

PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI YANG EFISIEN UNTUK
SUPLAJ MOTOR PENGGERAK POMPA AIR MENGGUNAKAN
METODE *SUCCESSIVE BACKWARD* DI LAHAN TEBU
PG ASEMBAGOES SITUBONDO

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

JOSEPH KRISTIAN TRIYOGA

NIM. 0910630069 - 63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

**PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI YANG EFISIEN UNTUK
SUPLAI MOTOR PENGGERAK POMPA AIR MENGGUNAKAN
METODE *SUCCESSIVE BACKWARD* DI LAHAN TEBU
PG ASEMBAGOES SITUBONDO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
JOSEPH KRISTIAN TRIYOGA
NIM. 0910630069 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Ir. Mahfudz Shidiq, MT.
NIP. 19580609 198703 1 003

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

**PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI YANG EFISIEN UNTUK
SUPLAI MOTOR PENGGERAK POMPA AIR MENGGUNAKAN
METODE *SUCCESSIVE BACKWARD* DI LAHAN TEBU
PG ASEMBAGOES SITUBONDO**

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKRO

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

JOSEPH KRISTIAN TRIYOGA

NIM. 0910630069 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 13 Juni 2014

Majelis Penguji :

Ir. Hari Santoso, MS.
NIP. 19531205 198503 1 001

Dr. Ir. Moch. Dhofir, MT.
NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Soemarwanto, MT.
NIP. 19500715 198003 1 002

Mengetahui :
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D
NIP. 19741203200012 1 001

KATA PENGANTAR

Puji Tuhan, dengan memanjatkan puji syukur yang sedalam-dalamnya kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala rahmat dan anugerah-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik yang berjudul "Perencanaan Jaringan Listrik yang Efisien Untuk Suplai Motor Penggerak Pompa Air Menggunakan *Metode Successive Backward* di Lahan Tebu PG Asembagoes Situbondo". Adapun tujuan dari penulisan penelitian ini adalah sebagai tugas akhir untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Banyak kendala yang dihadapi dalam penyelesaian skripsi ini, baik kendala yang berasal dari diri pribadi maupun dari lingkungan sekitar. Kendala utama yang sering dihadapi adalah proses menjaga kemandirian dan ketekunan dalam pengerjaan dan penyusunan penelitian ini. Permasalahan tersebut dapat diatasi berkat bantuan dari pihak-pihak yang telah meluangkan waktu untuk membantu dalam menyelesaikan penelitian ini. Tanpa bermaksud mengurangi arti bantuan pihak-pihak lain yang terlibat dalam penyusunan laporan ini, maka disampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, ST., M.Sc, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Mochammad Rif'an ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Ir. Unggul Wibawa, M.Sc. dan Ir. Mahfudz Shidiq, MT selaku dosen pembimbing skripsi yang tak kenal lelah membimbing penulis dalam penelitian ini.
5. Ibu, Bapak, Mbak Renny, Mas Priyo, Mas Andre dan Sischa yang telah memberikan dorongan semangat yang sangat berarti.
6. Pak Agus, Pak Alyasin dan segenap karyawan PG Asembagoes Situbondo yang dengan senang hati mau membantu di lokasi proyek.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2009 Ampere, khususnya rekan-rekan mahasiswa konsentrasi Teknik Energi Elektrik yang senantiasa selalu memberi dorongan dan masukan.

8. Rekan-rekan seperjuangan dan asisten di Laboratorium Mesin Elektrik yang selalu siap memberikan bantuan dan menjadi tempat melepas penat.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Terakhir, meskipun dalam proses penyusunan skripsi ini dimungkinkan bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak, namun setiap kesalahan yang terdapat di dalamnya merupakan kelalaian dan tanggung jawab dari penulis. Oleh karena itu, setiap kritik atau tanggapan dari pembaca untuk penyempurnaan laporan ini akan diterima dengan penuh perhatian. Semoga karya ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Mei 2014

Joseph Kristian Triyoga

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat Penulisan.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Deskripsi Sistem Tenaga Listrik	6
2.2 Jaringan Distribusi Primer Tegangan Menengah (20 kV)	7
2.3 Jenis Konstruksi Tiang.....	10
2.4 Menentukan Perhitungan Mekanis Pada Tiang.....	11
2.4.1 Berat Penghantar dan Gaya Berat Penghantar	12
2.4.2 Perhitungan Gaya Mekanis (<i>Working Load</i>) Tiang Awal/Ujung	12
2.4.3 Perhitungan Gaya Mekanis (<i>Working Load</i>) Tiang Tengah.....	13
2.4.4 Tengah Perhitungan Gaya Mekanis (<i>Working Load</i>) Tiang Sudut.....	13
2.5 Pemilihan Level Tegangan.....	14
2.6 Menentukan Dimensi Konduktor.....	14
2.7 Kapasitas Arus Pada Konduktor	15
2.8 Regulasi Tegangan	15
2.9 Persamaan Aliran Daya DC	16
2.10 Metode <i>Succesive Backward</i>	21
2.11 Analisis Aliran Daya.....	22
2.11.2 Aljabar Matrik.....	23
2.11.3 Metode Iterasi Gauss-Seidel	25
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Pengumpulan Dasar Teori dan Literatur Terkait.....	28
3.2 Survey Lapangan.....	29

