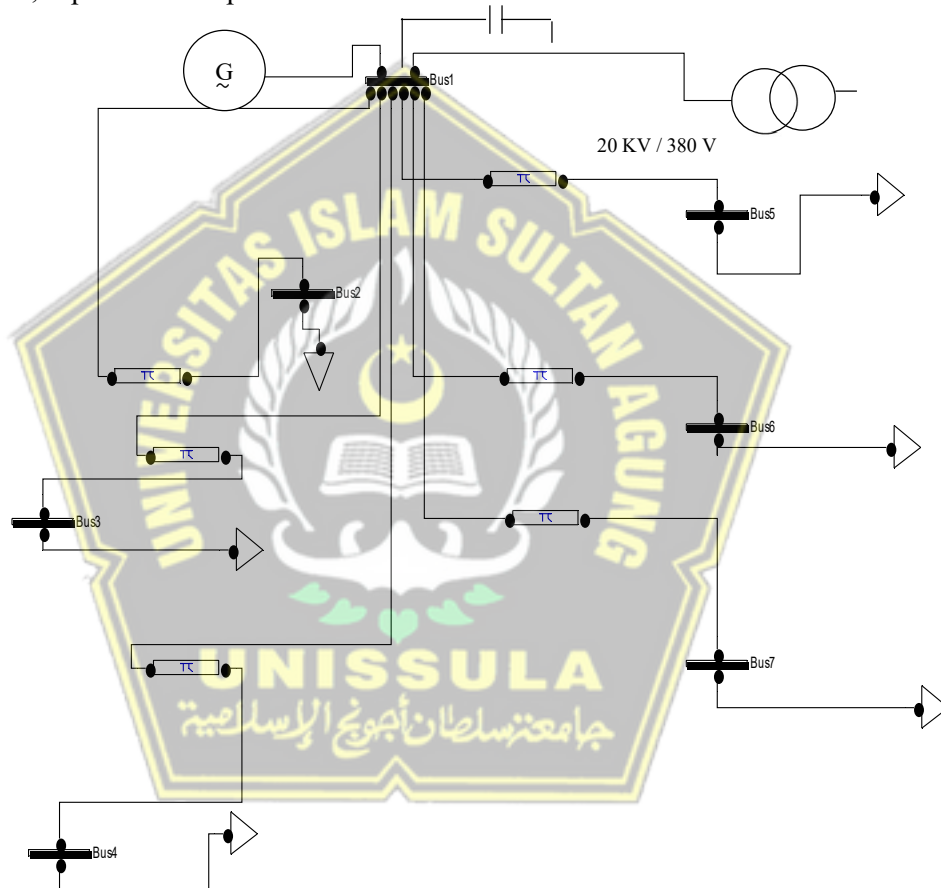
No.	Nama gedung dan besarnya langganan	Beban (kVA)
1	Mini Teaching + Percetakan	41,5
2	Pumanisa	105
3	Akbid	82,5
4	Fakultas Teknologi dan Industri	131
5	Fakultas Kedokteran Gedung B&C	164
6	Fakultas Kedokteran Gedung A	187
Total Beban = 711 kVa		711

Dari parameter-parameter generator, kabel dan beban tersebut selanjutnya akan disimulasikan pemodelan beberapa penggunaan Generator untuk memenuhi kebutuhan daya dari keenam gedung tersebut.

4.3. Hasil Pemodelan Generator

4.3.1. Model Jaringan dengan 1 Generator

Model jaringan ini disusun dengan hanya menggunakan 1 buah generator Perkins 1,3 MVA yang didistribusikan ke 6 gedung. Dengan bus 1 adalah sumber tenaga utama yaitu listrik dengan tegangan 380 V sedangkan 6 bus lainnya merepresentasikan 6 buah gedung yang ada dengan penggunaan beban daya yang berbeda, seperti terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Model 1 Generator

Masing-masing gedung memiliki beban daya dan panjang kabel instalasi yang menentukan beban daya nyata serta resistansi dan reaktansi dari masing-masing. Panjang kabel instalasi ditambah dengan 10 meter untuk penyambungan ke generator, seperti pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. *Penjelasan Instalasi Model 1*

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	Keterangan
K1	1 – 2	Mini Teaching + Percetakan
K2	1 – 3	Pumanisa
K3	1 – 4	Akbid
K4	1 – 5	Fakultas Teknologi dan Industri
K5	1 – 6	Fakultas Kedokteran Gedung B&C
K6	1 – 7	Fakultas Kedokteran Gedung A

Simulasi dilakukan menggunakan Matlab – Simulink R2009a dengan menggunakan PSAT (Power System Analytical Tool). Selanjutnya model sistem juga akan menguji dengan simulasi perubahan tegangan dan daya yang akan hilang dalam sistem tersebut. Hasil simulasi dengan menggunakan Simulink dan PSAT diperoleh sebagai berikut :

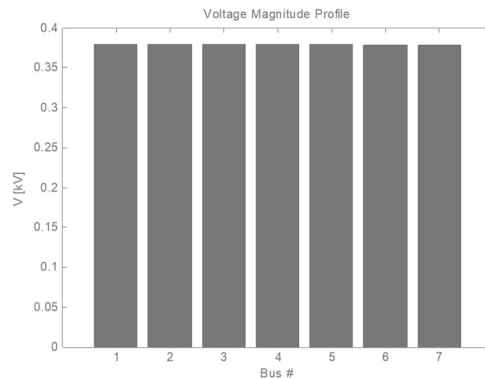
1. Analisis Power Flow

Analisis power flow berdasarkan pada besarnya aliran daya listrik yang terjadi pada rangkaian untuk mendapatkan perubahan tegangan pada setiap bus dan selanjutnya mengetahui daya yang digenerasi, beban dan daya yang hilang dari model. Dengan menggunakan Simulink PSAT diperoleh hasil pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. *Tegangan Masuk dan Keluar Kabel*

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	V masuk (Volt)	V keluar (Volt)
K1	1 – 2	380	379,91
K2	1 – 3	379,91	379,70
K2	1 – 4	379,70	379,67
K4	1 – 5	379,67	379,49
K5	1 – 6	379,49	378,87
K6	1 – 7	378,87	378,80

Karena perhitungan tegangan dalam jaringan harus memenuhi keseimbangan untuk setiap bus dan jalur maka perhitungan manual akan menjadi sulit sehingga penyajian hasil adalah hasil dari simulasi dengan MATLAB (PSAT). Profil tegangan pada masing-masing bus disajikan pada gambar 4.3 :



Gambar 4.3. *Profil Tegangan pada Tiap Bus pada Model 1*

Dari profil tegangan pada masing-masing bus tersebut selanjutnya dapat diperoleh total generasi daya, total beban dan total daya yang hilang dalam sistem 1 generator dengan kapasitas 1,3 KVA dengan beban 711 KVA daya yang hilang adalah 50 Watt.

2. Analisis Optimal Power Flow

Analisis optimal power flow berdasarkan pada simulasi untuk mendapatkan aliran daya listrik yang optimal yang terjadi pada rangkaian untuk mendapatkan perubahan tegangan pada setiap bus dan selanjutnya mengetahui daya yang hilang serta digenerasi, beban dan daya yang hilang dari model.

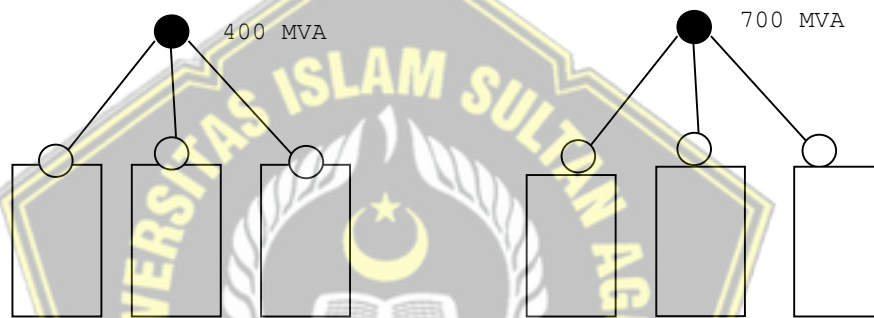
Analisis simulasi dilakukan karena daya generator adalah sebesar 1,3 MVA tidak sepenuhnya digunakan untuk generasi daya, untuk memenuhi kebutuhan daya sebesar 711 kVA. Dengan menggunakan Simulink PSAT diperoleh hasil bahwa fungsi optimum yang dihasilkan dari simulasi dengan menggunakan 1 generator dengan 7 bus dengan 6 beban diperoleh perubahan tegangan.

Objective Function [\$/h]:	86.6399
Active Limits:	3
Number of Iterations:	9
Barrier Parameter:	0
Variable Mismatch:	0.00047
Power Flow Equation Mismatch	0
Objective Function Mismatch:	0

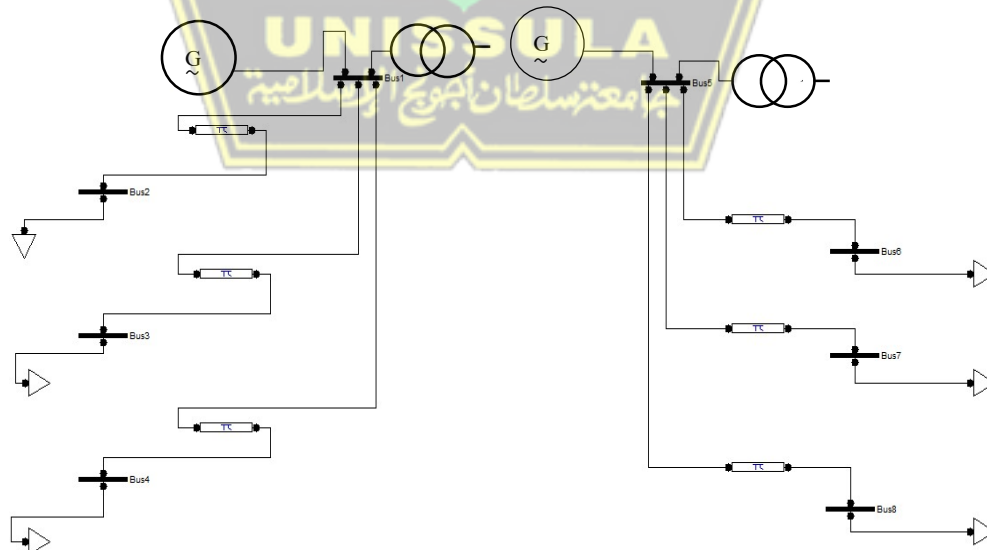
Dengan demikian penggunaan bahan bakar maksimal sebagaimana spesifikasi dari penggunaan 1 generator Perkins 1300 kVA adalah sebesar 86.6399 liter / jam.

4.3.2. Model Jaringan dengan 2 Generator

Model jaringan kedua ini disusun dengan menggunakan 2 buah generator masing-masing 400 KVA dan 700 KVA yang didistribusikan ke 6 gedung. Model 2 dilakukan dengan mendistribusikan bahwa masing-masing genrator mensuplai 3 gedung. Bus 1 dan bus 2 adalah sumber tenaga utama yaitu listrik dengan tegangan 380 V sedangkan 6 bus lainnya merepresentasikan 6 buah gedung yang ada dengan penggunaan beban daya yang berbeda. Pada model ini generator diletakkan pada jarak yang sama untuk masing-masing gedung yaitu dengan menarik kabel tambahan masing-masing sepanjang 10 meter ke arah letak generator.



