

**ANALISA OPTIMASI PERBAIKAN FAKTOR DAYA DAN *DROP*  
TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN KAPASITOR *BANK* PADA  
*LINE* 5 PT BUKIT ASAM (PERSERO) TBK**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**WINDU NUR HARDIRANTO**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2017**

## **ABSTRACT**

### **OPTIMIZATION ANALYSIS OF POWER FACTOR IMPROVEMENT AND DROP VOLTAGE USING A CAPACITOR BANK ON LINE 5 PT BUKIT ASAM (PERSERO) TBK**

**By**

**WINDU NUR HARDIRANTO**

The increasing of industrial growth has an impact on increasing the growth of electric power system load. The burden growth followed the increasing of the reactive power as a result of inductive loads on load bus and channels that cause increased reactive power consumption. Therefore, a study analysis required in the planning of capacitor bank installation in order to resolve the inductive load. In the distribution system, if a network does not have the resources in the area around the reactive load then all reactive load shouldered by the needs of the substation which supplied from generators at the power plant. So that, the reactive currents will flow on the network which resulted in decreased of power factor, voltage dropped, and the increase of loss power.

The Analysis of optimal capacitor placement was conducted by using ETAP 12.6 software. The load flow analysis method of Newton-Raphson is used as the reference for the planning or correction in electric power system audit. These research was performed at Line 5 PT Bukit Asam (Persero) Tbk., where the conditions are still under the nominal power factor SPLN 70-1 i.e.  $> 0.85$ . Based on simulation results, it can be concluded to add capacitor bank (VAR set) on Bus LV LV FF1A and MCC MCC FF1B of 994.7 micro farad 50 KVAR or by adding mounting power factor control in order to adjust to the conditions of the load.

Keyword: Power Factor, Drop Voltage, Losses, ETAP 12.6, Capacitor Bank

## ABSTRAK

### ANALISA OPTIMASI PERBAIKAN FAKTOR DAYA DAN DROP TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN KAPASITOR *BANK* PADA *LINE 5 PT BUKIT ASAM (PERSERO) TBK*

OLEH

WINDU NUR HARDIRANTO

Meningkatnya pertumbuhan industri berdampak pada bertambahnya pertumbuhan beban dalam sistem tenaga listrik. Pertumbuhan beban tersebut diikuti dengan meningkatnya daya reaktif akibat beban induktif pada bus beban maupun pada saluran yang menyebabkan meningkatnya pemakaian daya reaktif. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis *study* dalam perencanaan pemasangan kapasitor *bank* untuk menanggulangi beban induktif. Pada sistem distribusi, jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktif dipikul oleh gardu induk yang disuplai dari generator pada pembangkit listrik, sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, *drop* tegangan, dan bertambahnya rugi-rugi daya.

Analisa *optimal capacitor placement* yang dilakukan dengan menggunakan software ETAP 12.6 metode analisa *load flow Newton-Raphson* dapat menjadi acuan bagi perencanaan maupun koreksi dalam audit sistem tenaga listrik. Penulis mengambil kasus di Line 5 PT Bukit Asam (Persero) Tbk. Dimana kondisi faktor daya masih dibawah nominal SPLN 70-1 yaitu  $>0,85$ . Dari hasil simulasi penulis mendapatkan kesimpulan untuk menambahkan kapasitor *bank* (*VAR set*) pada Bus LV MCC FF1A dan LV MCC FF1B sebesar 994,7 mikro farad atau 50 KVAR dengan menambahkan pemasangan power factor control agar menyesuaikan dengan kondisi beban.

Kata Kunci : Faktor Daya, *Drop* Tegangan, Rugi-Rugi, ETAP 12.6, Kapasitor *Bank*

**ANALISA OPTIMASI PERBAIKAN FAKTOR DAYA DAN  
DROP TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN KAPASITOR  
BANK PADA LINE 5 PT BUKIT ASAM (PERSERO) TBK**

Oleh

**WINDU NUR HARDIRANTO**

**Skripsi**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar  
**SARJANA TEKNIK**

Pada

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2017**

Judul Skripsi

: **ANALISA OPTIMASI PERBAIKAN FAKTOR  
DAYA DAN *DROP* TEGANGAN DENGAN  
MENGUNAKAN KAPASITOR *BAIK* PADA  
*LINE* 5 PT BUKIT ASAM (PERSERO) TBK**

Nama Mahasiswa

: **Windu Nur Hardiranto**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1215031077

Program Studi

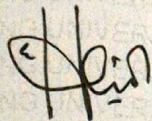
: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

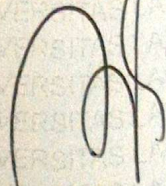


**Herri Gusmedi, S.T., M.T.**  
NIP 19710810 199903 1 003



**Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**  
NIP 19720923 200012 1 002

**2. Ketua Jurusan Teknik Elektro**



**Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.**  
NIP 19731128 199903 1 005

## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

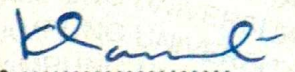
Ketua : **Herri Gusmedi, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**



Penguji  
Bukan Pembimbing : **Khairuddin, S.T., M.Sc., Ph.D., Eng.**



### 2. Dekan Fakultas Teknik



**Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D.**  
NIP 19620717 198703 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **24 Juli 2017**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.



Windu Nur Hardiranto  
NPM 1215031077

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta, pada tanggal 06 Mei 1994, sebagai anak keempat dari empat bersaudara, dari Bapak Suhardiman dan Ibu Widayati (Alm.).

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 1 Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2000 dan diselesaikan pada tahun 2006, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Bekasi, Jawa Barat dari tahun 2006 dan diselesaikan pada tahun 2009, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 4 Bekasi, Jawa Barat dari tahun 2009 dan diselesaikan pada tahun 2012.

Tahun 2012, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur Undanga. Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Teknik Digital dan terdaftar sebagai anggota organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Universitas Lampung sebagai Wakil Ketua HIMATRO periode 2014-2015. Pada Januari 2015 penulis melaksanakan kerja praktik di UPT Perpustakaan Universitas Lampung, dan membuat laporan tentang “Audit Sistem Pencahayaan pada Gedung UPT Perpustakaan Universitas Lampung”. Pada Agustus 2016 Melaksanakan Penelitian di PT. BUKIT ASAM (PERSERO) TBK dengan judul yang ada pada penelitian ini



## PERSEMBAHAN



*Dengan Ridho Allah SWT, teriring shalawat kepada Nabi Muhammad  
Shalallahu Alaihi W assalam Karya tulis ini kupersembahkan untuk:*

*Ayah dan Ibuku Tercinta  
Suhardiman dan Widayati*

*Serta Kakakku Tersayang  
Wita Hardiyanti & Noury Sella Indrawan  
Wido Hardiyono & Bismilta  
Widi Hardiyanto & Rahmawati*

*Keponakan Tersayang  
Mba Hanum, Dede Prasta  
Mba Iha, Fanny  
Kaka Silvi, Icha, Marseil dan Dede Angel*

*Teman-teman kebanggaanku  
Rekan-rekan Jurusan Teknik Elektro*

*Almamaterku  
Universitas Lampung*

*Agamaku  
Islam*

*Bangsa dan Negaraku  
Republik Indonesia*

*Terima-kasih untuk semua yang telah diberikan kepadaku. Jazakallah Khairan.*



## MOTTO

*“Karena Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.*

*Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”*

*(Al-Quran, Surat Al – Insyirah, 94 : 5 – 6)*

*“Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat”*

*(Al-Quran, Surat Al – Mujadilah, 58 : 11)*

*“Apabila manusia telah meninggal dunia maka terputuslah semua amalannya kecuali tiga amalan : shadaqah jariyah, ilmu yang bermanfaat, dan anak sholih yang mendoakan dia.”*

*(HR, Muslim)*

*“Raihlah ilmu, dan untuk meraih ilmu belajarlah untuk tenang dan sabar.”*

*( Umar bin Khatab RA )*

*Angin tidak berhembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji kekuatan akarnya*

*(Ali bin Abi Thalib)*



## SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamiin, penulis memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.

Tugas akhir dengan judul “**ANALISA OPTIMASI PERBAIKAN FAKTOR DAYA DAN *DROP* TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN KAPASITOR *BANK* PADA *LINE* 5 PT BUKIT ASAM (PESERO) TBK**” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Dalam masa perkuliahan dan penelitian, penulis mendapat banyak hal baik berupa dukungan, semangat, motivasi dan banyak hal yang lainnya. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc, Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ardian Ulvan, S.T.,M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Herri Gusmedi, S.T., M.T selaku pembimbing utama skripsi yang telah dengan sabar membimbing, meberikan ilmunya, motivasi dalam hidup dan arahannya di sela-sela kesibukan beliau yang sangat padat.

5. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku pembimbing pendamping yang telah membimbing, memberi ilmunya, cerita inspiratif, arahan spiritual serta sarannya dalam individu menyusun penelitian ini.
6. Bapak Khairuddin, S.T., M.Sc., Ph.D., Eng selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan saran, krikritikan yang sangat membangun dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak Tommy Azhar Palembang, S.T. selaku pembimbing di PT Bukit Asam (Persero) Tbk yang sabar dalam membimbing dan sangat baik dalam membantu, selama penulis membutuhkan bantuan beliau baik data maupun pengetahuannya dalam penyusunan skripsi ini.
8. Segenap dosen dan pegawai di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang tak terlupakan oleh penulis.
9. Ayahanda Suhardiman (Bapak), Ibunda Widayati (Ibu). Tiada terkira jasa yang kalian berikan, hanya doa dan sedikit usaha meraih presatasi sekarang dan kedepannya serta menyelesaikan kewajiban agar terpancar senyum bangga di wajah kalian yang sangat saya impikan.
10. Suadara dan saudari tercinta Mba Wita, Mas Widi dan Mas Wido yang selama ini telah memberikan kasih sayang, semangat, doa, nasihat serta dukungan dalam segala aspek agar selalu istiqomah dalam menuntut ilmu.
11. Teman diskusi saya sekaligus pembimbing diluar dosen saudara Fahrur Riza Priyana, S.T yang menyempatkan waktunya disela-sela kerjanya untuk berdiskusi dengan penulis.
12. Teman seperjuangan dari awal sampai akhir saudara Guntur Nanda Prakasa,S.T, Zaki Mubarak, A.Md.Pet dan Eldineri Zulkarnain, S.P terimakasih atas semua jasa dan persahabatan karena allah swt.
13. Teman dan rekan seperjuangan laboratorium Sistem Tenaga Elektrik (Aji Irawan, Surya Andika, Ahmad Wira, Agung Sulton, Ubaidah, Annisa Zauhar, Fandy, Fitra,

Ferdy, Dedi, Yogi) terimakasih atas cerita, tawa, berbagi ilmu, pengalaman dan silaturahmi

14. Mas Rahman sang dosen sekaligus penguasa lab kedua setelah para Dosen, terimakasih mas untuk ilmu, kopi, gula, dan tehnya.
15. Teman di Unila Robotika dan Otomasi (URO) (Rizki, Didi, Faizal, angkatan 2013, 2014) Kemudian Dosen (Pak Yulianto (alm), Pak Mona, Pak Ardian, Pak Alam) dan mungkin yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu atas segala kesempatan untuk menuntut ilmu serta berkontribusi.
16. Teman-teman keluarga besar ELANG (Elektro Angkatan) 2012 terimakasih atas segala yang telah diberikan.
17. Teman seperjuangan sampai sampai akhir perkuliahan, saudari Zahidah Sholehah, S.T dalam susah maupun senang, suka dan duka. Dukungan dalam segala hal, canda tawa yang ga akan pernah ada jika ga ketemu beliau. *Thanks for everything and Hope that's always been her.*

Penulis meminta maaf atas segala kesalahan dan ketidaksempurnaan dalam penyusunan tugas akhir ini. Saran dan kritik membangun sangat diharapkan penulis demi kebaikan di masa yang akan datang. Terimakasih

Bandar Lampung, 24 Juli 2017

Penulis,

**Windu Nur Hardiranto**

## DAFTAR ISI

	halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	i
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	iv
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penelitian .....	2
1.3. Perumusan Masalah .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Manfaat .....	4
1.6. Hipotesis .....	4
1.7. Sistematika Penulisan .....	5
<b>II. TINJUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Beban.....	6
2.2 Daya.....	8
2.3 Faktor Daya .....	10
2.4 Diagram Fasor .....	11
2.5 Penggunaan <i>Capacitor Bank</i> pada Industri .....	16
2.5.1 <i>Series Capacitor</i> (Kapasitor Seri).....	16
2.5.2 <i>Shunt Capacitor</i> ( Kapasitor Paralel).....	17
2.5.3 Model <i>Capacitor Bank</i> Pada Sistem Distribusi.....	18
<b>III.METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	22

3.2	Alat dan Bahan .....	22
3.3	Metode Penelitian .....	23
3.3.1	Studi Literatur .....	23
3.3.2	Studi Bimbingan .....	23
3.3.3	Pengambilan Data .....	23
3.3.4	Pembuatan Laporan .....	23
3.4	Diagram Alir Penelitian .....	24
3.5	Analisis Data Pembebanan <i>Line 5</i> PT Bukit Asam (Persero) Tbk.....	25
3.6	Diagram Alir perhitungan.....	35

#### **IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Data <i>Line 5</i> PT Bukit Asam (Persero) Tbk .....	36
4.2	Skenario Simulasi .....	37
4.3	Hasil Simulasi .....	38
4.3.1	Kondisi Eksisting <i>Line 5</i> .....	39
4.3.2	Perbandingan Sebelum Optimasi dan Setelah Optimasi.....	40
4.4	Profil Tegangan Hasil Simulasi .....	40
4.5	Profil Faktor Daya Hasil Simulasi .....	42
4.6	Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif dan Reaktif .....	44

#### **V. KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan .....	46
5.2	Saran.....	48

#### **DAFTAR PUSTAKA**

#### **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Tabel admitansi bus.....	27
3.2 Persamaan Jacobian Satu Fasa Polar.....	31
4.1 Profil Daya Aktif, Reaktif dan Rugi-Rugi .....	40



## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Gelombang Arus dan Tegangan Pada Beban Induktif .....	7
2.2 Gelombang Arus dan Tegangan Pada Beban Kapasitif .....	8
2.3 Segitiga Daya .....	9
2.4 Gelombang Sinus pada Faktor Daya <i>Lagging</i> .....	10
2.5 Gelombang Sinus pada Faktor Daya <i>Leading</i> .....	11
2.6 Diagram Fasor pada Komponen R, L, C.....	12
2.7 Komponen Fasor pada Beban Induktif .....	12
2.8 Komponen Fasor pada Beban Kapasitif.....	13
2.9 Komponen Fasor pada Beban Resistif .....	13
2.10 Diagram Fasor Generator pada Beban Kapasitif .....	14
2.11 Diagram Fasor Generator pada Beban Induktif .....	14
2.12 Arah Perputaran Fasor pada Beban Induktif .....	15
2.13 Arah Perputaran Fasor pada Beban Kapasitif .....	15
2.14 Kurva Kompensasi Reaktansi Induktif dengan Pemasangan Kapasitor Seri.....	16
2.15 Kurva Kompensasi Arus Kapasitor Untuk Mereduksi <i>Voltage Drop</i> .....	17
2.16 <i>Capacitor Bank</i> Satu Fasa.....	19
2.17 Konfigurasi Capacitor Bank Hubung Delta .....	20
2.18 Konfigurasi Capacitor Bank Hubung Bintang .....	20
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	24
3.2 Diagram Alir Perhitungan .....	35
4.1 Profil Tegangan Kondisi Beban Puncak .....	40
4.2 Profil Tegangan Kondisi Unloading (Bongkar).....	41
4.3 Profil Tegangan Kondisi Loading (Muat).....	41

4.4	Profil Tegangan Kondisi Tidak Loading maupun Unloading.....	41
4.5	Profil Faktor Daya Beban Puncak.....	42
4.6	Profil Faktor Daya Unloading (Bongkar) .....	42
4.7	Profil Faktor Daya Loading (Muat) .....	43
4.8	Profil Faktor Daya Tidak Loading maupun Unloading .....	43
4.9	Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif.....	44
4.10	Perbandingan Rugi-Rugi Daya Reaktif.....	44

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Meningkatnya pertumbuhan industri berdampak pada bertambahnya pertumbuhan beban dalam sistem tenaga listrik. Pertumbuhan beban tersebut diikuti dengan meningkatnya daya reaktif akibat beban induktif pada bus beban maupun pada saluran yang menyebabkan meningkatnya pemakaian daya reaktif. Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan dalam melakukan analisis *study* pemasangan kapasitor *bank* untuk menanggulangi beban induktif. Pada sistem distribusi, jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh gardu induk yang tersuplai dari generator pada pembangkit listrik, sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, *drop* tegangan, dan bertambahnya rugi-rugi daya.

Berdasarkan permasalahan tersebut, beberapa cara yang efektif dan efisien dipilih untuk mendapatkan nilai yang optimum pada sistem tenaga listrik yaitu diantaranya adalah optimasi daya reaktif dengan cara membangun generator baru, pengaturan tap trafo, instalasi *auto voltage regulator*, dan instalasi kapasitor *bank*. Beberapa cara atau metode untuk memperbaiki jatuh tegangan pada suatu

penyulang atau bus yaitu dengan mempeerbesar kawat penampang, mengubah seksi penyulang dari satu fasa ke sistem tiga fasa, pengiriman beban melalui penyulang yang baru.<sup>[1]</sup>

Dari ketiga metode diatas menunjukkan tidak efektifnya insfrastruktur maupun jika dilihat dari segi biaya. Adapun metode lain yang memungkinkan untuk bekerja lebih efektif yaitu dengan menggunakan kapasitor *bank* (pembangkit daya reaktif) baik penggunaan secara paralel maupun seri.

Pada penelitian ini diambil permasalahan yang terjadi pada *line* 5 PT Bukita Asam (Persero) Tbk. Dimana kondisi faktor daya masih dibawah SPLN 70-1 dimana besaran yang ditentukan  $>0,85$  dan tegangan jatuh yang diatur pada SPLN 1 1995 dimana besaran yang ditentukan  $-10\%$   $+5\%$ .

## 1.2. Tujuan

Tujuan tugas akhir ini yaitu:

1. Untuk mengetahui optimasi kapasitas dan peletakan kapasitor *bank* pada beban yang ada di *line* 5 PT Bukit Asam (Persero) Tbk.
2. Untuk mengetahui pengaruh optimasi daya reaktif terhadap profil jatuh tegangan yang mengacu pada standar tegangan jatuh yang diatur pada SPLN 1 1995 dimana besaran yang ditentukan  $-10\%$   $+5\%$ .<sup>[2]</sup>
3. Untuk mengetahui pengaruh optimasi daya reaktif terhadap profil faktor daya yang mengacu pada SPLN 70-1 dimana besaran yang ditentukan  $>0,85$ .<sup>[3]</sup>

### 1.3. Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tugas akhir ini terkait dengan nilai tegangan pada setiap *bus* sistem distribusi yang perlu dijaga yaitu +5% dan -10% dan faktor daya >85%. Oleh, karena itu perlu dilakukan studi analisa optimasi daya reaktif untuk mendapatkan solusi dari permasalahan tersebut, yaitu dengan menggunakan kapasitor *bank* dan pembangunan generator baru. Tugas akhir ini mengakomodir penggunaan kapasitor *bank* dengan adanya pertimbangan biaya investasi dan operasional. Optimalisasi yang dilakukan menghasilkan nilai besaran kapasitor dalam bilangan *real* sehingga sering tidak ada kesesuaian dengan besaran kapasitor yang tersedia oleh produsen kapasitor. Oleh karena hal tersebut, maka penulis melakukan perhitungan menyesuaikan hasil optimalisasi dengan kapasitor yang tersedia atau di produksi oleh produsen pada umumnya.