3.3	Pengumpulan Data	29
3.4	Perencanaan.....	30
3.5	Simulasi dan Perhitungan Rugi- Rugi.....	34
3.6	Perencanaan Konstruksi untuk Konfigurasi Jaringan yang Dipilih	34
3.7	Perhitungan Ekonomi dan Analisis	34
3.8	Penarikan Kesimpulan dan Saran.....	34
BAB IV PEMBAHASAN.....		35
4.1	Gambaran Umum Lokasi Perencanaan Jaringan Listrik	35
4.1.1	Lokasi Perencanaan Jaringan.....	35
4.1.2	Analisis Kondisi Lahan.....	36
4.1.3	Data Beban.....	39
4.2	Pemilihan Sistem Distribusi	40
4.3	Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Distribusi Primer (20 kV) Menggunakan Metode Successive Backward.....	44
4.3.1	Penentuan Konduktor.....	45
4.3.2	Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-1.....	46
4.3.3	Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-2.....	54
4.3.4	Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-3.....	59
4.3.5	Perbandingan Ketiga Alternatif Perencanaan Jalur Jaringan Listrik	64
4.4	Simulasi dan Analisis Perencanaan Jaringan Listrik.....	67
4.4.1	Data Jaringan.....	67
4.4.2	Data Beban.....	68
4.4.3	Proses Iterasi dan Perhitungan Jatuh Tegangan Serta Rugi Daya Pada Saluran	70
4.4.4	Hasil Perhitungan Dengan Bantuan Komputer	72
4.5	Perencanaan Konstruksi Jaringan yang Dipilih	74
4.6	Analisis dari Segi Ekonomi.....	79
BAB V PENUTUP		82
5.1	Kesimpulan.....	82
5.2	Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA		83

DAFTAR TABEL

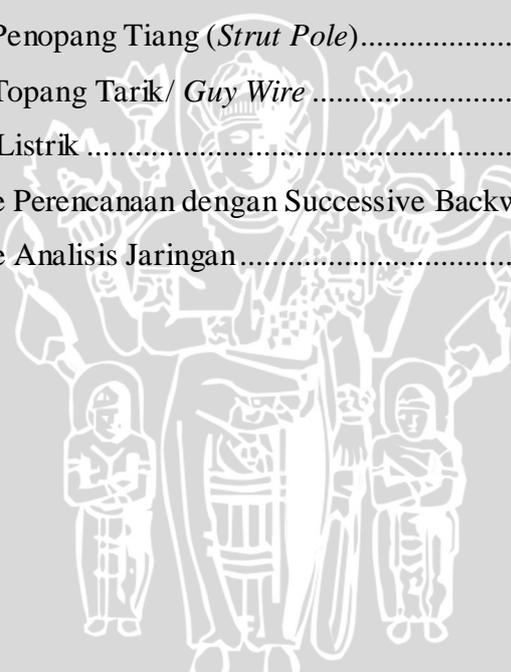
Tabel 1.1 Konstruksi Tiang dan GTT 1	10
Tabel 4.1 Tabel data beban motor listrik 1	40
Tabel 4.2 Spesifikasi penghantar konduktor AAAC	46
Tabel 4.3 Data perencanaan jalur jaringan listrik alternatif ke-1.....	48
Tabel 4.4 Hasil perhitungan indeks keefektifan perencanaan alternatif ke-1	50
Tabel 4.5 Hasil tes diskoneksi perencanaan alternatif ke-1	51
Tabel 4.6 Hasil tes pembebanan berlebih (<i>overload</i>) perencanaan alternatif ke-1	53
Tabel 4.7 Data perencanaan jalur jaringan listrik alternatif ke-2 1.....	55
Tabel 4.8 Hasil perhitungan indeks keefektifan perencanaan alternatif ke-2 1	57
Tabel 4.9 Hasil tes diskoneksi perencanaan alternatif ke-2	57
Tabel 4.10 Hasil tes pembebanan berlebih (<i>overload</i>) perencanaan alternatif ke-2.....	58
Tabel 4.11 Data perencanaan jalur jaringan listrik alternatif ke-3.....	60
Tabel 4.12 Hasil perhitungan indeks keefektifan perencanaan alternatif ke-3	62
Tabel 4.13 Hasil tes diskoneksi perencanaan alternatif ke-3	62
Tabel 4.14 Hasil tes pembebanan berlebih (<i>overload</i>) perencanaan alternatif ke-3.....	63
Tabel 4.15 Perbandingan ketiga alternatif jalur jaringan listrik	64
Tabel 4.16 Data impedansi tiap saluran perencanaan jaringan listrik alternatif ke-1	69
Tabel 4.17 Data impedansi tiap saluran perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2	69
Tabel 4.18 Data impedansi tiap saluran perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3	70
Tabel 4.19 Hasil perhitungan perencanaan jaringan alternatif ke-1	72
Tabel 4.20 Hasil perhitungan perencanaan jaringan alternatif ke-2	72
Tabel 4.21 Hasil perhitungan perencanaan jaringan alternatif ke-3	72
Tabel 4.22 Tabel Gaya Mekanis pada Tiang	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 2.2 Sistem Jaringan Distribusi Radial	8
Gambar 2.3 Sistem Jaringan Distribusi Loop	8
Gambar 2.4 Sistem Jaringan Distribusi Net.....	9
Gambar 2.5 Sistem Jaringan Distribusi Spindle	9
Gambar 2.6 Sistem Jaringan Distribusi Interkoneksi	10
Gambar 2.7 Panjang penghantar sebenarnya antara gawang	12
Gambar 2.8 Ilustrasi tiang sudut dengan sudut deviasi α	13
Gambar 2.9 Diagram skematik penambahan cabang.....	19
Gambar 2.10 Segitiga Daya	23
Gambar 2.11 Rangkaian dan matrik bus	24
Gambar 3.1 Kerangka umum metode pengerjaan penelitian	28
Gambar 3.2 Diagram alir metode <i>Successive Backward</i>	31
Gambar 4.1 Foto satelit lokasi lahan HGU PG Asembagoes Situbondo	36
Gambar 4.2 Peta Lahan HGU PG Asembagoes Situbondo	36
Gambar 4.3 Peta Lahan Persebaran Pompa diesel HGU PG Asembagoes Situbondo ...	37
Gambar 4.4 Rencana jaringan distribusi.....	43
Gambar 4.5 Persebaran pompa listrik	44
Gambar 4.6 Peta jalur perencanaan jaringan listrik alternatif ke-1 di lahan HGU PG ..	47
Gambar 4.7 Peta jalur perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2 di lahan HGU PG...	55
Gambar 4.8 Peta jalur perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3 di lahan HGU PG ..	60
Gambar 4.9 Hasil eliminasi perencanaan alternatif ke-1	65
Gambar 4.10 Hasil eliminasi perencanaan alternatif ke-2	66
Gambar 4.11 Hasil eliminasi perencanaan alternatif ke-3	66
Gambar 4.13 Diagram segaris perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2.....	69
Gambar 4.15 Grafik perbandingan jatuh tegangan ketiga alternatif perencanaan.....	73
Gambar 4.16 Perencanaan konstruksi alternatif ke-3 bagian pertama.....	75
Gambar 4.17 Perencanaan konstruksi alternatif ke-3 bagian kedua	76
Gambar 4.18 Perencanaan konstruksi alternatif ke-3 bagian ketiga	76
Gambar 4.19 Perbandingan biaya penggunaan mesin diesel dengan motor listrik	81