Selanjutnya model simulasi tersebut dikonversi ke dalam model Simulink PSAT sebagai berikut :



Gambar 4.4. Model 2 Generator

Masing-masing gedung memiliki beban daya dan panjang kabel instalasi yang menentukan beban daya nyata serta resistansi dan reaktansi dari masing-masing.

Tabel 4.8. *Penjelasan Instalasi Model 2*

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	Keterangan
K1	1 – 2	Mini Teaching + Percetakan
K2	1 – 3	Pumanisa
K2	1 – 4	Akbid
K4	5 – 6	Fakultas Teknologi dan Industri
K5	5 – 7	Fakultas Kedokteran Gedung B&C
K6	5 – 8	Fakultas Kedokteran Gedung A

Sebagaimana disesuaikan dengan kebutuhan beban maka untuk line K1 hingga K3 memiliki beban sebesar 229 kVA sehingga akan digunakan generator 400 kVA dan untuk line K4 hingga K6 memiliki beban sebesar 482 kVA sehingga akan menggunakan Generator Perkin 700 kVA. Selanjutnya model sistem juga akan menguji dengan mensimulasikan perubahan tegangan dan daya yang akan hilang dalam sistem tersebut.

a. Power Flow

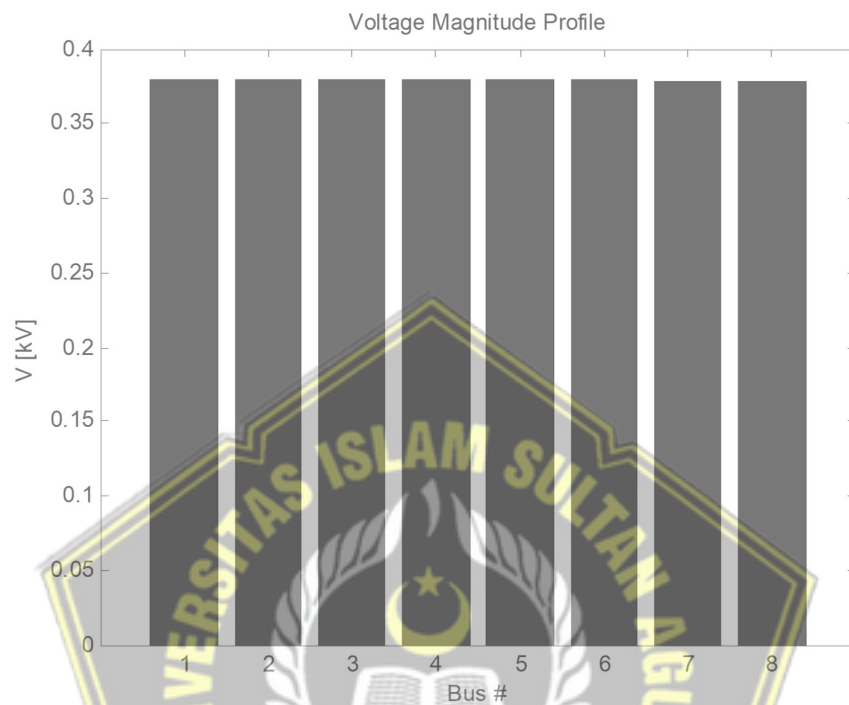
Simulasi dilakukan menggunakan Matlab – Simulink R2009a dengan menggunakan PSAT (Power System Analytical Tool).

Tabel 4.9. *Tegangan Masuk dan Keluar Kabel*

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	V masuk (Volt)	V keluar (Volt)
K1	1 – 2	380	379,91
K2	1 – 3	379,91	379,70
K2	1 – 4	379,70	379,67
K4	5 – 6	380	379,49
K5	5 – 7	379,49	378,87
K6	5 – 8	378,87	378,80

Karena perhitungan tegangan dalam jaringan harus memenuhi keseimbangan untuk setiap bus dan jalur maka perhitungan manual akan menjadi sulit sehingga

penyajian hasil adalah hasil dari simulasi dengan MATLAB (PSAT). Profil tegangan pada masing-masing bus disajikan pada gambar 4.5 :



Gambar 4.5. *Profil Tegangan pada Tiap Bus pada Model 2 Generator*

Dari profil tegangan pada masing-masing bus tersebut selanjutnya dapat diperoleh total generasi daya, total beban dan total daya yang hilang dalam sistem 2 generator dengan kapasitas 400 KVA dan 700 KVA, beban 711 KVA adalah 50 Watt.

b. Optimal Power Flow

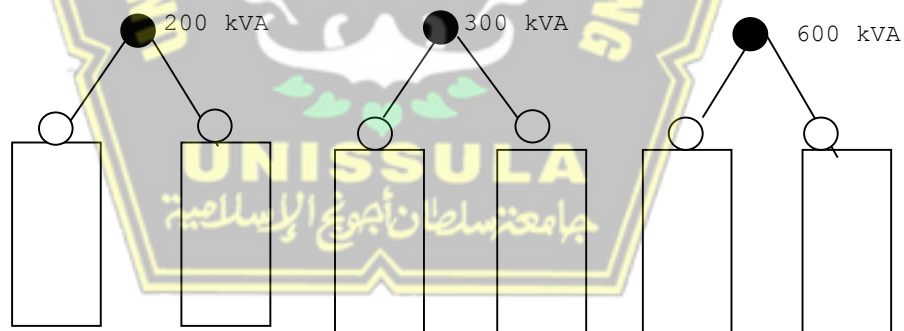
Hasil analisis optimal power flow dengan menggunakan Simulink PSAT diperoleh hasil bahwa fungsi optimum yang dihasilkan dari simulasi dengan menggunakan 2 generator diperoleh biaya bahan bakar optimal adalah sebagai berikut

Objective Function [\$/h]:	93.0589
Active Limits:	3
Number of Iterations:	17
Barrier Parameter:	0
Variable Mismatch:	0.00326
Power Flow Equation Mismatch	0
Objective Function Mismatch:	0

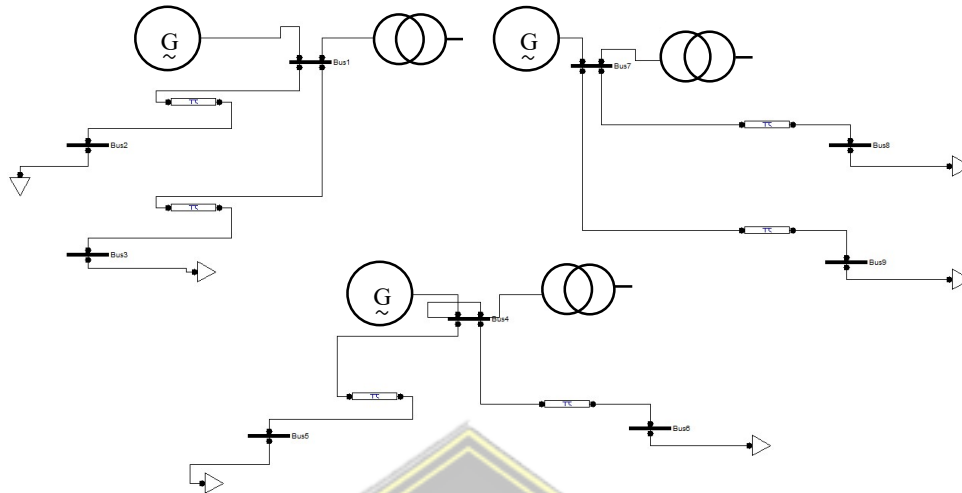
Dengan demikian penggunaan bahan bakar maksimal sebagaimana spesifikasi dari penggunaan 2 generator Perkins 400 kVA dan 700 kVA adalah sebesar 93.0589 liter / jam.

4.3.3 Model Jaringan dengan 3 Generator

Model 3 ini disusun dengan menggunakan 3 buah generator masing-masing 200 kVA, 300 kVA dan 600 kVA yang didistribusikan ke 6 gedung yang masing-masing generator mensuplai 2 gedung. Bus 1, bus 2 dan bus 3 adalah sumber tenaga utama yaitu listrik dengan tegangan 380 V sedangkan 6 bus lainnya merepresentasikan 6 buah gedung yang ada dengan penggunaan beban daya yang berbeda.



Selanjutnya model simulasi tersebut dikonversi ke dalam model Simulink PSAT seperti terlihat pada gambar 4.6 :



Gambar 4.6. Model 3 Generator

Masing-masing gedung memiliki beban daya dan panjang kabel instalasi yang menentukan beban daya nyata serta resistansi dan reaktansi dari masing-masing.

Tabel 4.10. Penjelasan Instalasi 3 Generator Model

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	Keterangan
K1	1 – 3	Mini Teaching + Percetakan
K2	1 – 4	Pumanisa
K2	2 – 5	Akbid
K4	2 – 6	Fakultas Kedokteran Gedung B&C
K5	3 – 7	Fakultas Teknologi dan Industri
K6	3 – 8	Fakultas Kedokteran Gedung A

Sebagaimana disesuaikan dengan kebutuhan beban maka untuk line K1 hingga K2 memiliki beban sebesar 146,5 kVA sehingga akan digunakan generator 150 kVA dan untuk line K3 hingga K6 memiliki beban sebesar 564,5 kVA sehingga akan menggunakan Generator Perkin 600 kVA. Selanjutnya model ini juga akan menguji dengan simulasi perubahan tegangan dan daya yang akan hilang dalam sistem tersebut.

a. Power Flow

Simulasi dilakukan menggunakan Matlab – Simulink R2009a dengan menggunakan PSAT (Power System Analytical Tool).