### 1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini yaitu:

1. Metode perhitungan aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson* dalam bentuk persamaan polar.
2. Tidak membahas gangguan yang terjadi di sistem tenaga dan harmonisa.
3. *Software* yang digunakan untuk membuat simulai optimasi daya reaktif adalah ETAP 12.6.
4. Tidak membahas sistem proteksi dan harmonisa pada kapasitor.
5. Penelitian hanya membahas pengaruh kapasitor terhadap profil tegangan,  $\cos \phi$  dan aliran daya pada sistem yang digunakan.
6. Tidak membahas instalasi pemasangan dan konfigurasi *capacitor bank* pada sistem distribusi radial tiga fasa.

### 1.5. Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan pemahaman kepada penulis mengenai studi analisa optimasi daya reaktif sebagai studi perencanaan dalam mengatasi permasalahan jatuh tegangan dan  $\cos \phi$  pada industri agar dapat sesuai dengan nilai-nilai standar yang berlaku.
2. Sebagai referensi dalam pengambilan rencana pembangunan infrastruktur kedepannya khususnya dibidang *electrical* bagi PT Bukit Asam (Persero) Tbk.

### 1.6. Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah dengan melakukan perhitungan *optimal capacitor placement* dengan data beban, pembangkit serta kapasitor eksisting yang telah didapatkan dari PT Bukit Asam (Persero) Tbk. Penelitian ini dilakukan pada *line 5* (*line* yang terakhir dibangun) dikarenakan penggunaan kapasitor *bank* yang terbilang baru serta *output* factor daya dan tegangan yang masih terbilang dibawah standard yang ditentukan yaitu pada standar tegangan jatuh yang diatur pada SPLN 1 1995 dimana besaran yang ditentukan -10% +5% dan profil faktor daya yang mengacu pada SPLN 70-1 dimana besaran yang ditentukan  $>0,85$ . simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 12.6 dalam melakukan analisa *load flow* dan *optimal capacitor placement* dengan metode algoritma genetika yang ada pada *software* tersebut, serta penentuan besaran yang dibutuhkan pada setiap bus beban serta dampak perubahan ketika sebelum dan setelah optimasi telah dilakukan

## **1.7. Sistematika Penulisan**

Laporan akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu:

### **BAB I. PENDAHULUAN**

Pada bab ini memaparkan latar belakang, masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

### **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

### **BAB III. METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian yang digunakan, serta pelaksanaan dan pengamatan penelitian.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Beban<sup>[4]</sup>

Beban listrik didefinisikan sebagai jumlah listrik yang digunakan oleh masyarakat. Beban listrik dapat dibagi menjadi beban seimbang dan beban tidak seimbang. Pada beban seimbang jumlah daya yang dibangkitkan oleh generator tiga fasa atau daya yang diserap oleh beban tiga fasa, diperoleh dengan menjumlahkan daya dari tiap-tiap fasa. Pada sistem yang seimbang, daya total tersebut sama dengan tiga kali daya fasa, karena daya pada tiap-tiap fasanya sama. Pada listrik arus DC (arus searah) besar beban induktif dan beban kapasitif tidak berpengaruh terhadap rangkaian, sehingga yang menjadi beban hanya beban resistif murni saja. Kemudian pada rangkaian arus AC (Bolak-balik), beban kapasitif dan induktif akan memberi pengaruh ke rangkaian, sehingga beban yang bekerja yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Berikut adalah pengertian dari beban resistif, kapasitif, dan induktif.

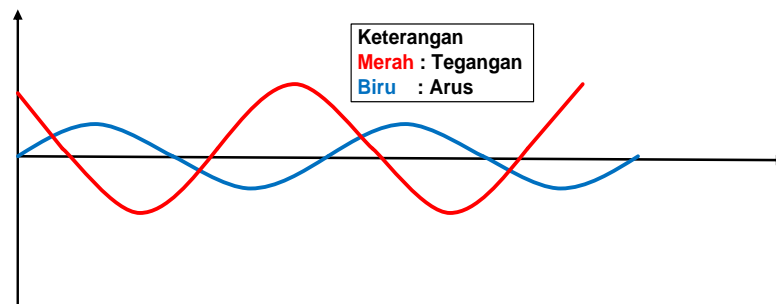
#### 1. Beban Resistif

Beban resistif dihasilkan dari rangkaian yang terdiri dari penghambat berupa resistor murni. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan sama sekali tidak menyerap beban reaktif. Pada beban resistif arus dan tegangan akan sefasa.



## 2. Beban Induktif

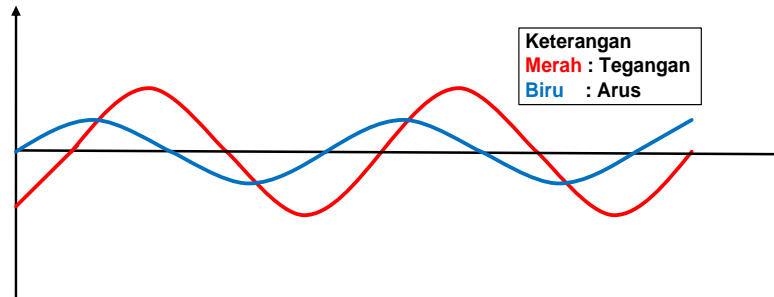
Beban induktif adalah beban yang menyerap daya aktif dan daya reaktif dengan faktor daya *lagging*, yaitu saat tegangan mendahului arus sebesar sudut  $\theta$ . Beban induktif dihasilkan dari komponen-komponen listrik yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada inti besi. Contoh peralatan listrik yang merupakan beban induktif adalah motor-motor dan transformator. Beban induktif dihasilkan dari rangkaian yang mengandung komponen pasif, berupa induktor. Berikut adalah gambar gelombang pada beban induktif.



**Gambar 2.1.** Gelombang arus dan tegangan pada beban induktif.

## 3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif adalah beban yang mengandung komponen pasif, yaitu kapasitor. Beban kapasitif menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Bentuk gelombang dari beban kapasitif adalah arus mendahului tegangan. Berikut adalah gelombang yang dihasilkan pada beban kapasitif.



**Gambar 2.2.** Gelombang arus dan tegangan pada beban kapasitif.

Pada beban listrik tiga fasa seimbang, besar perbedaan sudut fasa antara tiap fasanya adalah  $120^\circ$ .

## 2.2. Daya<sup>[5]</sup>

Daya merupakan jumlah energi listrik tiap satuan waktu. Daya listrik dibagi menjadi tiga, yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. Berikut adalah penjelasan dari ketiga daya tersebut:

### 1) Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang sebenarnya digunakan oleh konsumen. Daya aktif memiliki satuan Watt. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan besar daya aktif:

- Daya Aktif 1 Fasa

$$P = V.I. \cos \varphi \quad (2.1)$$

- Daya Aktif 3 Fasa

$$P = \sqrt{3} \cdot V.I. \cos \varphi \quad (2.2)$$

### 2) Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet. Daya aktif diberi simbol  $Q$ , sedangkan satuan daya reaktif adalah

Var (*Volt Ampere Reactive*). Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan daya reaktif:

- Daya Reaktif 1 Phasa

$$Q = V.I.\sin \varphi \quad (2.3)$$

- Daya Reaktif 3 Phasa

$$Q = \sqrt{3}.V. I \sin \varphi \quad (2.4)$$

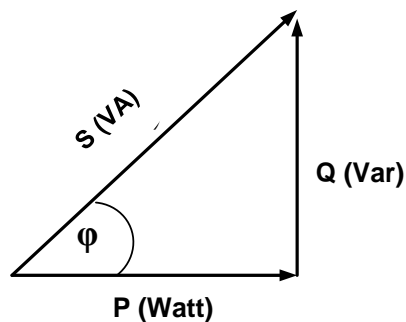
### 3) Daya Semu

Daya semu merupakan daya yang dibangkitkan oleh generator pada sistem pembangkit listrik. Daya semu diberi simbol  $S$  dan memiliki satuan VA (*Volt Ampere*). Daya semu terdiri dari daya aktif dan daya reaktif.

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan daya semu tiga fasa adalah:

$$S = \sqrt{3}.V. I \quad (2.5)$$

Ketiga daya tersebut digambarkan dengan segitiga daya. Berikut adalah segitiga daya tersebut:



**Gambar 2.3.** Segitiga Daya.

Segitiga daya merupakan suatu ilustrasi yang menggambarkan hubungan matematis antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Daya aktif berada dalam komponen

horizontal, daya reaktif berada pada posisi vertikal, sedangkan daya semu merupakan sisi miring phitagoras yang dibentuk antara daya aktif dan daya reaktif.

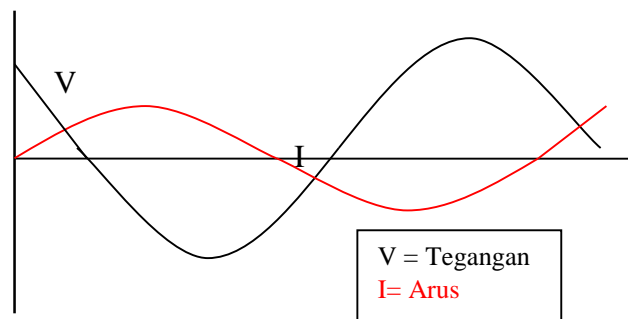
### 2.3. Faktor Daya<sup>[6]</sup>

Faktor daya merupakan cosinus dari beda sudut fasa antara arus dan tegangan. Faktor daya disimbolkan dengan  $\cos \phi$  dan mempunyai rentang nilai antara 0 sampai 1. Semakin mendekati 1 maka nilai faktor daya akan semakin baik. Kemudian untuk mencari nilai faktor daya dapat dilakukan dengan membagi daya aktif (P) dengan daya semu (S). Faktor daya dibagi menjadi dua yaitu faktor daya tertinggal (*lagging*) dan faktor daya mendahului (*leading*).