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Hasil Perhitungan Working Load dan Pemilihan Tiang	84
Lampiran 2 Tabel Efisiensi Motor Listrik	88
Lampiran 3 Tabel Karakteristik Penghantar Kabel Pilin Tegangan Rendah.....	89
Lampiran 4 Spesifikasi Kawat Penghantar tak Berisolasi	90
Lampiran 5 Spesifikasi Tiang Beton Bulat untuk SUTM.....	91
Lampiran 6 Konstruksi Tiang Awal	92
Lampiran 7 Konstruksi Tiang Penumpu Sudut Kecil	93
Lampiran 8 Konstruksi Tiang Sudut Dengan Sudut Lintasan 30^0 - 80^0	94
Lampiran 9 Konstruksi Tiang Peregang/Penopang	95
Lampiran 10 Konstruksi Tiang Akhir	96
Lampiran 11 Konstruksi Penopang Tiang (<i>Strut Pole</i>).....	97
Lampiran 12 Konstruksi Topang Tarik/ <i>Guy Wire</i>	98
Lampiran 13 Tarif Dasar Listrik	99
Lampiran 14 Source Code Perencanaan dengan Successive Backward	100
Lampiran 15 Source Code Analisis Jaringan.....	104



RINGKASAN

Joseph Kristian Triyoga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2014, Perencanaan Jaringan Distribusi Yang Efisien Untuk Suplai Motor Penggerak Pompa Air Menggunakan Metode Successive Backward Di Lahan Tebu PG Asembagoes Situbondo, Dosen Pembimbing: Ir. Unggul Wibawa, M.Sc dan Ir. Mahfudz Shidiq, MT.

Pada penelitian ini akan direncanakan jaringan distribusi yang efisien untuk menyuplai motor-motor listrik penggerak pompa air yang ada di lahan tebu PG Asembagoes Situbondo. Perencanaan ini dibuat dengan tujuan untuk optimalisasi kinerja pabrik dari segi bahan baku yaitu tebu. Selama ini pompa digerakkan oleh mesin diesel yang banyak memiliki kekurangan antara lain biaya operasional tinggi, kurang efisien, bahan bakar semakin mahal dan rawan pencurian bahan bakar.

Perencanaan dimulai dengan membuat tiga alternatif jalur jaringan listrik yang menghubungkan secara acak titik-titik motor listrik. Kemudian melakukan eliminasi pada ketiga alternatif tadi sampai didapatkan konfigurasi yang paling efisien menggunakan metode *Successive Backward* dan analisis jaringan. Konfigurasi jalur jaringan hasil eliminasi kemudian dianalisis menggunakan analisis aliran daya. Ketiga alternatif dibandingkan kemudian dipilih jalur mana yang paling efisien. Perencanaan konstruksi jaringan dilakukan setelah didapatkan jalur yang terbaik, yaitu menempatkan tiang-tiang listrik dan melakukan pemilihan jenis tiang. Terakhir adalah melakukan analisis sederhana dari rencana pergantian pompa penggerak mesin diesel dengan pompa penggerak motor listrik.