Tabel 4.11. Tegangan keluar kabel 3 Generator Model 1

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	V masuk (Volt)	V keluar (Volt)
K1	1 – 2	380	379,91
K2	1 – 3	379,91	379,70
K2	1 – 4	380	379,67
K4	5 – 6	379,67	379,49
K5	5 – 7	380	378,87
K6	5 – 8	378,87	378,80

Pada bus 1 hingga bus 8, tegangan mengalami penurunan



Gambar 4.7. Pola Perubahan Voltase 3 Generator

Dari profil tegangan pada masing-masing bus tersebut selanjutnya dapat diperoleh total genarasi daya, total beban dan total daya yang hilang dalam sistem 3 generator dengan kapasitas 200 KVA, 300KVA dan 600 KVA. Dengan beban 711 KVA adalah 60 Watt.

b. Optimal Power Flow

Hasil analisis optimal power flow dengan menggunakan Simulink PSAT diperoleh hasil bahwa fungsi optimum yang dihasilkan dari simulasi dengan

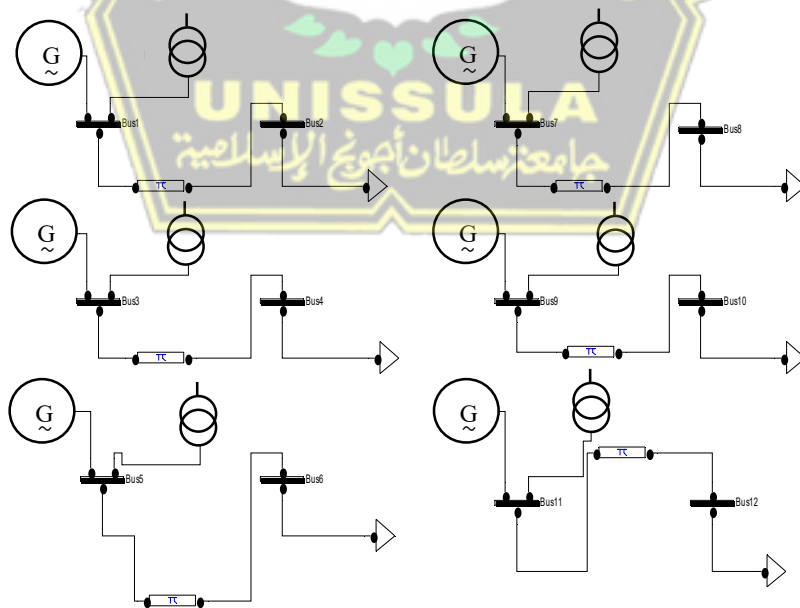
menggunakan 3 generator diperoleh biaya bahan bakar iptimak adalah sebagai berikut :

Objective Function [\$/h]:	97.888
Active Limits:	5
Number of Iterations:	20
Barrier Parameter:	0
Variable Mismatch:	0.00122
Power Flow Equation Mismatch	0
Objective Function Mismatch:	0

Dengan demikian penggunaan bahan bakar maksimal sebagaimana spesifikasi dari penggunaan 3 generator Perkins 200 kVA, 300 kVA dan 600 kVA adalah sebesar 97.888 liter / jam.

4.3.4 Model Jaringan dengan 6 Generator

Model jaringan keempat ini disusun dengan menggunakan 6 buah generator masing-masing dengan daya 100 kVA, 150kVA, 150kVA, 200 kVA dan dua generator 250 kVA. Keenam generator didistribusikan ke 6 gedung yang masing-masing generator mensuplai 1 gedung. Masing-masing gedung memiliki beban daya dan panjang kabel instalasi yang menentukan beban daya nyata serta resistansi dan reaktansi dari masing-masing.



Gambar 4.8. Model 6 Generator

Selanjutnya model dan sistem ini juga akan menguji dengan mensimulasikan perubahan tegangan dan daya yang akan hilang dalam sistem tersebut.

Tabel 4.12. *Penjelasan Instalasi Model 6 Generator*

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	Keterangan
K1	1 – 2	Mini Teaching + Percetakan
K2	3 – 4	Pumanisa
K2	4 – 6	Akbid
K4	7 – 8	Fakultas Teknologi dan Industri
K5	9 – 10	Fakultas Kedokteran Gedung B&C
K6	11 – 12	Fakultas Kedokteran Gedung A

Sebagaimana disesuaikan dengan kebutuhan beban maka untuk line K1 memiliki beban sebesar 41,5 kVA sehingga akan digunakan generator 100 kVA, untuk line K2 hingga K4 memiliki beban sebesar 105 kVA akan menggunakan Generator Perkin 150 kVA, K3 memiliki beban sebesar 82,5 kVA sehingga akan menggunakan Generator Perkin 150 kVA. K5 memiliki beban sebesar 164 kVA sehingga akan menggunakan Generator Perkin 250 kVA dan K6 memiliki beban sebesar 187 kVA sehingga akan menggunakan Generator Perkin 250 kVA.

Selanjutnya model dan sistem ini juga akan menguji dengan simulasi perubahan tegangan dan daya yang akan hilang dalam sistem tersebut.

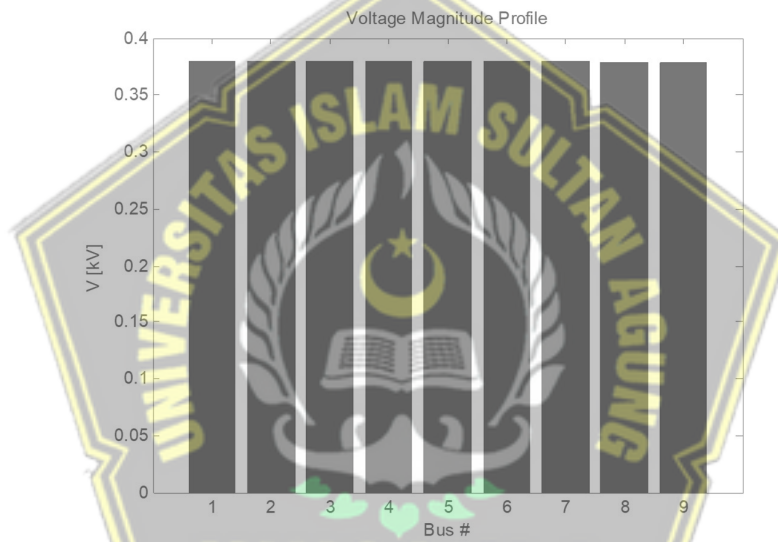
1. Analisis Power Flow

Simulasi dilakukan menggunakan Matlab – Simulink R2009a dengan menggunakan PSAT (Power System Analytical Tool). Hasil simulasi dengan menggunakan Simulink dan PSAT diperoleh Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Tegangan Keluar Kabel 6 Generator

Jalur (Line)	Dari bus ke bus	V masuk (Volt)	V keluar (Volt)
K1	1 – 2	380	379,91
K2	3 – 4	380	379,70
K2	5 – 6	380	377,71
K4	7 – 8	380	379,49
K5	9 – 10	380	378,79
K6	11 – 12	380	378,09

Pada bus 1 hingga bus 12, tegangan mengalami penurunan.



Gambar 4.9. Profil Tegangan pada Tiap Bus Pada 6 Generator

Dari profil tegangan pada masing-masing bus tersebut selanjutnya dapat diperoleh total generasi daya, total beban dan total daya yang hilang dalam sistem 6 generator pada masing masing gedung dengan kapasitas 100 KVA, 150 KVA dan 250 KVA dengan beban 711 KVA maka daya yang hilang adalah 80 Watt..

1. Optimal Power Flow

Hasil analisis optimal power flow dengan menggunakan 2 generator diperoleh sebagai berikut :

Objective Function [\$/h]:	105.162
Active Limits:	10
Number of Iterations:	21
Barrier Parameter:	0
Variable Mismatch:	198.23
Power Flow Equation Mismatch	0
Objective Function Mismatch:	0

Dengan demikian penggunaan bahan bakar maksimal sebagaimana spesifikasi dari penggunaan 6 generator adalah sebesar 105.162 liter / jam.

4.4 Perbandingan Beban Biaya untuk Variasi Penggunaan Gebnerator

Dalam simulasi penggunaan generator untuk pembangkitan daya untuk memenuhi aliran listrik sebagaimana simulasi sebelumnya selanjutnya adalah perhitungan untuk mengetahui biaya minimal yang dikeluarkan untuk generasi daya listrik tersebut. Biaya dalam hal ini terdiri dari dua macam biaya yaitu biaya investasi yang dihitung dari harga beli generator untuk masing-masing type dan biaya generasi yaitu berupa biaya bahan bakar. Perbandingan jumlah biaya optimal investasi dengan perkiraan harga bahan bakar minyak 5.150/ liter maka dapat di baca pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14. *Perbandingan Biaya Generasi Daya*

	ukuran generator	Harga Generator	bahan bakat / jam (liter)	Investasi Jam pertama
1 Generator	1300 kVA	2,193,500,000	86.6399	
	Total	2,193,500,000	446,195	2,193,946,195
2 Generator	500 kVA	886,950,000	93.0589	
	500 kVA	1,726,312,500		
	Total	2,613,262,500	479,253	2,613,741,753
3 Generator	250 kVA	615,125,000	97.888	
	250 kVA	721,000,000		
	500 kVA	1,260,450,000		
	Total	2,596,575,000	504,123	2,597,079,123
6 genartor	60 kVA	367,975,000	105.162	
	135 kVA	510,400,000		
	160 kVA	510,400,000		
	200 kVA	615,125,000		
	250 kVA	721,000,000		
	250 kVA	721,000,000		
	Total	3,445,900,000	541,584	3,446,441,584

Dapat disimpulkan bahwa sesuai Tabel 4.1. maka besarnya breker (MCCB) pada masing masing gedung adalah bahwa pada beban 1, Gedung mini teaching dan percetakan terpasang 100 A 3 phase, Gedung pumanisa terpasang 200 A 3 phase, Gedung akbid terpasang 125 A 3 phase, Gedung Fakultas teknologi dan industry terpasang 200 A 3 phase, Gedung fakultas kedokteran B dan C adalah 250 A 3 phase, sedangkan Gedung Fakultas kedokteran A adalah 300 A. dan Sesuai perhitungan dengan persamaan 2.5 dan dengan simulasi matlab Simulink maka daya terpasang pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) enam (6) Gedung kampus UNISSULA adalah 1 MVA,

Jenis penghantar menggunakan kabel NYY 4 core, dengan ukuran sesuai Tabel 4.1, yaitu Gedung mini teaching dan percetakan dapat digunakan kabel NYY dengan ukuran 4 X 16 mm , Gedung pumanisa 4 X 70mm, Gedung Akbid 4 X 50mm, Gedung Fakultas Teknologi dan Industri 4 X 70mm, sedangkan Gedung Fakultas Kedokteran B dan C menggunakan kabel NYY 4 X 95 mm, fakultas kedokteran gedung B menggunakan kabel NYY 4 X 150mm. adapun biaya optimal terendah untuk pemasangan generator dari 4 percobaan didapat dari penggunaan 1 buah generator dengan kapasitas 1,3 MVA untuk untuk mensuplai 6 gedung di unisula. Dengan biaya Investasi Rp 2.193.956.956,-

4.5. Hasil dan Pembahasan Kapasitor Bank

Bahan penelitian yang dipakai berupa data perhitungan kebutuhan kapasitor bank dengan range daya semu (S) dari 0 KVA sampai 1000KVA, dan Cos phi dari 0,5 sampai 0,80. Dengan data-data tersebut, kemudian peneliti menggunakan Microsoft Excel untuk menganalisis kebutuhan tiap-tiap variasi beban dan cos phi untuk mendapatkan data perhitungan kapasitor bank terpasang yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel. 4.15. Variasi Beban, Cos phi dan kapasitor bank yang dibutuhkan

Terukur				Kapasitor Bank yang dibutuhkan
S (KVA)	cos phi	P (KW)	Q1 (KVAR)	Qc (KVAR)
0	0,5	0	0,00	0,00
100	0,5	50	86,60	55,62
200	0,5	100	173,21	111,23
250	0,5	125	216,51	139,04
300	0,5	150	259,81	166,85
400	0,5	200	346,41	222,46
500	0,5	250	433,01	278,08
600	0,5	300	519,62	333,69
700	0,5	350	606,22	389,31
750	0,5	375	649,52	417,11
800	0,5	400	692,82	444,92
900	0,5	450	779,42	500,54
1000	0,5	500	866,03	556,15
0	0,6	0	0,00	0,00
100	0,6	60	80,00	42,82
200	0,6	120	160,00	85,63
250	0,6	150	200,00	107,04
300	0,6	180	240,00	128,45
400	0,6	240	320,00	171,26
500	0,6	300	400,00	214,08
600	0,6	360	480,00	256,89
700	0,6	420	560,00	299,71
750	0,6	450	600,00	321,12
800	0,6	480	640,00	342,52
900	0,6	540	720,00	385,34
1000	0,6	600	800,00	428,15
0	0,7	0	0,00	0,00
100	0,7	70	71,41	28,03
200	0,7	140	142,83	56,06
250	0,7	175	178,54	70,08
300	0,7	210	214,24	84,10
400	0,7	280	285,66	112,13
500	0,7	350	357,07	140,16
600	0,7	420	428,49	168,19
700	0,7	490	499,90	196,23
750	0,7	525	535,61	210,24
800	0,7	560	571,31	224,26
900	0,7	630	642,73	252,29
1000	0,7	700	714,14	280,32