Berikut adalah penjelasan mengenai kedua faktor daya tersebut:

#### a) Faktor Daya Tertinggal (*lagging*)

Faktor daya *lagging* menunjukkan kondisi disaat beban bersifat induktif dan memerlukan daya reaktif dari jaringan. Nilai  $\cos\phi$  pada kondisi *lagging* akan bernilai positif. Kemudian pada gelombang sinus, arus (I) akan tertinggal dengan tegangan (V) atau tegangan (V) akan mendahului arus (I) dengan sudut  $\phi$ . Berikut adalah gelombang sinus pada faktor daya *lagging* :

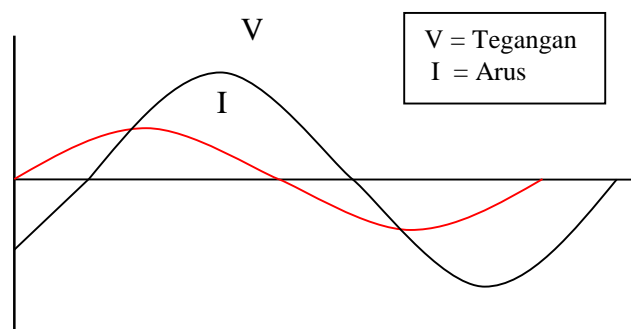


**Gambar 2.4.** Gelombang Sinus pada Faktor Daya *Lagging*.

b) Faktor Daya Mendahului (*leading*)

Faktor daya *leading* menunjukkan kondisi disaat beban bersifat kapasitif dan memberikan daya reaktif ke jaringan. Nilai  $\cos \phi$  pada kondisi *leading* akan bernilai negatif. Kemudian pada gelombang sinus, Arus (I) akan mendahului tegangan (V) atau tegangan (V) akan tertinggal terhadap arus (I) sebesar sudut  $\phi$ .

Berikut adalah gambar gelombang sinus pada faktor daya *leading*:

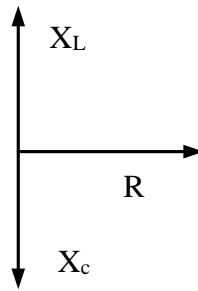


**Gambar 2.5.** Gelombang Sinus pada Faktor Daya *Leading*.

#### 2.4. Diagram *Fasor*<sup>[7]</sup>

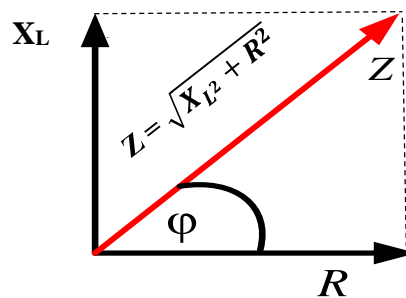
Diagram *fasor* adalah diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran tegangan dan arus. Besar dan arah diagram *fasor* tergantung dari kondisi beban. Ketika beban cenderung induktif maka diagram *fasor* akan cenderung mengarah ke atas, sementara ketika kondisi beban cenderung kapasitif maka diagram *fasor* akan cenderung mengarah ke bawah, dan ketika kondisi beban resistif maka diagram *fasor* akan berada pada sumbu-X.

Berikut adalah gambar diagram *fasor* selengkapnya.

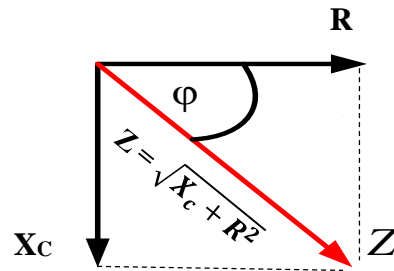


**Gambar 2.6.** Diagram *Fasor* pada Komponen R, L, C.

Gambar 2.8 menunjukkan arah *fasor* pada komponen R, L, dan C. Komponen R merupakan komponen *fasor* pada beban resistif, sedangkan komponen L merupakan komponen *fasor* pada beban induktif, dan C menunjukkan komponen pada beban kapasitif. Pada saat beban cenderung induktif maka besar komponen arah L akan lebih besar daripada komponen arah C sehingga vektor pada *fasor* akan cenderung mengarah miring ke atas. Kemudian saat beban cenderung bersifat kapasitif maka besar komponen C akan lebih besar daripada komponen arah L sehingga *fasor* akan miring ke bawah. Terakhir saat beban bersifat resistif maka komponen L dan C akan sama besar sehingga *fasor* akan memiliki arah lurus pada sumbu-X.



**Gambar 2.7.** Komponen *Fasor* pada Beban Induktif.



**Gambar 2.8.** Komponen *Fasor* pada Beban Kapasitif.



**Gambar 2.9.** Komponen *Fasor* pada Beban Resistif.

Berdasarkan gambar 2.6 , 2.7 , 2.8 dan 2.9 dapat dilihat komponen *fasor* saat kondisi beban induktif, kapasitif, dan resistif serta dapat dihitung total impedansinya. Saat beban induktif nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ) akan lebih besar dibanding reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) sehingga arah vektor impedansi akan cenderung ke atas. Kemudian saat beban cenderung kapasitif maka nilai reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) akan lebih besar dibanding nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ) sehingga vektor impedansi akan cenderung mengarah ke bawah. Terakhir saat beban bersifat resistif nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ) akan sama dengan nilai reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) sehingga arah impedansi akan sama dengan arah hambatan pada resistor keadaan ini dapat disebut sebagai resonansi.

Nilai reaktansi induktif ( $X_L$  ), reaktansi kapasitif ( $X_C$ ), dan impedansi ( $Z$ ), dapat dicari berdasarkan persamaan:

$$X_L = \omega.L = 2\pi f . L \quad (2.6)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (2.7)$$

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.8)$$

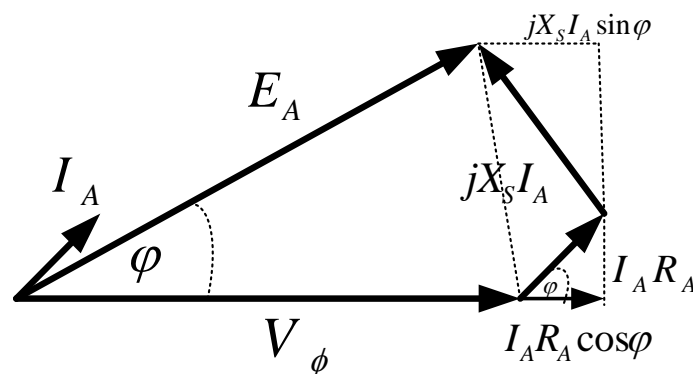
Dimana :  $\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)

$f$  = frekuensi (Hz)

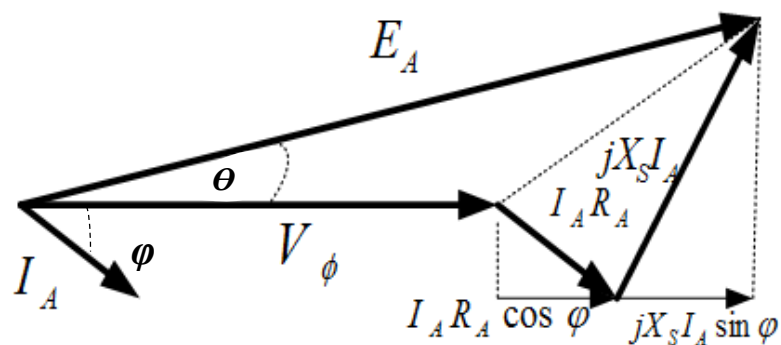
$L$  = Induktansi (H)

$C$  = Kapasitas kapasitor (F)

Diagram *fasor* juga dapat digambarkan dengan memperhatikan bentuk *fasor* pada sistem pembangkitan terutama pada generator. Berikut adalah gambar selengkapnya.



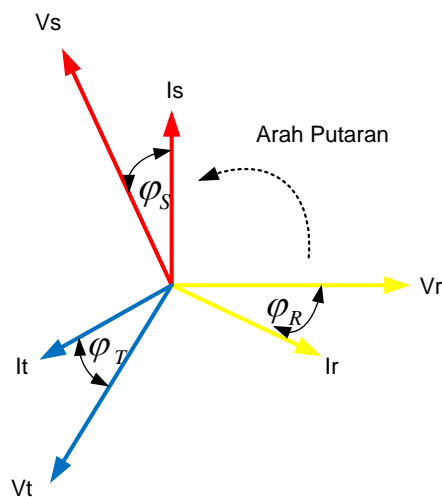
**Gambar 2.9.** Diagram *Fasor* Generator pada Beban Kapasitif.



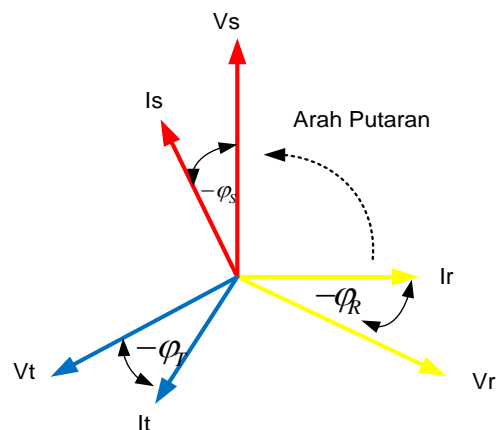
**Gambar 2.10.** Diagram *Fasor* Generator pada Beban Induktif.