Dari hasil perhitungan yang didapatkan, perencanaan alternatif ke-3 adalah yang dipilih karena memiliki kelebihan yaitu total jarak paling pendek sebesar 6,185 km dan jatuh tegangan yang relatif paling kecil dibandingkan kedua alternatif yang lain. Drop tegangan di titik terjauh alternatif ke-3 adalah 0.55 % dan rugi tegangan 791,99 -517,83i VA. Dari sisi perhitungan ekonomi pergantian mesin diesel ke motor listrik menghasilkan penghematan dari pengeluaran Rp 3.193.973.453,- saat memakai mesin diesel menjadi Rp 6.498.733.750,- saat menggunakan motor listrik.

Kata kunci: *Successive Backward*, jaringan listrik TM dan sistem distribusi

SUMMARY

Joseph Kristian Triyoga, Electrical Engineering Department, Engineering Faculty of Brawijaya University, Juni 2014, Efficient Distribution Network Planning to Supply Electric Motors Driving Water Pump by Successive Backward Method at The Sugar Cane Land of PG Asembagoes Situbondo, Supervisor: Ir. Unggul Wibawa, M.Sc and Ir. Mahfudz Shidiq, MT.

This research will be designed on an efficient distribution network planning to supply electric motors driving water pumps in the sugar cane land PG Asembagoes Situbondo. Planning was created with the aim of optimizing performance in terms of the factories of raw materials namely sugar cane. As long as this pump is driven by the diesel engine which has many deficiencies such high operating costs, less efficient, more expensive fuel, and fuel stealing.

Planning starts by making three alternative pathways linking the electricity networks of random dots electric motor. Then do the elimination for all alternative to the most efficient configuration is obtained using the method of Successive Backward and network analysis. Configuring the network path the results of elimination then analyzed using power flow analysis. All the alternative are being compared to make decision for which pathway is the most efficient. Construction network building will be design after the best pathway was found, where places the electric poles and pole type selection. The last step is make some simple analysis from this replacing diesel engines with electric motor.

From the counting process, the planning of third alternative is select because it has some advantages such 6,185 km longs which that is the sortest pathway, 0,55 % voltage drop for the longest node and give system lossis 791,99 -517,83i VA. This project gives Rp 3.193.973.453,- when use the electric motors and Rp 6.498.733.750,- when use diesel engine.

Keyword: Successive Backward, electrical network of medium voltage and distribution system

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam bidang produksi, penggunaan mesin penggerak rupanya mengalami perkembangan seiring perkembangan zaman. Dahulu yang hanya menggunakan mesin diesel sekarang mulai beralih ke motor listrik. Tentunya faktor ekonomi adalah alasan pokok tindakan tersebut dilakukan mungkin oleh berbagai perusahaan yang bergerak di bidang produksi yang modern. Beberapa alasan yang menyebabkan ditinggalkannya mesin diesel adalah perhitungan kebutuhan bahan bakar semisal masih menggunakan mesin mesin bakar per tahunnya, kerusakan peralatan lebih tinggi sehingga memerlukan biaya perawatan yang besar dan efisiensi mesin diesel itu sendiri yang lebih rendah bila dibandingkan dengan motor listrik.

Hal tersebut yang sekarang ini sedang digalakkan oleh Pabrik Gula Asembagoes Situbondo, yaitu modernisasi beberapa mesin penggerak. PG Asembagoes sendiri berdiri sejak tahun 1891 dan mengalami perkembangan dalam berbagai sektor guna meningkatkan produksinya. PG Asembagoes merupakan lambang keberhasilan dalam pengelolaan kebun dan PG secara terintegrasi. Dukungan lahan Hak Guna Usaha (HGU) baik di Asembagus maupun Banyuwangi sangat menopang keberadaan PG tidak saja dalam pasokan tebu secara berkelanjutan, namun juga terselenggaranya kebun bibit dan peragaan yang sangat efektif dalam mewujudkan media pembelajaran bagi para petani. Sehingga lahan HGU memiliki peranan sentral dan perlu perhatian yang lebih.

Lahan HGU PTPN XI PG Asembagoes memiliki luas berkisar 500 hektar yang terletak tidak jauh dari kawasan pabrik. Agar produktifitas lahan maksimal maka faktor-faktor yang berpengaruh harus diperhatikan, salah satunya adalah ketersediaan air. Selama ini pabrik menyuplai kebutuhan air dari petak ke petak menggunakan pompa diesel yang berbahan bakar solar untuk dapat mengalirkan air dari parit ke lahan tebu. Pompa itu sendiri merupakan pompa air yang dikopel dan digerakkan dengan mesin diesel berbahan bakar solar, dimana satu pompa diesel mengerjakan beberapa petak lahan dan tidak terhubung dengan pompa diesel yang lain (*stand alone pump*). Akan tetapi pada prakteknya biaya operasi yang dikeluarkan jika dihitung akan semakin membengkak disebabkan beberapa hal, antara lain meningkatnya biaya penggunaan bahan bakar solar yang harganya fluktuatif mengikuti harga minyak dunia, kerusakan

mesin yang tinggi dan tenaga kerja yang diperlukan banyak. Hal ini jika tidak segera ditindak lanjuti akan merugikan pabrik dari segi ekonomi. Sehingga pabrik membuat usulan untuk mengadakan modernisasi dari penggunaan pompa diesel dengan motor listrik. Diharapkan penggantian 28 pompa bermesin diesel dengan 13 pompa dengan tenaga listrik yang terintegrasi mampu memberikan penghematan pengeluaran pabrik. Disamping dapat mengurangi konsumsi dan dampak dari pemakaian minyak bumi, penggunaan pompa dengan tenaga listrik yang terintegrasi dapat memberikan kemudahan dari segi perawatan.