Tabel. 4.15. *Variasi Beban, Cos phi dan kapasitor bank yang dibutuhkan*

0	0,8	0	0,00	0,00
100	0,8	80	60,00	10,42
200	0,8	160	120,00	20,84
250	0,8	200	150,00	26,05
300	0,8	240	180,00	31,26
400	0,8	320	240,00	41,68
500	0,8	400	300,00	52,10
600	0,8	480	360,00	62,52
700	0,8	560	420,00	72,94
750	0,8	600	450,00	78,15
800	0,8	640	480,00	83,36
900	0,8	720	540,00	93,78
1000	0,8	800	600,00	104,20

4.6. Proses Perhitungan Logika Fuzzy Metode Sugeno

4.6.1. Pembentukan Himpunan Fuzzy (fuzzifikasi)

Pada metode Fuzzy sugeno, baik variabel input maupun output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan Fuzzy. Dalam penentuan besar kebutuhan kapasitor bank terpasang berdasarkan data perhitungan variabel input dibagi menjadi dua yaitu variabel beban terpasang dan besar, sedangkan yang menjadi variabel output adalah kebutuhan nilai kapasitor bank terpasang. Penentuan variabel yang digunakan dalam penelitian ini, terlihat pada Tabel 4.16.

Tabel. 4.16. *Penentuan Variabel Penelitian*

Fungsi	Nama Variable	Semesta Pembicaraan
Input	Beban Terpasang (S) (KVA)	0 – 1000 KVA
	Cos Phi	0,50 – 0,80
Output	Kapasitor Bank	0 – 415 KVAR

Dari tabel 4.16. yang menjadi semesta pembicaraan adalah data daya terpasang minimal dan maksimal, cos phi terukur minimal dan maksimal, dan nilai kapasitor bank minimal dan maksimal dalam satu hari, sedangkan yang akan menjadi domain untuk komposisi aturan *Fuzzy* adalah data perhitungan nilai kapasitor bank yang dibutuhkan yang telah dibuat pada Tabel 4.5.1.

4.6.2. Pembentukan Fuzzy Rule

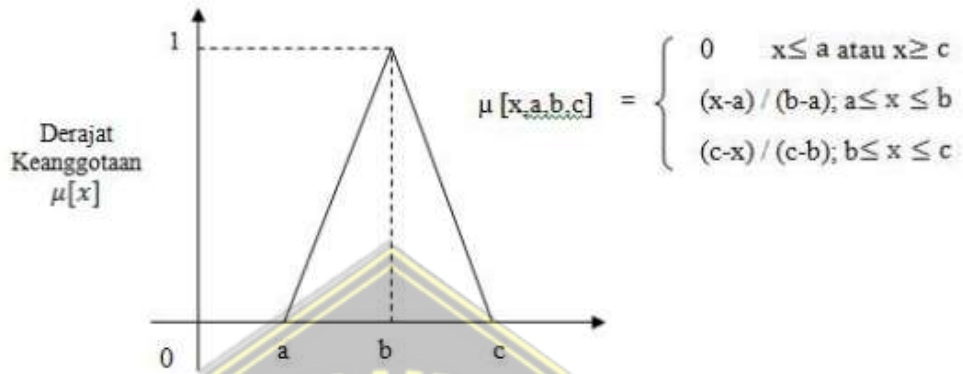
Pada tahap ini, nilai keanggotaan himpunan daya terpasang (S) dan Cos phi terukur saat ini dicari menggunakan fungsi keanggotaan himpunan Fuzzy berdasarkan data. Pembentukan Aturan Fuzzy, Dari dua variabel input dan sebuah variabel output yang telah didefinisikan, dengan melakukan analisa data terhadap batas tiap-tiap himpunan Fuzzy pada tiap-tiap variabelnya maka terdapat 20 aturan Fuzzy yang akan dipakai dalam sistem ini, dengan susunan aturan IF Daya listrik IS ... AND cos phi IS ... THEN Kapasitor bank IS ..., hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17. Rule Base Fuzzy Sugeno

Rule Base Fuzzy Sugeno						
Rules	S	Cos phi	QC	S	Cos phi	QC
1	0	0,50	0,00	VL	VL	QC0
2	0	0,60	0,00	VL	L	QC0
3	0	0,70	0,00	VL	M	QC0
4	0	0,80	0,00	VL	H	QC0
5	250	0,80	26,05	L	H	QC1
6	500	0,80	52,10	M	H	QC2
7	250	0,70	70,08	L	M	QC3
8	750	0,80	78,15	H	H	QC4
9	1000	0,80	104,20	VH	H	QC5
10	250	0,60	107,04	L	L	QC6
11	250	0,50	139,04	L	VL	QC7
12	500	0,70	140,16	M	M	QC8
13	750	0,70	210,24	H	M	QC9
14	500	0,60	214,08	M	L	QC10
15	500	0,50	278,08	M	VL	QC11
16	1000	0,70	280,32	VH	M	QC12
17	750	0,60	321,12	H	L	QC13
18	750	0,50	417,11	H	VL	QC14
19	1000	0,60	428,15	VH	L	QC15
20	1000	0,50	556,15	VH	VL	QC16

Berikut adalah cara untuk mendapatkan nilai keanggotan berdasarkan variabel linguistik dan variabel numerik yang digunakan:

- Fungsi keanggotaan himpunan Fuzzy VL, L, M, H,VH dari variabel Beban Terpasang (S)



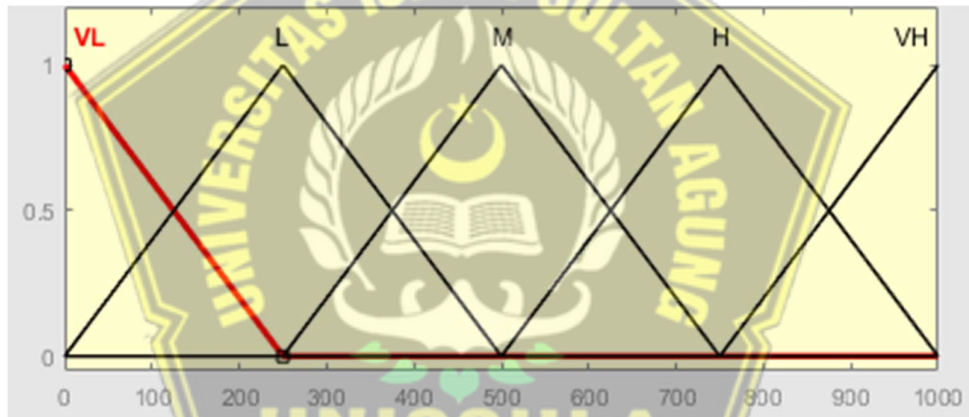
$$\mu[x]VL = \begin{cases} 0; & x \leq -250 \text{ atau } x \geq 250 \\ \frac{(x - (-250))}{(0 - (-250))}; & -250 \leq x \leq 0 \\ \frac{(250 - x)}{(250 - 0)}; & 0 \leq x \leq 250 \end{cases}$$

$$\mu[x]L = \begin{cases} 0; & x \leq 0 \text{ atau } x \geq 500 \\ \frac{(x - 0)}{(250 - 0)}; & 0 \leq x \leq 250 \\ \frac{(500 - x)}{(500 - 250)}; & 250 \leq x \leq 500 \end{cases}$$

$$\mu[x]M = \begin{cases} 0; & x \leq 250 \text{ atau } x \geq 750 \\ \frac{(x - 250)}{(500 - 250)}; & 250 \leq x \leq 500 \\ \frac{(750 - x)}{(750 - 500)}; & 500 \leq x \leq 750 \end{cases}$$

$$\mu[x]H = \begin{cases} 0; & x \leq 500 \text{ atau } x \geq 1000 \\ \frac{(x - 500)}{(750 - 500)}; & 500 \leq x \leq 750 \\ \frac{(1000 - x)}{(1000 - 750)}; & 750 \leq x \leq 1000 \end{cases}$$

$$\mu[x]VH = \begin{cases} 0; & x \leq 750 \text{ atau } x \geq 1250 \\ \frac{(x - 750)}{(1000 - 750)}; & 750 \leq x \leq 1000 \\ \frac{(1250 - x)}{(1250 - 1000)}; & 1000 \leq x \leq 1250 \end{cases}$$



Gambar 4.10. Himpunan Fuzzy dari Variabel Daya Terpasang

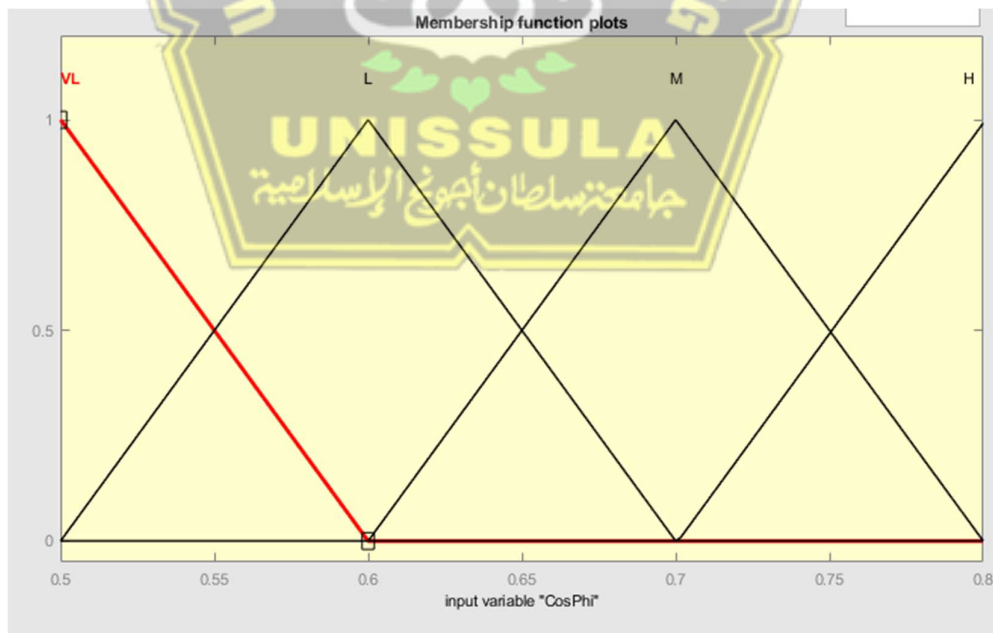
- Fungsi keanggotaan himpunan Fuzzy VL, L, M, H dari variabel Cos Phi Terukur :

$$\mu[x]VL = \begin{cases} 0; & x \leq 0,5 \text{ atau } x \geq 0,6 \\ \frac{(x - 0,4)}{(0,5 - 0,4)}; & 0,4 \leq x \leq 0,5 \\ \frac{(0,6 - x)}{(0,6 - 0,5)}; & 0,5 \leq x \leq 0,6 \end{cases}$$

$$\mu[x]L = \begin{cases} 0; & x \leq 0,5 \text{ atau } x \geq 0,7 \\ \frac{(x - 0,5)}{(0,6 - 0,5)}; & 0,5 \leq x \leq 0,6 \\ \frac{(0,7 - x)}{(0,7 - 0,6)}; & 0,6 \leq x \leq 0,7 \end{cases}$$

$$\mu[x]M = \begin{cases} 0; & x \leq 0,6 \text{ atau } x \geq 0,8 \\ \frac{(x - 0,6)}{(0,7 - 0,6)}; & 0,6 \leq x \leq 0,7 \\ \frac{(0,8 - x)}{(0,8 - 0,7)}; & 0,7 \leq x \leq 0,8 \end{cases}$$