Selain memiliki diagram, *fasor* juga memiliki arah putaran. Arah putaran yang digunakan adalah berlawanan jarum jam atau mengikuti arah perputaran kuadran satu sampai kuadran empat. Pada beban yang cenderung bersifat induktif sudut fasa antara arus dan tegangan akan bernilai positif sedangkan pada beban yang cenderung bersifat kapasitif sudut fasa antara arus dan tegangan akan bernilai negatif. Berikut adalah arah perputaran *fasor* pada kondisi beban bersifat induktif dan kapasitif:



**Gambar 2.11.** Arah Perputaran *Fasor* Pada Beban Induktif.

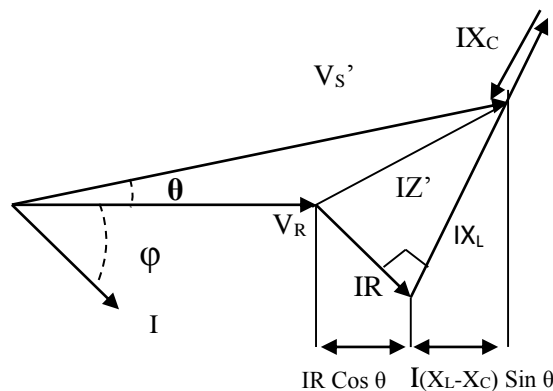


**Gambar 2.12.** Gambar arah putaran *fasor* pada beban kapasitif.

## 2.5. Penggunaan *Capacitor Bank* pada Industri<sup>[8]</sup>

### 2.5.1. *Series Capacitor* (Kapasitor Seri)

*Series Capacitor* (Kapasitor Seri) merupakan kapasitor yang terpasang seri dengan saluran. Penggunaan kapasitor seri untuk mengkompensasi reaktansi induktif. Pada kurva gambar 2.13 dapat ditunjukkan bahwa kapasitor yang merupakan reaktansi negatif dan akan mengurangi reaktansi induktif yang bernilai positif. Sehingga penggunaan kapasitor seri dapat meminimisasi tegangan jatuh yang disebabkan oleh reaktansi induktif saluran dan menaikkan tegangan.



**Gambar 2.13.** Kurva Kompensasi Reaktansi Induktif dengan Pemasangan Kapasitor Seri.

Secara umum persamaan voltage drop setelah adanya kompensasi kapasitor seri dapat ditunjukkan pada persamaan (2.9).

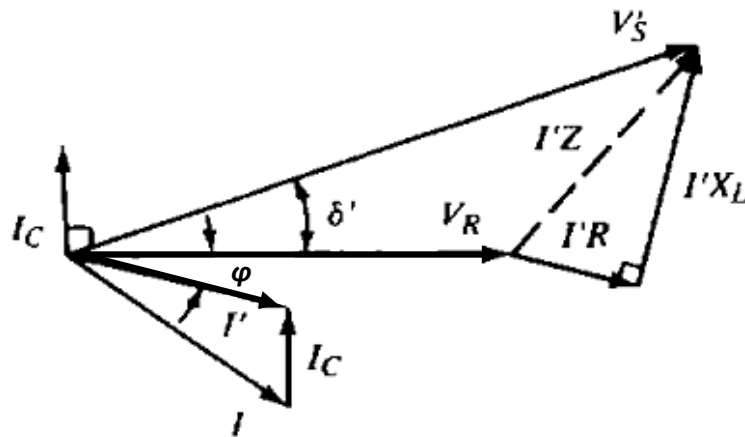
$$V_D = IR \cos \varphi + I(X_L - X_C) \sin \varphi \quad (2.9)$$

Namun pemilihan kapasitas dari kapasitor seri yang terlalu besar dibandingkan nilai kompensasi reaktansi induktif yang diinginkan, maka akan menyebabkan mudah terjadi *over compensation* sehingga sistem akan mengalami *leading power factor*. Selain itu pemasangan kapasitor seri akan menyebabkan adanya fero resonansi pada transformer, resonansi *subsynchronous* selama *starting* pada beban motor, dan

sulitnya pemasangan sistem proteksi untuk kapasitor seri, maka penerapan dari kapasitor seri jarang digunakan pada sistem distribusi.

### 2.5.2 Shunt Capacitor (Kapasitor Pararel)

*Shunt Capacitor* (Kapasitor Pararel) merupakan kapasitor yang terpasang secara pararel dengan saluran, dan sering diterapkan pada sistem distribusi karena dapat mengatasi *voltage drop*, mengurangi rugi-rugi daya, dan memperbaiki nilai faktor daya, serta mudah diterapkan sistem proteksi. Penggunaan kapasitor pararel dapat memberikan kompensasi daya reaktif kepada beban. Pada kurva gambar 2.14 menunjukkan arus yang diinjeksikan oleh kapasitor pararel mampu mengubah vektor arus ke arah *leading* sehingga *voltage drop* akibat beban induktif saluran dapat teratasi dan tegangan pada beban tetap terjaga pada kondisi yang diinginkan.



**Gambar 2.14.** Kurva Kompensasi Arus Kapasitor Untuk Mereduksi *Voltage Drop*

Persamaan (2.10) menunjukkan reduksi *voltage drop* dengan pemasangan kapasitor pararel, sehingga tegangan yang dinaikkan oleh kapasitor pararel dapat ditunjukkan pada persamaan (2.11).

$$V_D = I_R R + I_L X_L - I_C X_C \quad (2.10)$$

$$V_{RISE} = I_C X_L \quad (2.11)$$

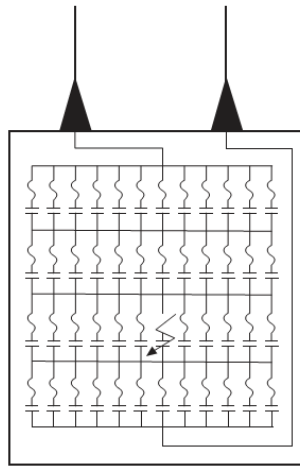
### 2.5.3. Model *Capacitor Bank* pada Sistem Distribusi

*Capacitor Bank* merupakan suatu kapasitor yang terdiri lebih dari satu unit kapasitor yang saling terhubung paralel maupun seri untuk menginjeksikan daya reaktif ke sistem tenaga listrik sehingga meminimisasi adanya *voltage drop* dan rugi-rugi daya. Pada sistem distribusi, jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh gardu induk yang tersuplai dari generator pada pembangkit listrik, sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, *voltage drop*, dan bertambahnya rugi-rugi daya. Sehingga dengan adanya pemasangan *capacitor bank* mampu memperbaiki kualitas dan stabilitas sistem pada kondisi yang baik.

Model *capacitor bank* yang digunakan pada sistem distribusi diantaranya adalah *fixed capacitor bank* dan *automatic capacitor bank*. Perbedaan dari kedua model *capacitor bank* ini yaitu, pada *automatic capacitor bank* memiliki kemampuan men-*switching* setiap unit kapasitor maupun setiap segmen kapasitor yang ada didalamnya sehingga penentuan kapasitas daya reaktif yang diinjeksikan dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, sedangkan *fixed capacitor bank* hanya memiliki kemampuan injeksi besaran daya reaktif yang tetap.

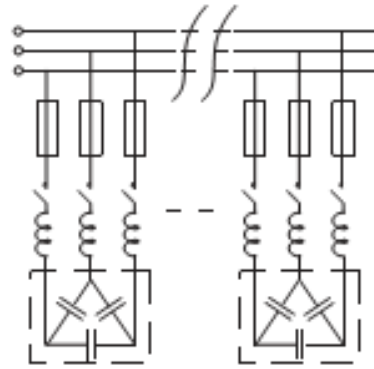
Sedangkan berdasarkan konfigurasinya, *capacitor bank* terdiri dari satu fasa dan tiga fasa. *Capacitor bank* satu fasa memiliki unit-unit kapasitor yang saling terhubung paralel dalam satu segmen, setiap segmen kapasitor dapat saling terhubung seri atau paralel sesuai kebutuhan, hal tersebut juga dimiliki oleh

*Capacitor bank* tiga fasa. Namun *capacitor bank* tiga fasa memiliki konfigurasi belitan delta dan bintang (*star/wye*) sesuai kebutuhan dari penggunaan kapasitor. *Capacitor bank* satu fasa dapat dilihat pada gambar 2.18. yang memiliki dua terminal *output*, yaitu terminal yang terhubung dengan fasa dan terminal yang terhubung dengan netral.

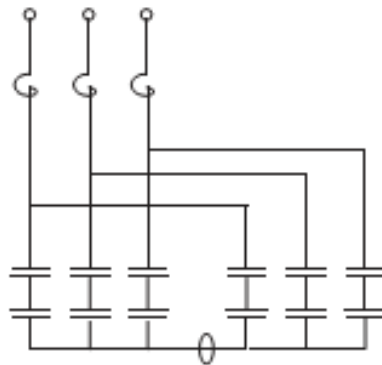


**Gambar 2.15.** *Capacitor Bank* Satu Fasa.

Pada gambar 2.18. dan 2.19. masing-masing menunjukkan konfigurasi *Capacitor bank* tiga fasa hubung delta dan bintang (*star/wye*). Kedua belitan tersebut masing-masing memiliki tiga terminal output yang terhubung pada masing-masing fasa R, S, T. Secara umum *capacitor bank* dengan konfigurasi belitan delta digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada beban motor tiga fasa sehingga penggunaannya banyak ditemukan di dunia industri, sedangkan *capacitor bank* dengan konfigurasi belitan bintang (*star/wye*) digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada sistem tenaga listrik tingkat distribusi maupun transmisi.



**Gambar 2.16.** Konfigurasi *Capacitor Bank* Hubung Delta.



**Gambar 2.17.** Konfigurasi *Capacitor Bank* Hubung Bintang (*Wye/Star*).

## 2.6. Software ETAP ( *Electrical Transient and Analysis Program* )<sup>[9]</sup>

*Software* ETAP merupakan suatu perangkat lunak yang dapat melakukan penggambaran *single line diagram* secara grafis dan mengadakan beberapa analisa atau studi yaitu *Load Flow* (aliran daya), *Short Circuit* (hubung singkat), motor starting, harmonisa *transient stability*, *protective device coordination*, dan *cable derating*. Sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat dirubah langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP adalah sebagai berikut:

1. *One line diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen atau peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
2. *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail atau lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi atau analisa.
3. *Standard* yang digunakan biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode-metode yang digunakan.
4. *Study case*, berisikan parameter-parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Waktu dan Tempat**

Waktu pengerjaan tugas akhir ini adalah dimulai pada bulan September 2016, bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik (STE) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung dan PT Bukit Asam (Persero) Tbk.

#### **3.2. Alat dan Bahan**

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Satu unit Laptop dengan spesifikasi *Intel Core I5, processor 4 GHz*, dan sistem operasi *Windows 7 Pro 64 bit* sebagai media perancangan dan pengujian simulasi.
2. Perangkat lunak ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) 12.6 sebagai perangkat lunak utama dalam perancangan dan perhitungan simulasi penelitian ini yang telah terinstal di *unit* laptop.
3. Data pembangkit, bus beban, serta data pembebanan dan saluran distribusi pada *line 5* PT Bukit Asam (Persero) Tbk.
4. Microsoft Office (Excel 2013, word 2013) sebagai pengolah dan perhitungan data serta pembuatan laporan dari hasil simulasi dan perhitungan.