Dalam skripsi ini akan dilakukan perencanaan jaringan distribusi dengan kualitas listrik yang baik mulai yaitu untuk mendapatkan konfigurasi jaringan distribusi primer (20 kV) yang efisien. Metode perencanaan jaringan yang digunakan adalah metode *Successive Backward* dimana perencanaan jaringan hanya menentukan jalur dan panjang saluran kabel. Setelah jalur saluran diketahui, selanjutnya adalah detail perencanaan dan perhitungan jaringan untuk mengurangi jatuh tegangan. Beberapa hal yang menyebabkan jatuh tegangan antara lain jumlah beban yang banyak, lokasi beban yang jauh dari penyulang, jenis konduktor yang digunakan, jauhnya jarak penempatan transformator dengan beban, dan faktor gangguan teknis di lapangan. Untuk itu dalam perencanaan ini dipilih cara untuk optimasi penempatan transformator diupayakan dekat dengan beban agar diperoleh jatuh tegangan sesuai SPLN yang sudah ditetapkan. Diharapkan dalam skripsi ini mampu memberikan perencanaan yang baik dari segi teknis dan memberikan nilai ekonomis bagi kebutuhan pabrik.

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai dengan uraian di atas maka dapat dirumuskan suatu rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat perencanaan sistem jaringan distribusi sampai didapat perencanaan yang paling efisien menggunakan metode *Successive Backward*.
2. Seberapa besar jatuh tegangan dan rugi rugi yang terdapat pada jaringan listrik yang direncanakan.
3. Seberapa besar biaya per-kWh dari pergantian pompa diesel (*stand alone pump*) ke pompa listrik (*integrated elektrik pump*) sesuai hasil perencanaan jaringan yang dibuat.

1.3 Batasan Masalah

Penyusunan penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Efisien yang dimaksud adalah dari ketiga alternatif perencanaan yang dibuat, akan dipilih satu yang paling baik. Dilihat dari segi teknis dan ekonomis yang meliputi besarnya jatuh tegangan, rugi-rugi daya di saluran, panjang total konduktor dan estimasi total menggunakan tiang listrik.
2. Perencanaan dan analisis dibatasi untuk jaringan listrik tegangan menengah (20 kV), dan tidak membahas lebih jauh ke jaringan listrik tegangan rendah (380/220 V)
3. Pembahasan konstruksi terbatas hanya ke tinggi tiang yang digunakan, macam tiang yang digunakan, jarak antar tiang, dan panjang konduktor.
4. Lokasi perencanaan jaringan listrik yang dibahas berada di kompleks lahan HGU (Hak Guna Umum) PTPN XI milik PG Asembagoes Situbondo.
5. Karena sudah ditentukan, peletakan titik-titik *electric pump* diambil dari data sekunder pabrik, yaitu 13 titik pompa listrik yang menggantikan 28 titik pompa diesel.
6. Daya motor yang digunakan sudah ditetapkan dari pihak pabrik melewati beberapa pertimbangan yang dilakukan, yaitu 5 buah motor listrik 75 kW dan 8 motor listrik 37 kW.
7. Perencanaan saluran yang dilakukan merupakan konfigurasi baru dengan menata dan menentukan hubungan titik beban dan jalur konduktor.
8. Tidak membahas masalah peralatan keamanan sistem.
9. Tidak membahas detail pemasangan transformator, pengkabelan dan instalasi.
10. Tidak membahas rugi rugi dalam transformator.

11. Pembahasan secara ekonomi hanya membahas masalah:

- a. Perkiraan biaya investasi/ biaya pertama.
- b. Proyeksi biaya operasional setelah beralih ke *integrated electric pump*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang hendak dicapai adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan perencanaan sistem jaringan distribusi sampai didapat perencanaan yang paling efisien menggunakan metode *Successive Backward*.
2. Mendapatkan besarnya nilai jatuh tegangan dan rugi-rugi yang terdapat pada jaringan listrik yang direncanakan.
3. Mendapatkan besar biaya per-kWh dari pergantian pompa diesel (*stand alone pump*) ke pompa listrik (*integrated electric pump*) sesuai hasil perencanaan jaringan yang dibuat.

1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat yang dapat diambil dari penulisan ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Penulis

Penelitian ini diharapkan mampu menambah pengetahuan, wawasan dan pemahaman khususnya yang berkenaan dengan perencanaan jaringan distribusi secara aplikatif, sehingga mampu melatih kemampuan analitis dan menjadi sarana mempraktikkan teori yang telah dipelajari sebelumnya.

2. Bagi PG Asembagoes Situbondo

Dapat dijadikan referensi bagi PG Asembagoes Situbondo dalam proyek penggantian pompa diesel untuk lahan HGU melalui jaringan listrik yang diusulkan.

3. Bagi Pembaca

Dapat memberikan wawasan mengenai perencanaan sistem distribusi dan aplikasinya di berbagai bidang, salah satunya bidang produksi.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan penelitian dirumuskan dengan susunan sebagai berikut:

BAB I: Pendahuluan

Menjelaskan latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II: Tinjauan Pustaka

Berisi teori teori serta literatur yang berkaitan dengan tema yang diangkat dalam penelitian.