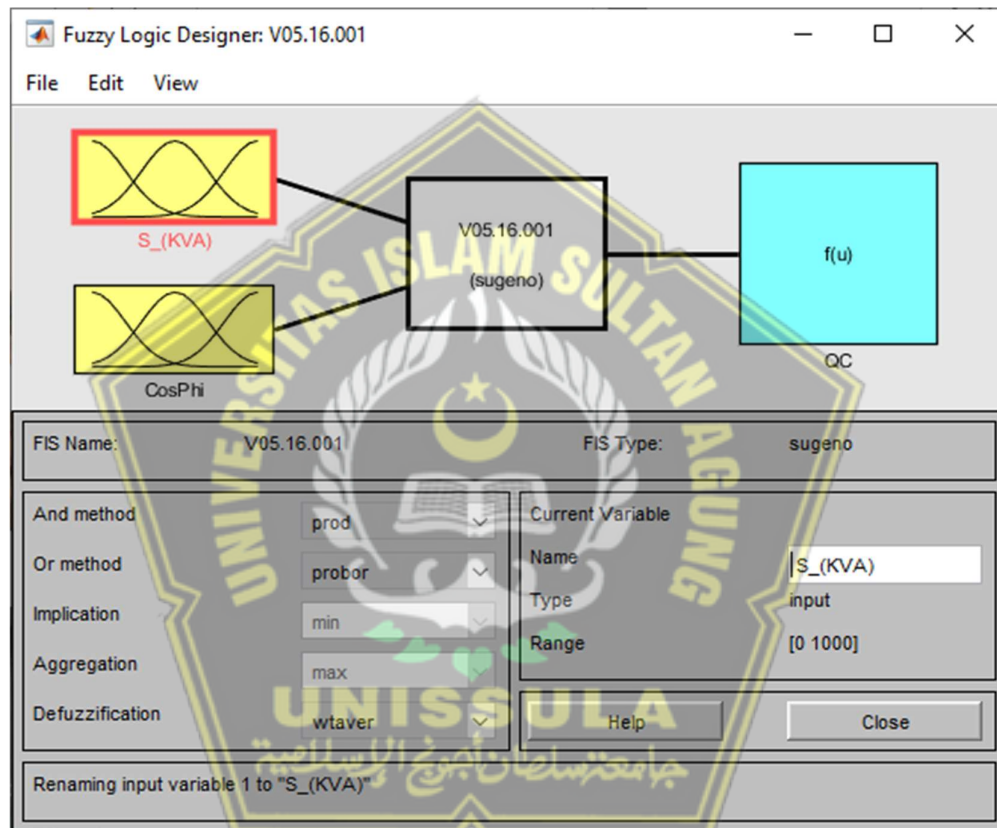
$$\mu[x]H = \begin{cases} 0; & x \leq 0,7 \text{ atau } x \geq 0,85 \\ \frac{(x - 0,7)}{(0,9 - 0,7)}; & 0,7 \leq x \leq 0,8 \\ \frac{(0,85 - x)}{(0,85 - 0,8)}; & 0,8 \leq x \leq 0,85 \end{cases}$$



Gambar 4.11. Himpunan Fuzzy Dari Variabel Cos phi Terukur

4.6.3. Implementasi Program

Program yang dipakai dalam pembahasan ini adalah MATLAB yang bertujuan untuk membantu menghitung besarnya nilai kapasitor terpasang yang dibutuhkan khususnya pada tahapan defuzzifikasi berdasarkan data perhitungan kapasitor bank terpasang yang dibutuhkan ditunjukkan pada Gambar 4.12.

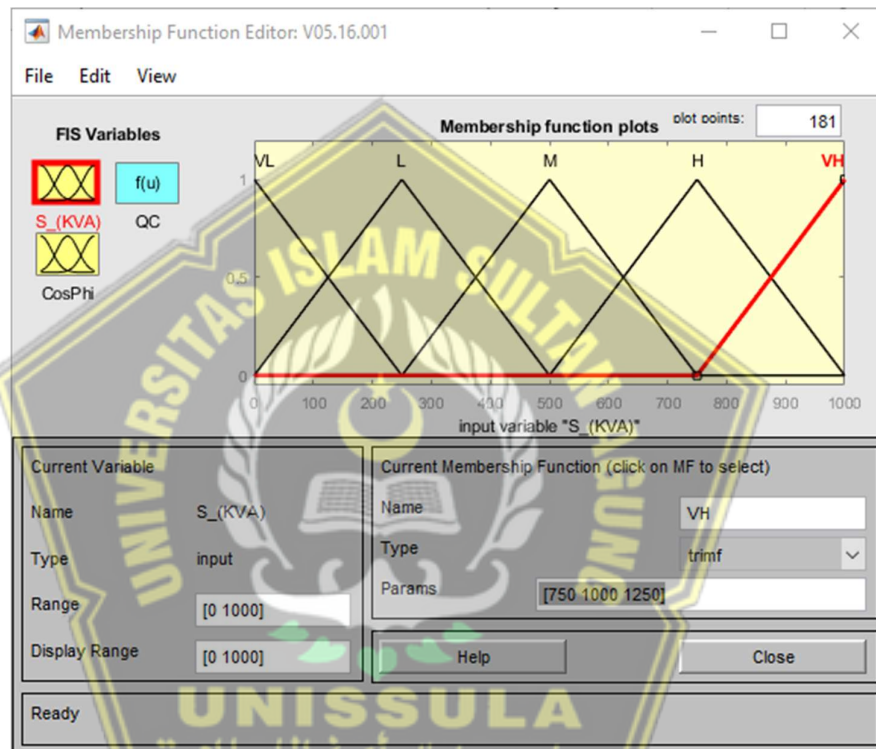


Gambar 4.12. Penerapan Masalah Ke Dalam Aplikasi

Pada 4.12. ini adalah tahap pembentukan variabel input dan output. Dapat dilihat ada dua input yang berwarna kuning yaitu daya terpasang (S KVA) dan cos phi kemudian yang berwarna biru adalah output yaitu nilai kapasitor bank terpasang yang dibutuhkan (KVAR). Tahap selanjutnya pembentukan himpunan Fuzzy dan fungsi keanggotaan. Pada Gambar 1 pilih input daya terpasang (S KVA) untuk dibuat fungsi keanggotaan yang lebih detail, yaitu untuk fungsi keanggotaan, VL, L, M, H, dan VH range adalah [0-1000] untuk fungsi keanggotaan :

- VL tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [-250 0 250]
- L tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [0 250 500]
- M tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [250 500 750]
- H tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [500 750 1000]
- VH tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [750 1000 1250]

Hasilnya ditampilkan pada Gambar 4.13.

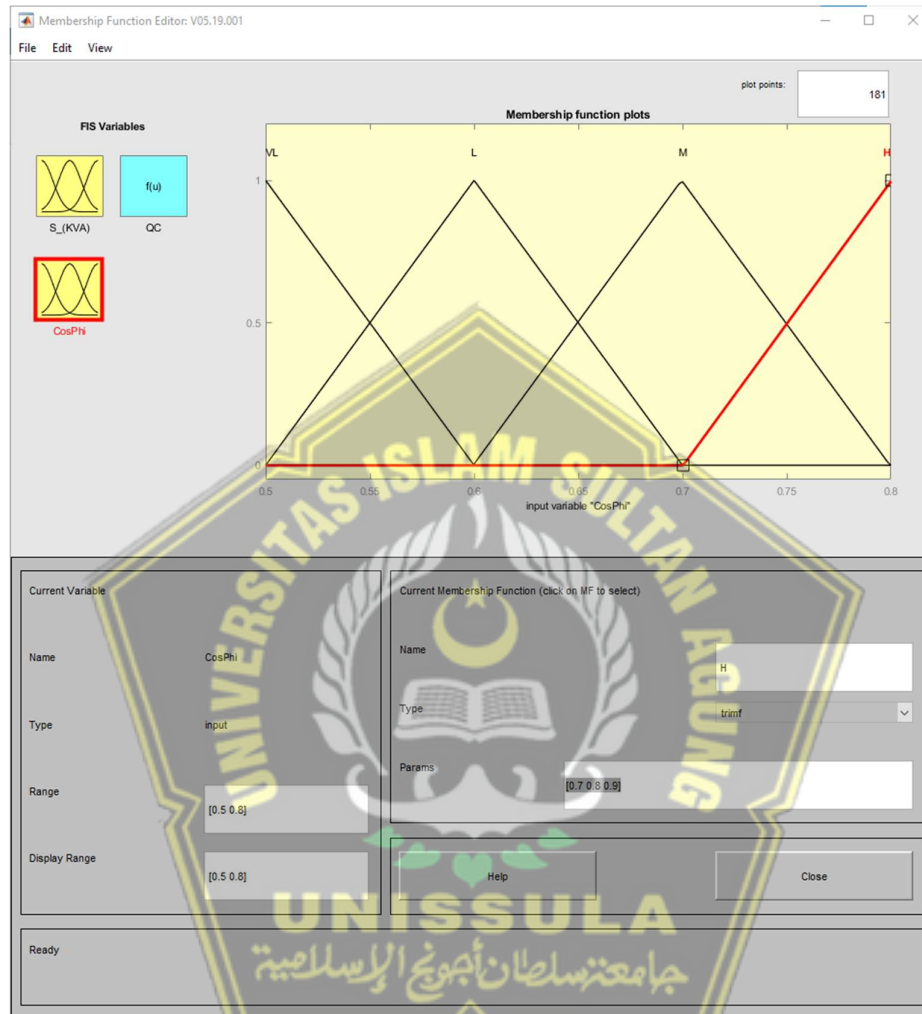


Gambar 4.13. Fungsi Keanggotaan Variabel Input Daya Terpasang S

Pada Gambar 4.13. pilih input cos phi terukur untuk dibuat fungsi keanggotaan yang lebih detail, yaitu untuk fungsi keanggotaan, VL, L, M, dan H, range adalah [0,75-0,10] untuk fungsi keanggotaan :

- VL tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [0.4 0.5 0.7]
- L tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [0.5 0.6 0.8]
- M tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [0.6 0.7 0.9]
- H tipe variabelnya adalah trimf dengan parameteranya [0.7 0.8 0.10]

Hasilnya ditampilkan pada Gambar 4.14.