### **3.3. Metode Penelitian**

Penyelesaian tugas akhir ini ada beberapa langkah kerja yang dilakukan, yaitu :

#### **3.3.1. Studi Literatur**

Studi literatur dimaksudkan untuk mempelajari berbagai sumber referensi atau teori yang berkaitan dengan tugas akhir ini.

#### **3.3.2. Studi Bimbingan**

Studi bimbingan berupa tanya jawab dengan dosen pembimbing mengenai hal-hal yang dirasa sulit selama mengerjakan tugas akhir.

#### **4.3.3. Pengambilan Data**

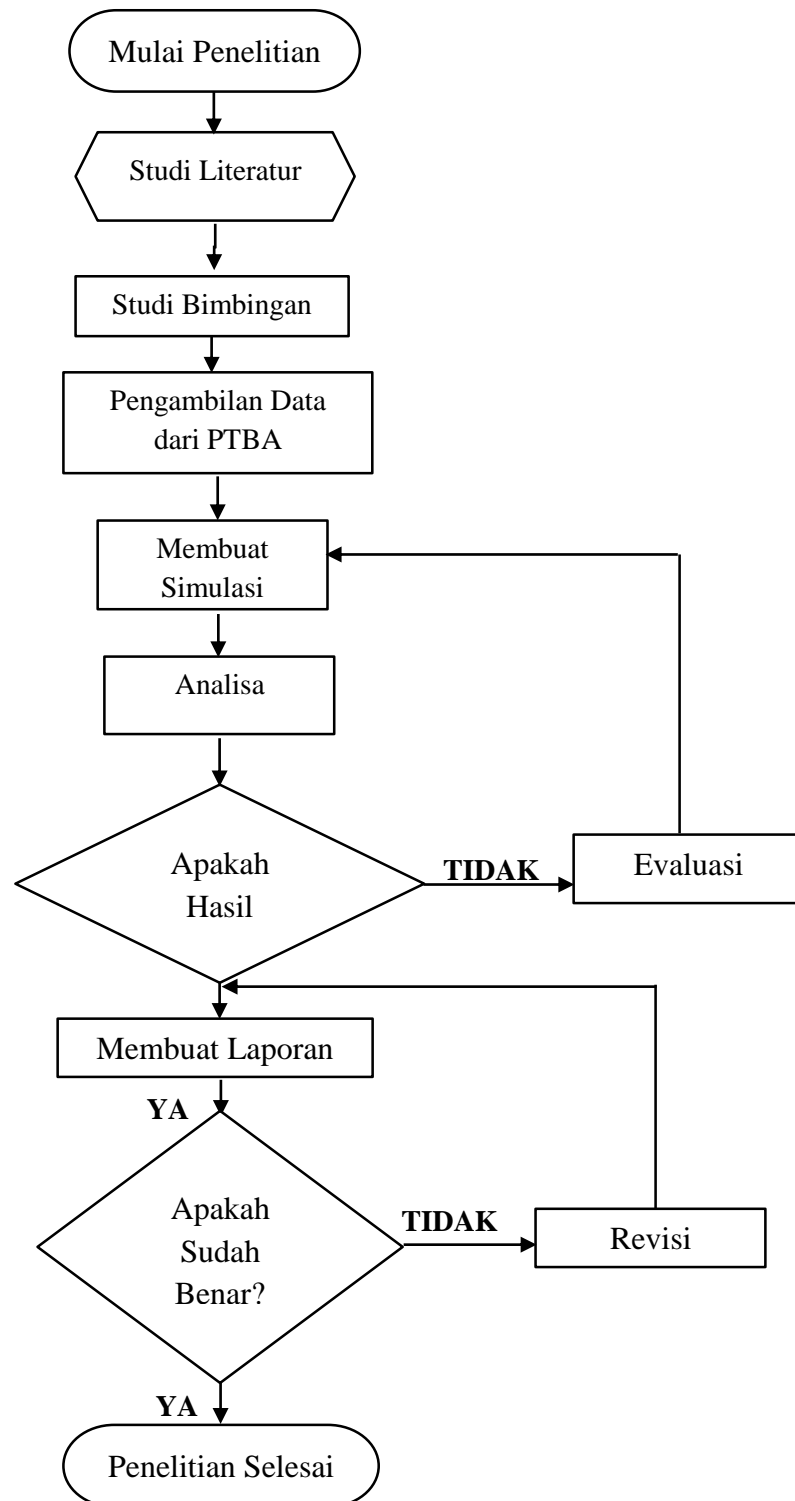
Pengambilan data pada tahap ini dimaksudkan untuk mengamati data yang akan di analisis. Data yang akan di ambil dan digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Data *real* pembebanan dari beban puncak industri yang didapatkan dari PT Bukit Asam (Persero) Tbk. dari pengukuran terbaru oleh perusahaan.
2. Data simulasi dengan menggunakan *software* ETAP
3. Data konsumsi energi pada PT. Bukit Asam

#### **3.3.4 Pembuatan Laporan**

Tahap ini berfungsi untuk menuliskan hasil yang telah didapat dan sebagai sarana pertanggung jawaban terhadap penelitian yang telah dilakukan. Laporan dibagi kedalam dua tahap, yaitu laporan awal yang digunakan untuk seminar usul dan laporan akhir yang digunakan untuk seminar hasil.

### 3.4. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

### 3.5. Analisis Data Pembebanan *Line 5* PT Bukit Asam (Persero) Tbk

#### 3.6.1. Analisis Data

Analisis data yang akan dilakukan adalah dengan membuat simulasi aliran daya listrik pada line 5 PT Bukit Asam (Persero) Tbk. Analisis dilakukan dengan mengambil data pembebanan dan kapasitas generator, trafo maupun kapasitas kapasitor *bank*. Berikut adalah sistematika analisis data dengan ETAP:

a. Menghitung Daya dari Data Pembebanan Industri

Penggunaan energi listrik PT. Bukit Asam menggunakan beberapa peralatan listrik. Peralatan listrik utama yang digunakan untuk transaksi energi listrik adalah Generator PLTU milik Bukit Asam yang berjumlah dua unit sebesar 2 x 8 MW dengan Beban motor induksi 3 fasa yang paling banyak digunakan milik PT. Bukit Asam khususnya pada *phase 5*. Kemudian Gardu Induk, Diesel Sewatama dan tiga buah penyulang yang merupakan milik PT. PLN yang digunakan apabila terjadi *blackout* atau gangguan pada generator milik PLTU Bukit Asam. Dikarenakan data yang diperoleh adalah berupa energi maka untuk menghitung daya listrik dihitung dengan memasukan total pembebanan, pada kasus ini pembebanan berupa motor induksi 3 fasa kemudian memasukan data pada beberapa kondisi yaitu pada saat beban puncak (bongkar muat) dan pada saat sedang tidak bongkar muat dari data pembebanan yang didapatkan, dan memasukannya ke dalam analisis.

b. Melakukan perhitungan aliran daya beban 3 fasa setimbang dengan langkah sebagai berikut :

1. Memasukkan data yang ada ke dalam proses analisis.
2. Membentuk Matriks admitansi bus ( $Y_{abc}$ ).

Dalam perhitungan studi aliran daya, matriks admitansi diperoleh dari besarnya hambatan pada saluran. Pada sistem tiga fasa akan terdapat tiga buah variabel yaitu a menunjukkan fasa a, b menunjukkan fasa b, dan c menunjukkan fasa c. Sehingga untuk persamaan matriks impedansi jaringan 3 fasa yang saling terhubung antara bus i dan j adalah :

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} \\ Z_{ji} & Z_{jj} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Keterangan:

$Z_{ij}, Z_{ji}$  : Bentuk Impedansi Fasa Bersama

$Z_{ii}, Z_{jj}$  : Impedansi fasa sendiri

Dan nilai matriks admitansi bus per fasa di sistem tiga fasa seimbang yaitu :

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Keterangan :

$Y_{ii}, Y_{jj}$  : Admitansi fasa sendiri

$Y_{ij}, Y_{ji}$  : Bentuk impedansi fasa bersama

Sehingga nilai admitansi untuk n bus adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1. Tabel Admitansi n-bus <sup>[10]</sup>

		Bus j		
		Fasa a	Fasa b	Fasa c
Bus i	Fasa a	$Y_{ij}^{aa}$	$Y_{ij}^{ab}$	$Y_{ij}^{ac}$
	Fasa b	$Y_{ij}^{ba}$	$Y_{ij}^{bb}$	$Y_{ij}^{bc}$
	Fasa c	$Y_{ij}^{ca}$	$Y_{ij}^{cb}$	$Y_{ij}^{cc}$

Keterangan :

$Y_{ij}^{aa}, Y_{ij}^{bb}, Y_{ij}^{cc}$ : Admitansi fasa bersama pada bus  $i$  yang terhubung dengan bus  $j$

$Y_{ij}^{ab}, Y_{ij}^{ba}, Y_{ij}^{bc}, Y_{ij}^{cb}, Y_{ij}^{ca}, Y_{ij}^{cb}$ : Admitansi fasa sendiri pada bus  $i$  yang terhubung dengan bus  $j$

### 3. Menentukan Nilai Awal Tegangan $e^{(0)}$ dan $f^{(0)}$ : <sup>[10]</sup>

Nilai tegangan awal yang digunakan pada slack bus dan bus beban (PQ) diasumsikan nilai tegangan awal yaitu :

$$|V_i| \angle \theta = 1 \angle 0^\circ \quad (3.3)$$

Keterangan :

$V_i$  : Tegangan Fasa pada Bus  $i$

$\theta$  : Sudut Tegangan pada Setiap Fasa

### 4. Menentukan Iterasi $n = 0$

### 5. Menghitung nilai daya injeksi ( $P_{inj}$ , $Q_{inj}$ dan $V_{inj}$ ) Persamaan daya yang digunakan dalam persamaan rektanguler:

$$S_i = (e_i + jf_i) \sum_{j=1}^i (G_{ij} - jB_{ij}) \cdot (e_i - jf_i) \quad (3.4)$$