BAB III: Metode Penelitian

Berisi metode penelitian yang akan dilakukan, terdiri dari obyek penelitian, studi literatur, survey lapangan, pengumpulan data, perencanaan jaringan, analisis, perhitungan ekonomi serta penarikan kesimpulan dan saran.

BAB IV: Pembahasan

Pada bab ini akan dijelaskan perencanaan jaringan listrik beserta analisis hasil perencanaan, perencanaan konstruksi, perhitungan rugi rugi dan analisis ekonomi.

BAB V: Penutup

Berisi kesimpulan dari hasil yang didapat dari hasil penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.



BAB II

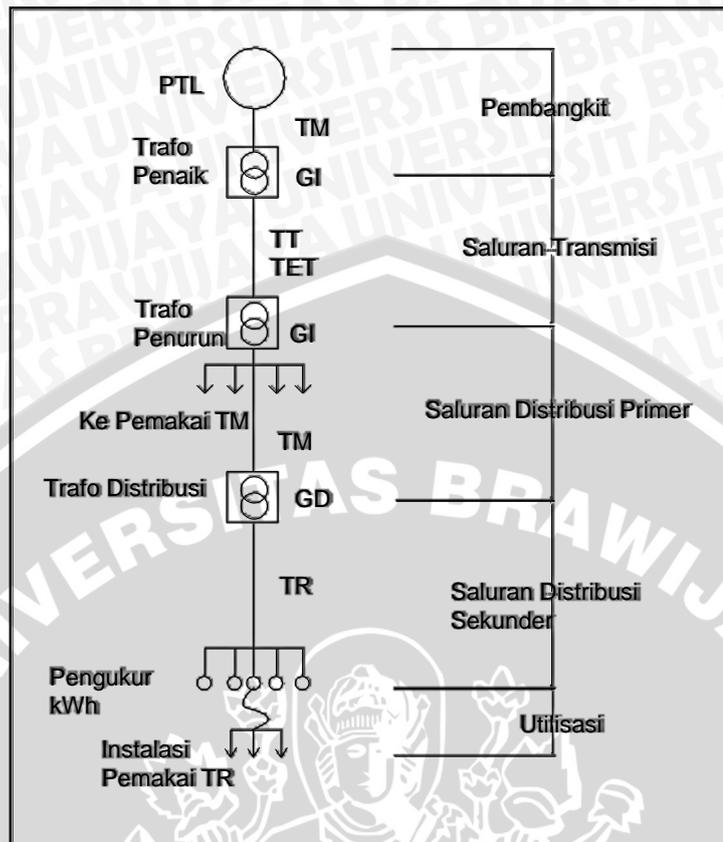
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Deskripsi Sistem Tenaga Listrik

Listrik merupakan bentuk energi yang paling cocok dan nyaman bagi manusia modern. Tanpa listrik infrastruktur masyarakat sekarang tidak akan menyenangkan. Makin bertambahnya konsumsi listrik per-kapita di seluruh dunia menunjukkan kenaikan standar kehidupan manusia. Pemanfaatan secara optimum bentuk energi ini oleh masyarakat dapat dibantu dengan sistem distribusi yang efektif. (Hadi, 1991: 2)

Pada dasarnya suatu sistem dalam menyalurkan tenaga listrik ke konsumen terdiri dari empat unsur penting yaitu pusat pembangkit, transmisi, distribusi dan utilisasi atau konsumen pemakai listrik itu sendiri. Yang pertama adalah unsur pembangkitan tenaga listrik, dimana sekarang ini telah banyak berkembang sistem pembangkitan antara lain dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTAngin), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Unsur pembangkitan ini merupakan yang pertama dalam sistem tenaga listrik yang nantinya menjadi patokan untuk sistem yang selanjutnya yaitu transmisi. Pada sistem tenaga yang besar, untuk menjangkau daerah daerah yang akan disuplai karena biasanya pusat pembangkit skala besar terletak jauh dari lokasi, diperlukan saluran transmisi. Tegangan harus dinaikkan dahulu dari tegangan menengah (TM) ke tegangan tinggi (TT) sebelum ditransmisikan. Bahkan untuk jarak yang sangat jauh tegangan harus dinaikkan sampai tegangan ekstra tinggi (TET). Tegangan tinggi di Indonesia adalah 70, 150 dan 275 kV sedangkan ekstra tinggi adalah 500 kV (Kadir, 2006: 4)

Setelah lewat dari saluran transmisi maka sistem berlanjut ke sistem distribusi dimana dari Gardu Induk tegangan diturunkan ke rating tegangan distribusi. Saluran distribusi sendiri dibagi menjadi dua yaitu saluran distribusi primer dengan tegangan menengah 20 kV dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah 380/220 V. Setelah melewati saluran distribusi primer tenaga listrik diturunkan lagi tegangannya oleh trafo distribusi menjadi tegangan rendah sebagai jaringan tegangan rendah (JTR) dan kemudian disalurkan ke konsumen. Konsumen inilah yang termasuk dalam sistem utilitas, konsumen bisa dari beban rumah tangga, industri maupun perkantoran.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sumber: Kadir, 2006: 5

Keterangan:

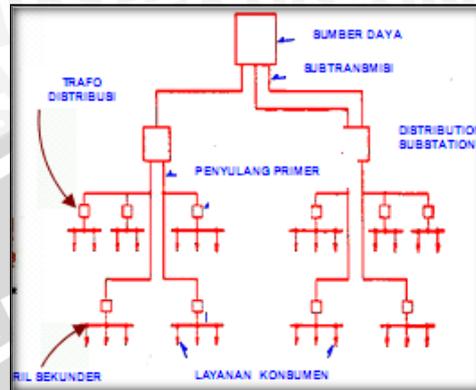
- PTL = Pembangkit Tenaga Listrik
- GI = Gardu Induk
- TT = Tegangan Tinggi
- TET = Tegangan Ekstra Tinggi
- TM = Tegangan Menengah
- GD = Gardu Induk
- TR = Tegangan Rendah

2.2 Jaringan Distribusi Primer Tegangan Menengah (20 kV)

Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik yang dapat merupakan suatu industri atau suatu kota, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan (TM). Hal ini juga dilakukan pada suatu GI dengan mempergunakan transformator penurun tegangan (*step-down transformer*). Di Indonesia tegangan menengah adalah 20 kV dan merupakan sistem distribusi primer (Kadir, 2006: 6). Macam - macam bentuk rangkaian:

4. Jaringan Distribusi Radial

Bila antara titik sumber dan titik beban hanya terdapat satu saluran (*line*). Merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya percabangan tersebut menyebabkan arus yang mengalir sepanjang saluran tidak sama besar.

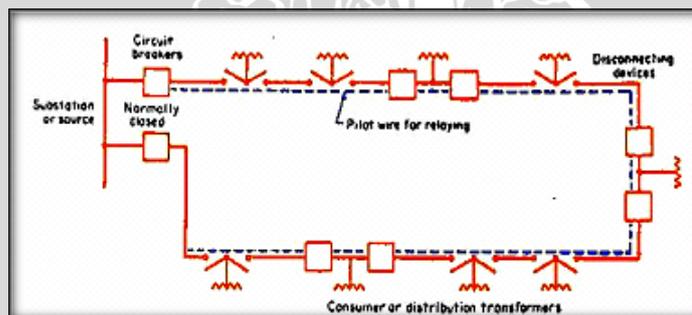


Gambar 2.2 Sistem Jaringan Distribusi Radial

Sumber: Suhadi, 2008: 18

5. Jaringan Distribusi Loop (Ring)

Apabila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran lebih dari satu sumber. Jaringan merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan loop. Susunan rangkaian penyulang berbentuk ring yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua penyulang.

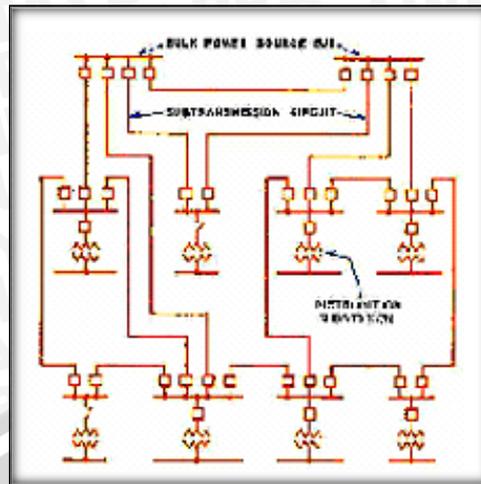


Gambar 2.3 Sistem Jaringan Distribusi Loop

Sumber: Suhadi, 2008: 21

6. Jaringan Distribusi Jaring Jaring (Net)

Merupakan gabungan dari radial dan loop, dimana terdapat lebih dari satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Salurannya menyebar dan berbentuk jaring jaring.

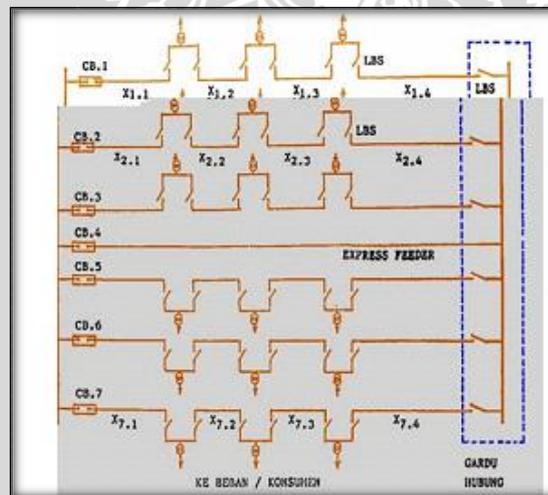


Gambar 2.4 Sistem Jaringan Distribusi Net

Sumber: Suhadi, 2008: 22

7. Jaringan Distribusi Spindle

Merupakan pengembangan model jaringan sebelumnya guna meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Terdiri dari maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban.