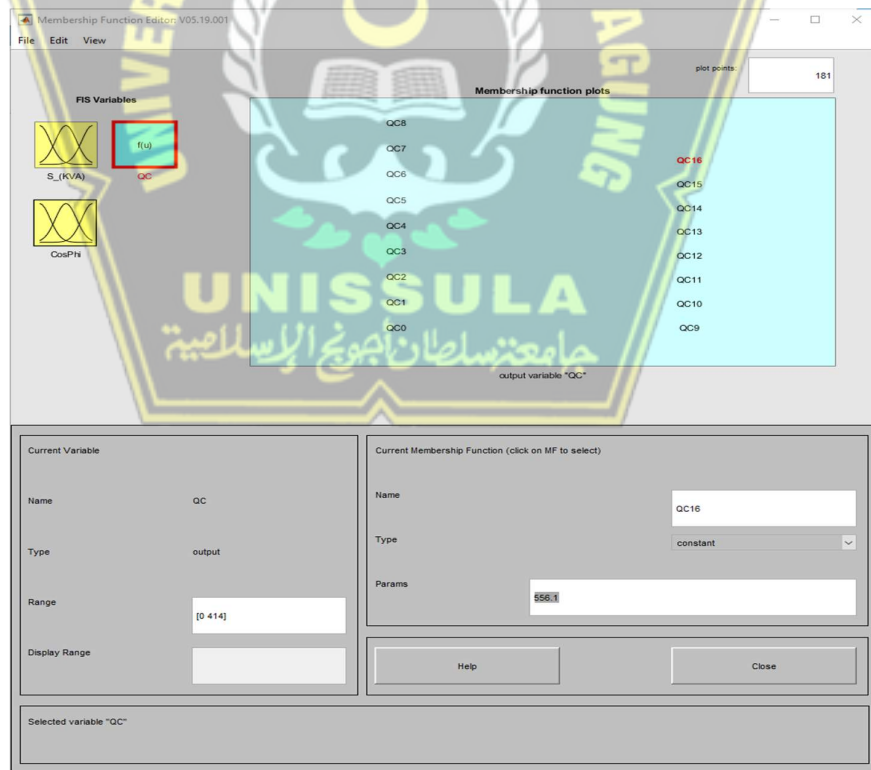


Gambar 4.14. Fungsi Keanggotaan Variabel Input Cos phi

Demikian pula untuk output nilai kapasitor bank terpasang dipilih output nilai kapasitor bank untuk dibuat fungsi keanggotaan lebih detail, yaitu untuk fungsi keanggotaan :

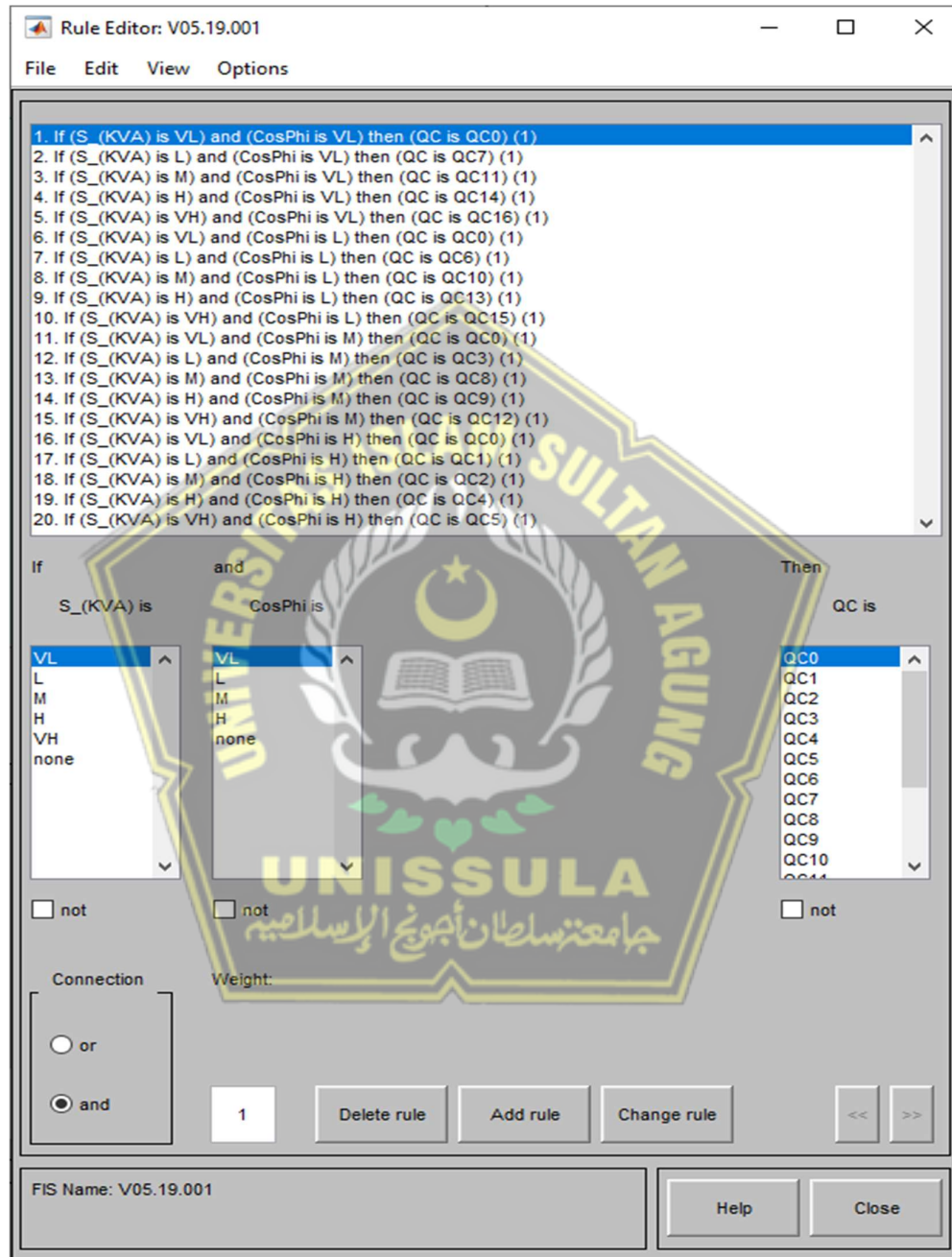
- QC0 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [0]
- QC1 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [26,6]
- QC2 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [52.1]
- QC3 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [70.09]

- e. QC4 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [78.17]
- f. QC5 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [104.2]
- g. QC6 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [108]
- h. QC7 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [108]
- i. QC8 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [140.2]
- j. QC9 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [210.2]
- k. QC10 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [214.1]
- l. QC11 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [278.1]
- m. QC12 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [280.3]
- n. QC13 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [321.1]
- o. QC14 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [417.1]
- p. QC15 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [428.1]
- q. QC1 tipe variabelnya adalah constant dengan parameteranya [556.1]



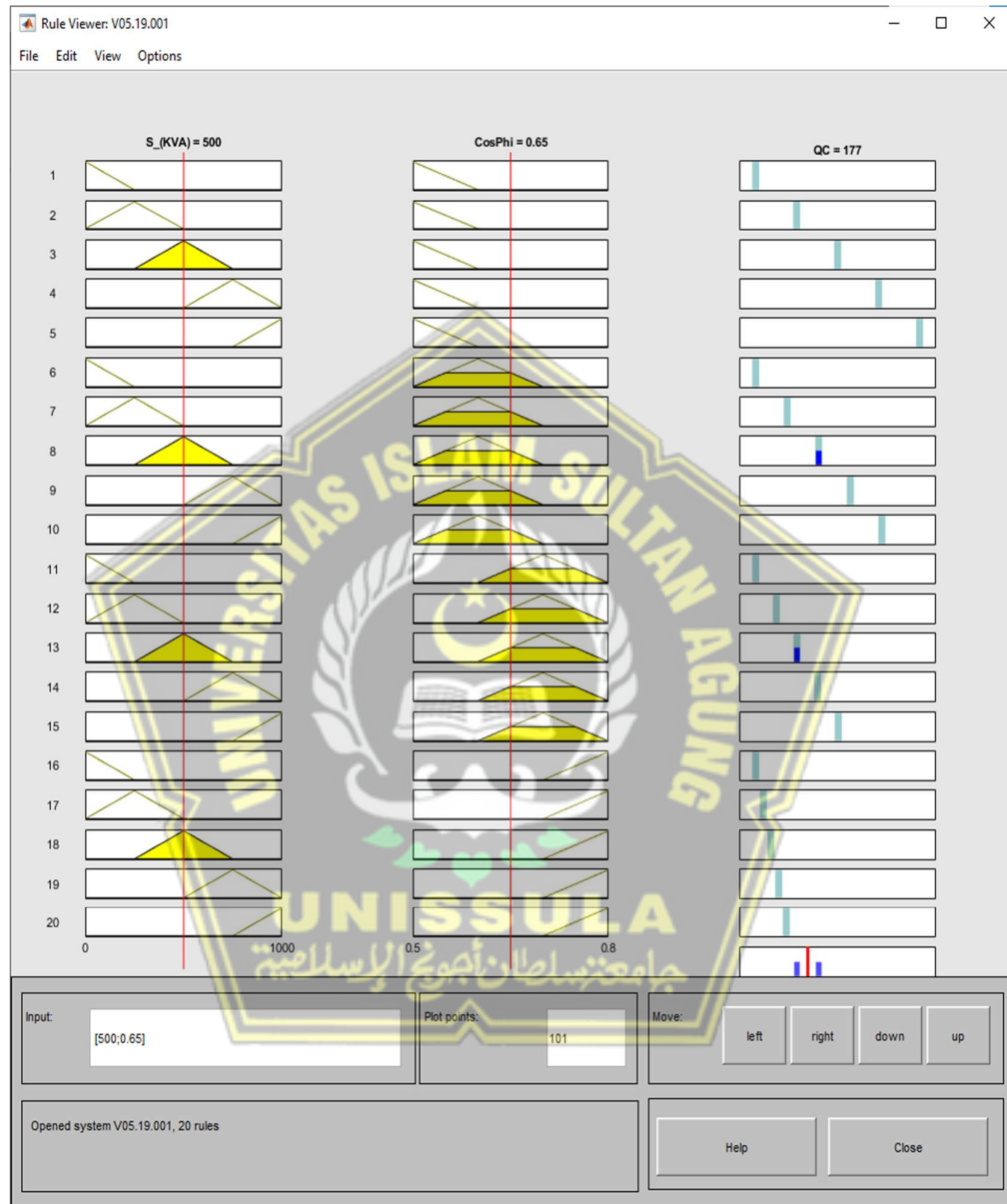
Gambar 4.15. Fungsi Keanggotaan Variabel Output QC Kapasitor Bank Terpasang

Dengan menyusun aturan Fuzzy seperti pada Tabel 4 ke dalam tollbox Matlab maka hasilnya adalah:



Gambar 4.16. Aturan Fuzzy Berdasarkan Variabel Linguistik

Berdasarkan rule yang ada diperoleh rule view untuk simulasi hasil yang ingin diperoleh pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Rule View (Hasil Optimasi/ Defuzzifikasi)