Dan dipisah menjadi daya aktif dan daya reaktif :

$$p_i = \sum_{j=1}^i \left[ [e_i(e_j \cdot G_{ij} - f_j - B_{ij}) + f_i(e_j \cdot B_{ij} + f_j \cdot G_{ij})] \right] \quad (3.5)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^i \left[ [f_i(e_j \cdot G_{ij} - f_j - B_{ij}) + e_i(e_j \cdot B_{ij} + f_j \cdot G_{ij})] \right] \quad (3.6)$$

Dimana  $i = 1, 2, 3, \dots$

Keterangan:

$S_i$  : Daya semu pada bus  $i$

$P_i$  : Daya aktif pada bus  $i$

$Q_i$  : Daya reaktif pada bus  $i$

$B_i$  : Suseptansi pada bus  $i$

$G_i$  : konduktansi pada bus  $i$

## 6. Menghitung Mismatch ( $\Delta P_i^{abc}$ , $\Delta Q_i^{abc}$ , $\Delta V_i^{abc}$ ) :

Nilai selisih daya aktif ( $\Delta P_i^{abc}$ ) ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$\Delta P_i^{abc} = P_{i \text{ spec}}^{abc} - P_{inj}^{abc} \quad (3.7)$$

$$\Delta P_i^{abc} = P_{gen}^{abc} - P_{load}^{abc} - P_{inj}^{abc} \quad (3.8)$$

Dimana :

$$P_{load}^{abc} = \left( P_{L0} \left( a \left( (e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right) + b \left( (e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + c \right) \right) \quad (3.9)$$

$$P_{inj}^{abc} = (e_i^{abc} \sum_{j \in i} (G_{ij}^{abc} e_j^{abc} - B_{ij}^{abc} f_j^{abc}) + f_i^{abc} \sum_{j \in 1} (G_{ij}^{abc} f_j^{abc} + B_{ij}^{abc} e_j^{abc})) \quad (3.10)$$

Keterangan :

$\Delta P_i^{abc}$  : Selisih daya aktif pada setiap fasa di bus  $i$

$P_{inj}^{abc}$  : Daya aktif injeksi pada setiap fasa

$P_{gen}^{abc}$  : Daya aktif generator pada setiap fasa

$P_{load}^{abc}$  : Daya aktif beban pada setiap fasa

$P_{L0}$  : Daya aktif awal pada beban

$e_i^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus  $i$

$e_j^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus  $j$

$f_i^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus  $i$

$f_j^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus  $j$

$B_{ij}^{abc}$  : Suseptansi bersama bus  $i$  dan bus  $j$  pada setiap fasa

$G_{ij}^{abc}$  : Konduktansi bersama bus  $i$  dan bus  $j$  pada setiap fasa

Sedangkan nilai selisih daya reaktif ( $\Delta Q_i^{abc}$ ) ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\Delta Q_i^{abc} = Q_{i\ spec}^{abc} - Q_{inj}^{abc} \quad (3.11)$$

$$\Delta Q_i^{abc} = Q_{gen}^{abc} - Q_{load}^{abc} - Q_{inj}^{abc} \quad (3.12)$$

Dimana :

$$Q_{load}^{abc} = \left( Q_{L0} \left( a \left( (e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right) + b \left( (e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + c \right) \right) \quad (3.13)$$

$$Q_{inj}^{abc} = (f_i^{abc} \sum_{j \in i} (G_{ij}^{abc} e_j^{abc} - B_{ij}^{abc} f_j^{abc}) - e_i^{abc} \sum_{j \in 1} (G_{ij}^{abc} f_j^{abc} + B_{ij}^{abc} e_j^{abc})) \quad (3.14)$$

Keterangan:

$\Delta Q_i^{abc}$  : Selisih daya reaktif pada setiap fasa di bus  $i$

$Q_{inj}^{abc}$  : Daya reaktif injeksi pada setiap fasa

$Q_{gen}^{abc}$  : Daya reaktif generator pada setiap fasa

$Q_{load}^{abc}$  : Daya reaktif beban pada setiap fasa

$Q_{L0}$  : Daya reaktif awal pada beban

$e_i^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus  $i$

$e_j^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus  $j$

$f_i^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus  $i$

$f_j^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus  $j$

$B_{ij}^{abc}$  : Suseptansi bersama bus  $i$  dan bus  $j$  pada setiap fasa

$G_{ij}^{abc}$  : Konduktansi bersama bus  $i$  dan bus  $j$  pada setiap fasa

Dan untuk PV bus, nilai  $Q$  diganti dengan  $V^2$  dengan persamaan :

$$\Delta V_i^{abc} = (e_i^{abc})^2 + (f_i^{abc})^2 \quad (3.15)$$

Keterangan:

$\Delta V_i^{abc}$  : Selisih tegangan pada setiap fasa di bus  $i$

$e_i^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *real* pada setiap fasa di bus  $i$

$f_i^{abc}$  : Tegangan dalam bentuk bilangan *imaginer* pada setiap fasa di bus  $i$

7. Memeriksa nilai  $\Delta P_i^{abc}$ ,  $\Delta Q_i^{abc}$ ,  $\Delta V_i^{abc}$  apakah sudah mencapai nilai toleransi yang ditentukan. Jika belum mencapai nilai toleransi, maka dilanjutkan ke langkah 8. Jika sudah mencapai nilai toleransi, dilanjutkan ke langkah 11.



## 8. Menghitung Persamaan Jacobian :

Tabel 3.2. Persamaan Jacobian Satu Fasa Polar

$\Delta P_j$	=	$\frac{\partial P_j}{\partial e_j}$	$\frac{\partial P_j}{\partial f_j}$	$\frac{\partial P_k}{\partial e_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial f_k}$	x	$\Delta \theta_j$
$\Delta Q_j$		$\frac{\partial Q_j}{\partial e_j}$	$\frac{\partial Q_j}{\partial f_j}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial e_k}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial f_k}$		$\Delta V_j/V_j$
$\Delta P_k$		$\frac{\partial P_k}{\partial e_j}$	$\frac{\partial P_k}{\partial f_j}$	$\frac{\partial P_k}{\partial e_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial f_k}$		$\Delta \theta_k$
$\Delta V_k$		$\frac{\partial V_k}{\partial e_j}$	$\frac{\partial V_k}{\partial f_j}$	$\frac{\partial V_k}{\partial e_k}$	$\frac{\partial V_k}{\partial f_j}$		$\Delta V_k/V_k$

Dimana :

$i$  = bus slack SL

$j$  = bus beban PQ

$k$  = bus generator PV

Elemen Diagonal (  $i = j$  )

## 9. Menghitung Tegangan Bus Baru :

$$e_i^{abc(n+1)} = e_i^{abc(n)} + \Delta e_i^{abc(n)} \quad (3.16)$$

$$f_i^{abc(n+1)} = f_i^{abc(n)} + \Delta f_i^{abc(n)} \quad (3.17)$$

Keterangan:

$e_i^{abc(n+1)}$  : Tegangan dalam bilangan *real* pada setiap fasa pada iterasi  $n + 1$

$f_i^{abc(n+1)}$  : Tegangan dalam bilangan *imajiner* pada setiap fasa pada iterasi  $n + 1$

$e_i^{abc(n)}$  : Tegangan dalam bilangan *real* setiap fasa pada iterasi  $n$

$f_i^{abc(n)}$  : Tegangan dalam bilangan *imajiner* setiap fasa pada iterasi  $n$

$\Delta e_i^{abc(n)}$  : Selisih tegangan dalam bilangan *real* setiap fasa pada iterasi  $n$

$\Delta f_i^{abc(n)}$  : Selisih tegangan dalam bilangan *imajiner* setiap fasa pada iterasi  $n$

**10. Kembali ke langkah 5 untuk menghitung nilai daya injeksi ( $P_{inj}$ ,  $Q_{inj}$  dan  $V_{inj}$ )**

**11. Menghitung Aliran Daya di *Slack Bus* dan Bus Beban Setelah itu**

**menghitung aliran daya P dan Q di bus slack dan Bus Beban :**

$$P_i^{abc} = P_{gen}^{abc} - P_{load}^{abc} - P_{inj}^{abc} \quad (3.18)$$

$$Q_i^{abc} = Q_{gen}^{abc} - Q_{load}^{abc} - Q_{inj}^{abc} \quad (3.19)$$

Keterangan:

$P_i^{abc}$  : Daya aktif pada setiap fasa di bus  $i$

$P_{gen}^{abc}$  : Daya aktif generator pada setiap fasa

$P_{load}^{abc}$  : Daya aktif beban pada setiap fasa

$P_{inj}^{abc}$  : Daya aktif injeksi pada setiap fasa

$Q_i^{abc}$  : Daya reaktif pada setiap fasa di bus  $i$

$Q_{gen}^{abc}$  : Daya reaktif generator pada setiap fasa

$Q_{load}^{abc}$  : Daya reaktif beban pada setiap fasa

$Q_{inj}^{abc}$  : Daya reaktif injeksi pada setiap fasa

apabila masih kecil maka dilakukan perhitungan *power factor correction*

**12. Menghitung *Drop* Tegangan pada Jaringan : [11]**

Impedansi kabel

Impedansi kabel merupakan fungsi dari ukuran kabel (luas penampang) dan panjang kabel. Umumnya produsen kabel akan melampirkan data kabel yang

diproduksinya seperti nilai resistansi kabel dan reaktansi kabel dalam satuan  $\Omega / \text{km}$ .

Menghitung Jatuh Tegangan (Voltage Drop)

Untuk sistem suplay tegangan AC , metode menghitung jatuh tegangan (voltage drop) adalah dengan berdasarkan faktor beban dengan mempertimbangkan arus beban penuh pada suatu sistim. Tetapi jika beban memiliki arus startup tinggi (misalnya motor) , maka tegangan drop dihitung dengan berdasarkan pada arus start up motor tersebut serta faktor daya .

Untuk sistem tiga phasa :

$$V_{3\phi} = [ I_{3\phi} ( R \text{Cos } \varphi + X \text{Sin } \varphi ) ] \quad (3.20)$$

Dimana :

$V_{3\phi}$  = Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Tiga Phasa

$I$  = Arus Beban Penuh Atau Arus Nominal Atau Arus Saat Start (A)

$R$  = Resistansi Kabel AC (  $\Omega / \text{km}$  )

$X$  = Adalah Reaktansi Kabel AC (  $\Omega / \text{km}$  )

$\text{Cos } \varphi$  = Faktor Daya Beban

Untuk sistem fase tunggal :

$$V_{1\phi} = [ I_{1\phi} ( 2 R \text{Cos } \varphi + 2 X \text{Sin } \varphi ) ] \quad (3.21)$$

### **13. Perhitungan *Power Factor Correction*. Dimana perhitungan ini berfungsi**

**untuk menentukan besaran kapasitor yang dibutuhkan :**

$$Q_c = k\text{VAR}_1 - k\text{VAR}_2 \quad (3.22)$$

$$P ( \tan \varphi_1 - \tan \varphi_2 ) = P ( \tan \text{arc cos } \varphi_1 - \tan \text{arc cos } \varphi_2 )$$

Dimana :

$Q_c$  = Besar Rating Kapasitor Daya (KVAR)

$P$  = Daya Aktif / Beban Listrik (KW)

$\tan \phi_1$  = Diperoleh dari Faktor Daya Listrik Awal

$\tan \phi_2$  = Diperoleh dari Faktor Daya Listrik Yang Diinginkan

### 15. Mengkonversi KVAR menjadi Farad :

$$C = Q / (2 \pi f V^2) \quad (3.23)$$

Dimana :

$C$  = Besaran kapasitor dalam Mikro farad

$Q$  = Besaran Kapasitor dalam kVar

$\Pi$  = 3,14

$F$  = Frekuensi pada Sistem

$V$  = Tegangan pada Sistem

### 16. Perhitungan Persen Kenaikan Tegangan :

$$\% \text{ Kenaikan Tegangan} = (Q_c X) / (10 V^2) \quad (3.24)$$

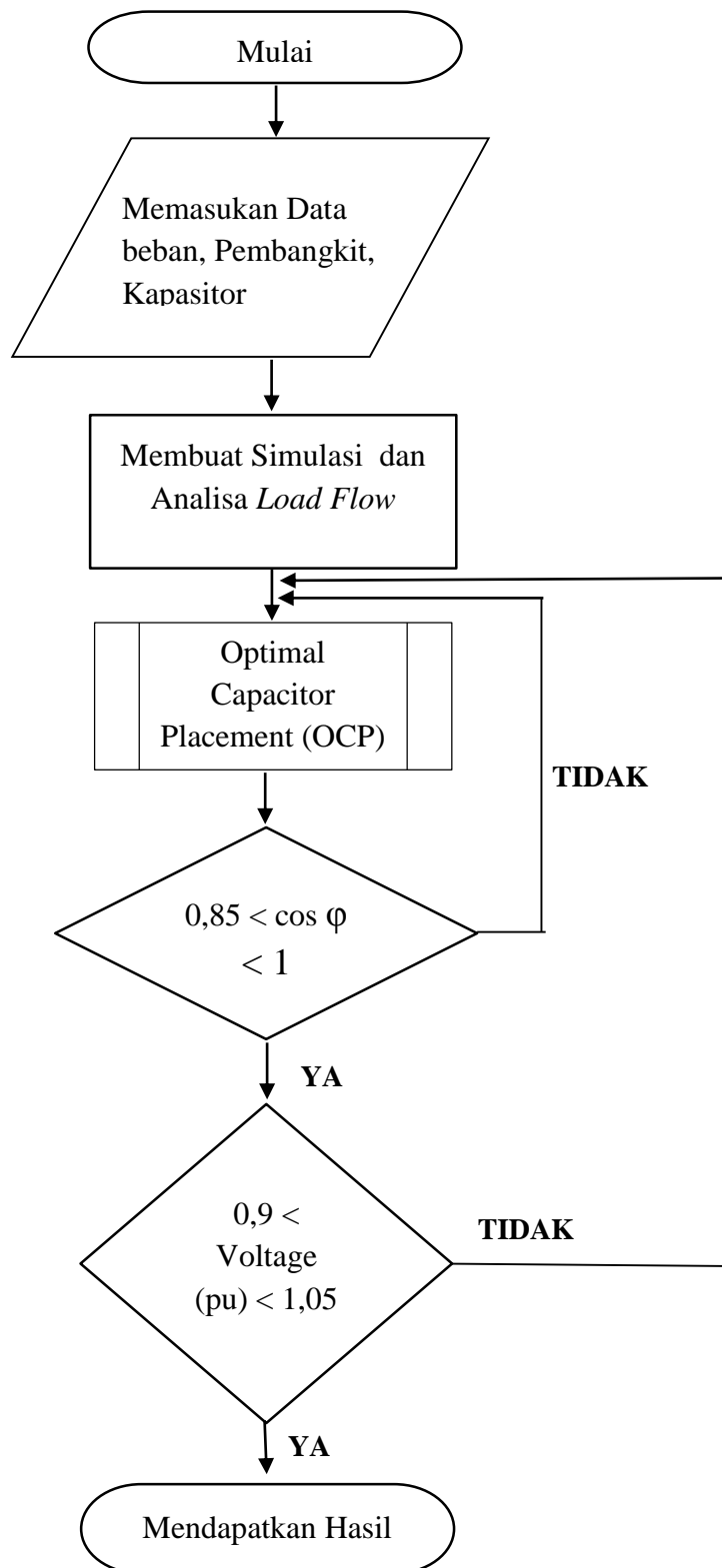
Dimana :

$Q_c$  = KVAR

$X$  = Reaktansi Jaringan (ohm)

$V$  = Tegangan Nominal ( $V_{L-L}$ )

### 3.6. Diagram Alir Perhitungan



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan

## V. KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Hasil Optimasi daya reaktif pada penelitian ini mampu mengurangi total rugi-rugi daya aktif dan reaktif hingga 20%. Sehingga berdampak pada keandalan sistem yang lebih baik.
2. Dengan kondisi injeksi VAR saat bus beban sebelum di injeksi kapasitor pada beban puncak hasil Etap 12.6 mengalami penurunan faktor daya di bus FF1, LV MCC FFA, LV MCC FFB dan bus 20 & 6 KV switchgear. ini di sebabkan kebutuhan VAR yang harus di tanggung generator sangat besar pada bus beban tersebut karena beban motor induksi 3 fasa. (Lihat di gambar 4.5)
3. Dengan meng-injeksikan VAR dengan kapasitor akan merubah magnitude tegangan pada tiap-tiap bus beban. Walaupun tidak signifikan ini dikarenakan peran tap changer pada transformator sangat baik dalam memperbaiki *drop* tegangan (Lihat di gambar 4.1 sampai dengan 4.4).

4. Dari hasil simulasi sebelum dan sesudah di injeksi VAR dengan kapasitor rugi-rugi daya pada setiap bus beban menurun secara signifikan. (Lihat di gambar 4.9 dan 4.10)
5. Perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor daya sangat efektif dalam meningkatkan faktor daya dan mengurangi rugi-rugi pada jaringan
6. Penambahan Kapasitor sebesar 994,7 mikro Farad atau 50 KVAR pada bus LV MCC FF1 A dan bus LV MCC FF1B dapat konvergen pada semua kondisi pembebanan dari hasil simulasi dan saran dari penulis menggunakan *power factor control* sebagai *controlling* injeksi KVAR terhadap bus tersebut.

## 5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Perlu adanya software pembanding sebagai acuan dalam pengkoreksian hasil simulasi dengan beberapa persamaan dan metode.
2. Penelitian dapat dilanjutkan dengan membandingkan metode *optimal capacitor placement* dengan perhitungan drop tegangan dan rugi-rugi bus beban dengan *artificial bee colony algorithm*.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wardhana, Nandi. 2006. *Penerapan Bank Kapasitor di PT Ulam Tiba Halim*. Teknik Elektro : Universitas Diponegoro
- [2] SPLN 1 1995
- [3] SPLN 70-1
- [4] Sitorus, Rinaldo Jaya, and Warman, Eddy. 2013. *Study Kualitas Listrik dan Perbaikan Faktor Daya pada Beban Listrik Rumah Tangga Menggunakan Kapasitor*. Fakultas Teknik: Universitas Sumatera Utara.
- [5] Hakim, Muhammad Fahmi. 2014. *Analisis Kebutuhan Capacitor Bank Beserta Implementasinya untuk Memperbaiki Faktor Daya Listrik di Politeknik Kota Malang*. Jurnal ELTEK Vol 12 Nomor 01 ISSN 1693-4024
- [6] Basri Hasan, *Sistem Distribusi Daya Listrik*, ISTN, Jakarta, 1997
- [7] Abdurahman, 2016. *Analisis Pengaruh Kesalahan Wiring Terhadap Hasil Pengukuran Energi Listrik pada Kwh Meter dan KVARH Meter*. Jurusan Teknik Elektro: Universitas Lampung
- [8] Riza, Fahrur. 2016. *Optimasi Daya dengan Penempatan Capacitor Bank Menggunakan Metode Mixed Integer Linier*. Jurusan Teknik Elektro: Universitas Lampung
- [9] Dewi, Rani Kusuma, 2016. *Studi Aliran Daya Tiga Fasa dengan Mempertimbangkan Transformator Distribusi Hubung Belitan Delta-Wye pada Peyulang Katu Gardu Induk Menggala*. Jurusan Teknik Elektro: Universitas Lampung.
- [10] Wahidi, Muhammad, 2014. *Analisa Aliran Daya Tiga Fasa Tak Seimbang pada Penyulang Kangkung PT PLN (Persero) Distribusi Lampung*. Jurusan Teknik Elektro : Universitas Lampung.
- [11] Gconen, Turan, 1986. *Electric Power Distribution system engineering*. New York