Tabel 4.18. Nilai kapasitor bank yang Harus di butuhkan Berdasarkan Input daya Terpasang dan Cos phi Terukur (Fuzzy Sugeno)

Terukur				Kapasitor Bank yang dibutuhkan	Hasil	
S (KVA)	cos phi	P (KW)	Q1 (KVAR)	Qc (KVAR)	Fuzzy	Error (%)
0	0,5	0	0,00	0,00	0,00	0,00%
100	0,5	50	86,60	55,62	55,60	0,03%
200	0,5	100	173,21	111,23	111,00	0,21%
250	0,5	125	216,51	139,04	139,00	0,03%
300	0,5	150	259,81	166,85	167,00	0,09%
400	0,5	200	346,41	222,46	222,00	0,21%
500	0,5	250	433,01	278,08	278,00	0,03%
600	0,5	300	519,62	333,69	334,00	0,09%
700	0,5	350	606,22	389,31	389,00	0,08%
750	0,5	375	649,52	417,11	417,00	0,03%
800	0,5	400	692,82	444,92	445,00	0,02%
900	0,5	450	779,42	500,54	501,00	0,09%
1000	0,5	500	866,03	556,15	556,00	0,03%
0	0,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00%
100	0,6	60	80,00	42,82	42,80	0,04%
200	0,6	120	160,00	85,63	85,60	0,04%
250	0,6	150	200,00	107,04	107,00	0,04%
300	0,6	180	240,00	128,45	128,00	0,35%
400	0,6	240	320,00	171,26	171,00	0,15%
500	0,6	300	400,00	214,08	214,00	0,04%
600	0,6	360	480,00	256,89	257,00	0,04%
700	0,6	420	560,00	299,71	300,00	0,10%
750	0,6	450	600,00	321,12	321,00	0,04%
800	0,6	480	640,00	342,52	343,00	0,14%
900	0,6	540	720,00	385,34	385,00	0,09%
1000	0,6	600	800,00	428,15	428,00	0,04%
0	0,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00%
100	0,7	70	71,41	28,03	28,00	0,11%
200	0,7	140	142,83	56,06	56,10	0,06%
250	0,7	175	178,54	70,08	70,10	0,03%
300	0,7	210	214,24	84,10	84,10	0,00%
400	0,7	280	285,66	112,13	112,00	0,11%
500	0,7	350	357,07	140,16	140,00	0,11%
600	0,7	420	428,49	168,19	168,00	0,11%
700	0,7	490	499,90	196,23	196,00	0,11%
750	0,7	525	535,61	210,24	210,00	0,11%
800	0,7	560	571,31	224,26	224,00	0,11%
900	0,7	630	642,73	252,29	252,00	0,11%
1000	0,7	700	714,14	280,32	280,00	0,11%

Tabel 4.18. Nilai kapasitor bank yang Harus di butuhkan Berdasarkan Input daya Terpasang dan Cos phi Terukur (Fuzzy Sugeno)

0	0,8	0	0,00	0,00	0,00	0,00%
100	0,8	80	60,00	10,42	10,40	0,20%
200	0,8	160	120,00	20,84	20,80	0,20%
250	0,8	200	150,00	26,05	26,10	0,19%
300	0,8	240	180,00	31,26	31,30	0,12%
400	0,8	320	240,00	41,68	41,70	0,04%
500	0,8	400	300,00	52,10	52,10	0,00%
600	0,8	480	360,00	62,52	62,50	0,04%
700	0,8	560	420,00	72,94	72,90	0,06%
750	0,8	600	450,00	78,15	78,20	0,06%
800	0,8	640	480,00	83,36	83,40	0,04%
900	0,8	720	540,00	93,78	93,80	0,02%
1000	0,8	800	600,00	104,20	104,00	0,20%

Dari hasil penerapan *Logika Fuzzy* (Sugeno) pada tollbox Matlab maka didapat hasil perbandingan penilaian *logika Fuzzy* (Sugeno) dengan perhitungan rumus kebutuhan kapasitor bank, menggunakan persentase rata-rata atau *Mean Percentage Error* (MPE)

Sehingga didapat hasil perhitungan rata-rata persentase kesalahan dari *Logika Fuzzy* Metode Sugeno yang digunakan adalah 0,08% maka dapat disimpulkan bahwa hasil dari perhitungan *Logika Fuzzy* Metode Sugeno yang digunakan pada sistem ini dapat digunakan untuk prediksi nilai kapasitor bank terpasang yang dibutuhkan pada *multi building* kampus UNISSULA.

4.6.4. Implementasi kapasitor bank terpasang

Menurut perhitungan kebutuhan kapasitor bank terpasang antara 10 KVAR hingga 556 KVAR, dengan rentang cos phi terukur 0,5 sampai 0,8, dengan target perbaikan cos phi menjadi 0,85 sesuai dengan standart PLN. Pada kasus cos phi terukur 0,5 dengan beban rentang 0 sampai 1000KVA di butuhkan kapasitor bank 0 sampai 556 KVAR, cos phi 0,6 dengan rentang beban yang sama maka di butuhkan kapasitor bank 0 sampai 428 KVAR, lebih lengkap di tunjukkan pada Tabel 4.20.

Nilai kapasitor yang tersedia di pasaran tidak selalu tepat dengan nilai yang di butuhkan, jika nilai kapasitor yang tersedia lebih kecil dari yang di butuhkan

maka perbaikan $\cos \phi$ tidak maksimal, tetapi jika nilai kapasitor yang tersedia melebihi dari yang di butuhkan maka akan menjadi beban kapasitif. maka dengan nilai kapasitor yang ada di pasaran di kombinasi secara paralel untuk mendapatkan nilai kapasitas kapasitor yang tepat sesuai dengan perhitungan, sehingga perbaikan faktor daya dapat optimal. Contoh konfigurasi nilai kapasitor bank yang ada di pasaran terdapat pada lampiran 2, dan dapat di gunakan untuk memasang nilai kapasitor bank yang di butuhkan dapat di lihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19. Contoh Konfigurasi Kapasitor Bank Terpasang untuk Mendapatkan Total Nilai Kapasitor yang di Butuhkan Secara Tepat. [38][39]

	KVAR	35,02	52,00	61,85	168,53	252,79	311,19	337,05	512,00
Kapasitor Bank Tersedia	C1	1			1		1		
	C2	2	2	2		2			2
	C3	3			3			3	
	C4	4			4			4	
	C5	5	5						
	C6	10	10	10					
	C7	20	20	20	20	20	10	30	10
	C8	30				30			
	C9	40	40	40	40				
	C10	100			100		100	100	
	C11	200				200	200	200	200
	C12	300							300
Total :		35	52	62	168	252	311	337	512

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan Matlab Simulink dan PSAT selanjutnya dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Sesuai perhitungan dengan persamaan 2.5 dan dengan simulasi matlab Simulink maka daya terpasang pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP) enam (6) Gedung di sisi timur kampus UNISSULA adalah 1 MVA.
2. Jenis penghantar menggunakan kabel NYY dengan ukuran sesuai Tabel 4.1., yaitu Gedung mini teaching dan percetakan dapat digunakan kabel NYY dengan ukuran 4X 16 mm , Gedung pumanisa 4 X 50mm, Gedung Akbid 4X 35mm, Gedung Fakultas Teknologo dan Industri 4 X 70mm X, sedangkan Gedung fakultas kedokteran menggunakan kabel NYY 4X 95 mm.
3. Berdasarkan hasil beban daya terpasang 1 MVA, simulasi dengan menggunakan 4 model yang berbeda yaitu penggunaan 1 generator, 2 generator, 3 generator dan 6 generator untuk memenuhi kebutuhan daya sebanyak 711 kVA di lingkungan Kampus Universitas Islam Sultan Agung dapat diperoleh bahwa penggunaan 1 buah generator dengan kapasitas 1,3 MVA menunjukkan paling optimal.
4. Fuzzy logic mampu digunakan untuk membantu memprediksi nilai kapasitor bank sesuai perubahan beban. Menurut perhitungan kebutuhan kapasitor bank terpasang antara 10 KVAR hingga 556 KVAR, dengan rentang cos phi terukur 0,5 sampai 0,8, dengan target perbaikan cos phi menjadi 0,85 sesuai dengan standart PLN
5. Logika Fuzzy Sugeno dapat dipakai sebagai alat peramalan dalam menentukan nilai kapasitor bank berdasarkan daya terpasang dan cos phi terukur dengan nilai *error* mencapai 0,08%.

5.2 Saran

Dalam kaitan dengan penelitian ini, beberapa saran yang perlu diajukan sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui penurunan daya yang lebih akurat, dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan model jaringan berbentuk seri.
2. Untuk mengurangi penurunan daya pada gedung yang diakibatkan jaringan, dapat dilakukan dengan cara membagi beban dengan seimbang antar phase.
3. Bagi peneliti selanjutnya agar menambahkan filter kapasitor bank untuk implementasi di lapangan.

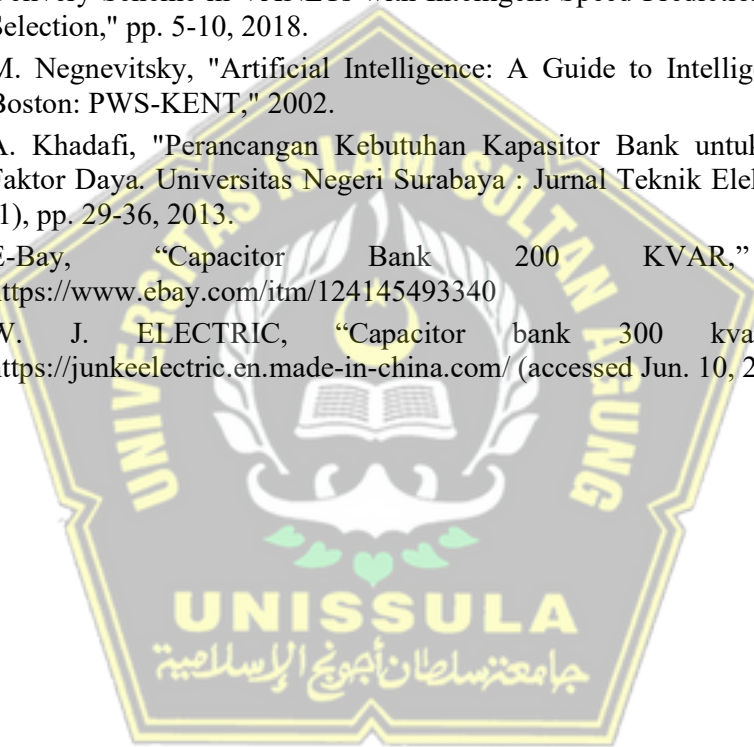


DAFTAR PUSTAKA

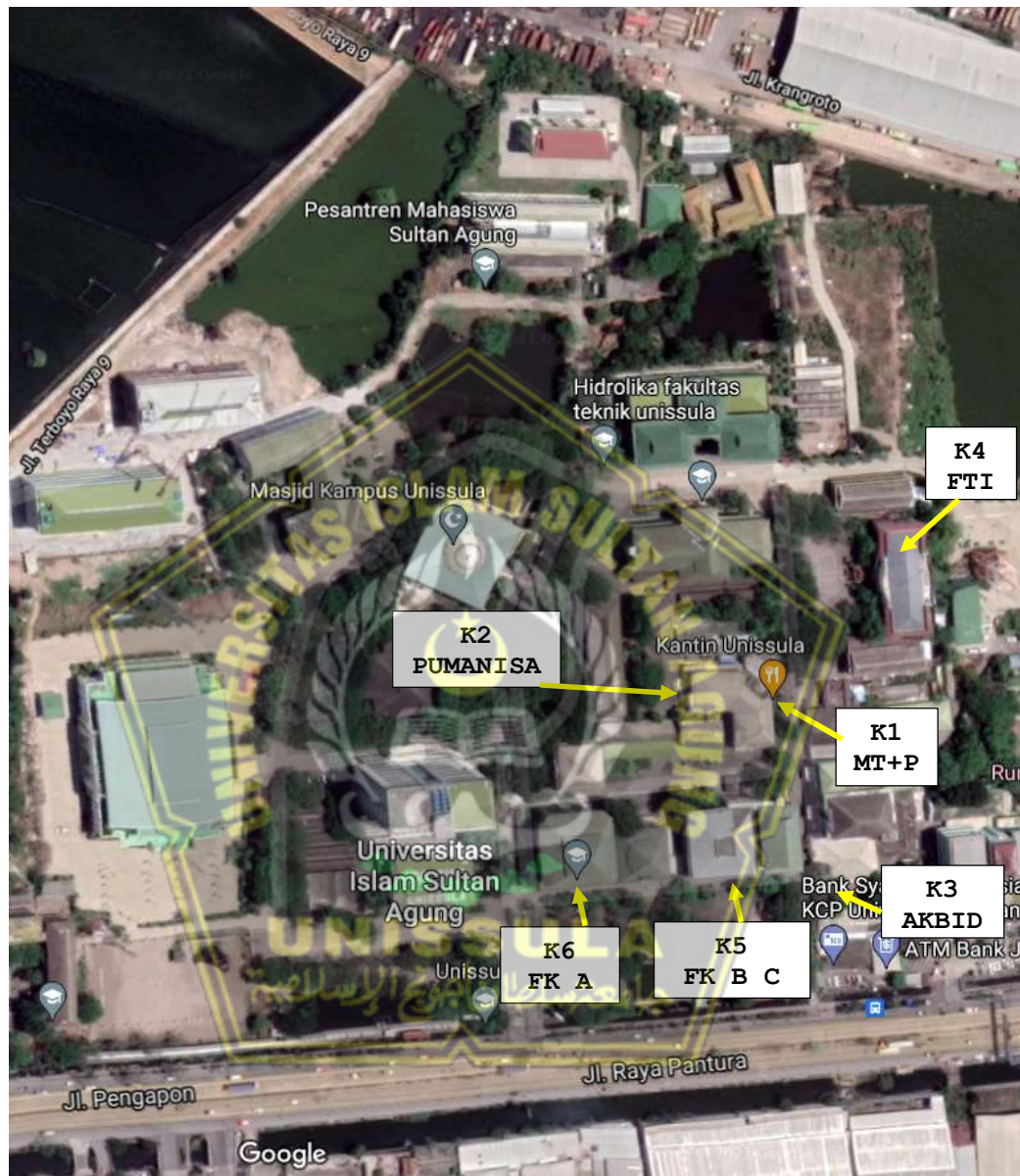
- [1] R. Megasari, "Jurnal Peningkatan Pengelolaan Sarana dan Prasarana," 2014.
- [2] A. Suryadi, "Tesis. Audit Konsumsi Energi Listrik di Universitas Mercu Buana," 2009.
- [3] Z. S. Osvaldo, "Pengaruh Konsentrasi Asam dan Waktu pada Proses Hidrolisis dan Fermentasi Pembuatan Bioetanol dari Alang-alang. Jurnal Teknik Kimia 2012," 2012.
- [4] Profil Unissula : World Class Islamic University. <http://unissula.ac.id/world-class-islamic-university/>
- [5] M. F. Bastari, "Otomatisasi pada Generator 1100 Watt sebagai Energi Alternative Sumber Daya PLN," 2017.
- [6] M. Abdul and H. Saifudin, "Analisa Kebutuhan Daya Listrik Terpasang pada Kantor Bupati Kabupaten Halmahera Barat, Jurusan Teknik Elektro Universitas Khairun Ternate," 2018.
- [7] T. D. C. Belo, "Analisa Kebutuhan Daya Listrik di Gedung Perkuliahan 10 Lantai Universitas Pakuan Bogor," 2016.
- [8] M. R. M. Altimania, "Modeling of Doubly-Fed Induction Generators Connected to Distribution System Based on Emegasim Real-Time Digital Simulator. The University of Tennessee At Chattanooga Chattanooga, Tennessee," 2014.
- [9] J. S. Bhadoriya, "Optimal Placement And Sizing of Multidistributed Generation (Dg) Including Different Load Models Using Pso. Devi Ahilya Indi University," 2011.
- [10] A. Supardi and R. Prabowo, "Analisis Dampak Pemasangan Distibuted Generation (Dg) Terhadap Profil Tegangan Dan Rugi- Rugi Daya Sistem Distribusi Standar Ieee 18 Bus. Jurnal Universitas Muhammadiyah Surakarta," pp. 1 - 3.
- [11] A. R. Sultan, "Pemasangan Generator-Set Sebagai Catu Daya Pengganti Pada Masjid Lailatul Qadar Btp Blok Af Makassar," 2019.
- [12] J. Candra, "Kajian Penghematan Pemakaian Daya Listrik Untuk Mereduksi Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Sfc) Generator Set Cadangan (Studi Kasus Pada Gedung Politeknik Muara Teweh)," 2018.
- [13] S. P and e. all, "Erencanaan Pemasangan Genset Emergency pada Gedung C Fakultas Teknik Universitas Riau," 2016.
- [14] J. Akbar, "Evaluasi Perencanaan Kebutuhan Daya Listrik Terpasang pada Instalasi Gedung Harco Glodog Jakarta.," 2017.
- [15] Suhadi and dkk, "Teknik Distribusi Tenaga Listrik. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan," 2008.
- [16] S. P. U, "Evaluasi Pemerataan Beban Untuk Menekan Losses Jaringan Tegangan Rendah Di Gardu E311p Dan Gardu Pm213," 2008.

- [17] D. Suwanto, "Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Padang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang,," 2009.
- [18] M. D. T. Sogen, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arusnetral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di PT PLN (Persero) Area Sorong. Jurnal Electro Luceat," vol. 4, pp. 1-5.
- [19] M. Michalski, Iczyński and Grzegorz, "Determination of The Parameters of Voltage Variation With Voltage Fluctuation Indices," 2016.
- [20] "Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rekonfigurasi Beban Pada Panel Utama Prambanan,," pp. 1 - 5, 2011.
- [21] Safriyudin, E. Suyandi and M. Suyanto, "Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi Area Rayon Yogyakarta Kota Di PT. PLN (Persero) APJ Gedong Kuning Yogyakarta. Jurnal Elektrikal," vol. 4, pp. 1-2, 2017.
- [22] Sugianto and P. Untara, "Studi Susut Energi Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik Melalui Analisis Pengukuran Dan Perhitungan," vol. 21, pp. 2-5, 2019.
- [23] Sugiarto, "Harmonisa Dan Tegangan Listrik Di Gedung Administrasi Politeknik Negri Pontianak," 2013.
- [24] A. Supardi and R. Prabowo, "Analisis Dampak Pemasangan Distibuted Generation (DG) Terhadap Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Sistem Distribusi Standar IEEE 18 Bus. Jurnal Universitas Muhammadiyah Surakarta. 978-602-99334," pp. 1 - 3, 2012.
- [25] R. C. Bharatan and K. P, "Automatic Load transfer in Electrical network, IEEE 2015 INTERNATIONAL Conference on Power, InstrumentationControl in Computing (PICC) 2015.,," 2015.
- [26] Z. Riki, "Evaluasi Kebutuhan Daya Listrik dan Kemungkinan Untuk Penghematan Energi," 2013.
- [27] M. F. Hakim, "Analisis Kebutuhan Kapasitor Bank Beserta Implementasinya untuk Memperbaiki Faktor Daya Listrik di Politeknik Kota Malang," 2017.
- [28] H. Berahim, "Pengantar Teknik Tenaga Listrik Teori Ringkas dan Penyelesaian Soal. Yogyakarta: Andi Offset," 1994.
- [29] N. Sabpayakom and S. Sirisumrannukul, "Power Losses Reduction and Reliability Improvement in Distribution System with Very Small Power Producers. Energi Procedia," pp. 388 - 395, 2016.
- [30] J. C. Teruna, "Kajian Penghematan Pemakaian Daya Listrik untuk Mereduksi Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC) Generatr Set Cadangan (Studi Kasus Pada Gedung Politeknik Negeri Muara Teweh). Jurnal EEICT e-ISSN," pp. 2615 - 2169, 2018.
- [31] I. B. A. Swamardik, A. A. N. Amrita, I. G. D. Arjana and C. G. I. Partha, "Pelatihan Pengamanan Instalasi Listrik sesuai Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 Serta Amandemen 2014. Bulletin Udayana Mengabdi," vol. 17 (1), pp. 120 - 126, 2018.

- [32] A. E. Guile and W. Paterson, "Electrical Power Systems. 2d Ed. Oxford. Pergamon Press," 1977.
- [33] S. Kusumadewi, S. Hartati, A. Harjoko and R. Wardoyo, "Fuzzy MultiAttribute Decision Making (Fuzzy MADM). Yogyakarta : Graha Ilmu," 2005.
- [34] A. Gegov, N. Petrov, D. Sanders and B. Vatchova, "Boolean Matrix Equations for Node Identification in Fuzzy Rule Based Networks," Knowledge Based and Intelligent Engineering Systems," vol. 21(2), pp. 69-83, 2017.
- [35] Y. H. L. Zhou, C. N. L. Shi and N. A. Cheng, "Fuzzy-Rule Based Data Delivery Scheme in VANETs with Intelligent Speed Prediction and Relay Selection," pp. 5-10, 2018.
- [36] M. Negnevitsky, "Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent System, Boston: PWS-KENT," 2002.
- [37] A. Khadafi, "Perancangan Kebutuhan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya. Universitas Negeri Surabaya : Jurnal Teknik Elektro," vol. 2 (1), pp. 29-36, 2013.
- [38] E-Bay, "Capacitor Bank 200 KVAR," 2019. <https://www.ebay.com/itm/124145493340>
- [39] W. J. ELECTRIC, "Capacitor bank 300 kvar," 2019. <https://junkeelectric.en.made-in-china.com/> (accessed Jun. 10, 2021).



Lampiran 1. Denah Gedung UNISSULA



Lampiran 2
nilai kapasitor bank yang ada di pasaran



Capacitor 300 kvar



Capacitor 200 kvar



Capacitor 100 kvar



Capacitor 40 kva



Capacitor 30 kvar



Capacitor 20 kvar



Capacitor 10 kvar



Capacitor 5 kvar



Capacitor 4 kvar



Capacitor 3 kvar

Capacitor 2.5 kVar 415V MKP-C



Capacitor 2 kvar



Capacitor 1 kvar