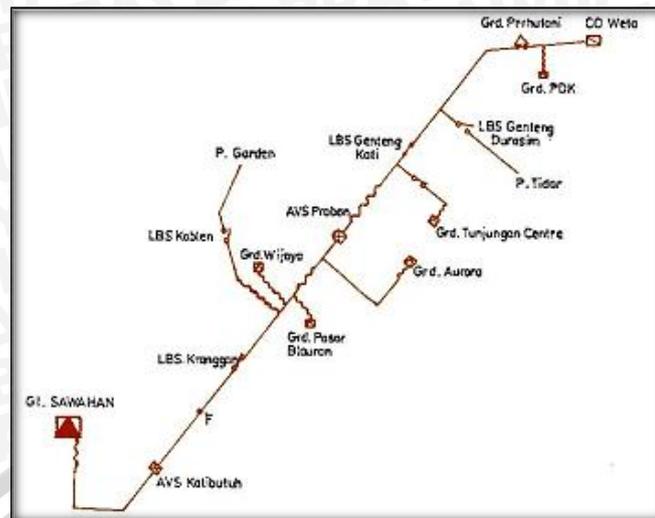
Gambar 2.5 Sistem Jaringan Distribusi Spindle

Sumber: Suhadi, 2008: 24

8. Saluran Radial Interkoneksi

Terdiri lebih dari satu saluran radial tunggal yang dilengkapi dengan LBS/AVS sebagai saklar interkoneksi. Masing-masing tipe saluran tersebut memiliki spesifikasi tersendiri.





Gambar 2.6 Sistem Jaringan Distribusi Interkoneksi

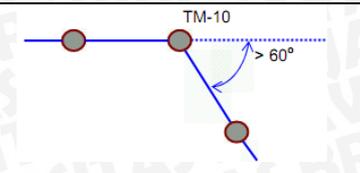
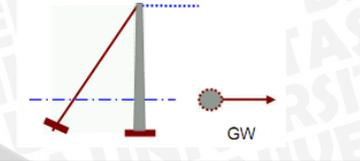
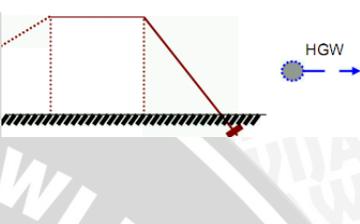
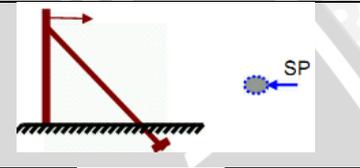
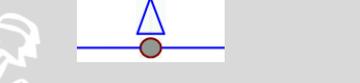
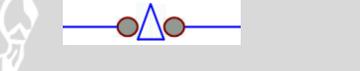
Sumber: Suhadi, 2008: 25

2.3 Jenis Konstruksi Tiang

Dalam pemasangan jaringan untuk menyalurkan daya ke beban, pemilihan dan peletakan tiang sesuai geografis lapangan menjadi faktor yang penting. Sedangkan untuk transformator, Gardu Trafo Tiang (GTT) merupakan tipe yang lebih cocok untuk perkotaan yang padat maupun pedesaan karena tidak memerlukan lahan yang besar, dapat dipasang di pusat beban dan dengan daya bervariasi dapat mengurangi panjang jaringan tegangan rendah.

Table 1.1 Konstruksi Tiang dan GTT 1

No	Jenis Konstruksi	Uraian	Gambar
1	2	3	4
1	Tiang Penyangga (TM-1)	Untuk jaringan lurus dan jaringan dengan sudut belok maksimum 15°	
2	Tiang Penyangga Ganda (TM-2)	Untuk sudut belok $15 - 30^\circ$	
3	Tiang Tarik Akhir (TM-4)	Tiang akhir jaringan	
4	Tiang tarik ganda (TM-5)	setiap jaringan lurus 40-50 m	
5	Tiang percabangan (TM-8)	Untuk di percabangan	

1	2	3	4
6	Tiang sudut (TM-10)	Sudut belokan $> 60^\circ$	
7	Guy Wire (GW)	Konstruksi dari topang-tarik pada tiang, menetralkan beban vertical tiang	
8	Horizontal Guy Wire (HGW)	Bila topang tarik tidak dapat dipasang langsung pada tiang yang bersangkutan. Halangan pemasangan seperti tempat pemasangan anchor blok tidak tersedia dekat tiang	
9	Strut Pole (SP)	Jika guy wire maupun horizontal guy wire tidak memungkinkan di lokasi	
10	GTT Tipe Cantol	Dapat dipasang trafo satu fasa atau tiga fasa	
11	GTT Tipe Dua Tiang	Untuk trafo > 50 kVA	

Sumber: Suhadi, 2008: 58

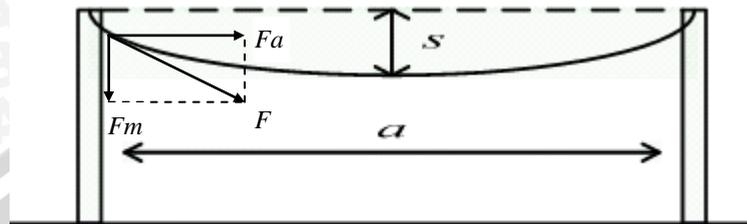
2.4 Menentukan Perhitungan Mekanis Pada Tiang

Tiang menjadi salah satu bagian terpenting dari konstruksi suatu perencanaan jaringan terutama jaringan distribusi saluran udara. Fungsi dari tiang itu sendiri adalah sebagai tumpuan penghantar sehingga dapat menerima gaya-gaya mekanis akibat berat penghantar, gaya tarik dari penghantar maupun tiupan angin. Besarnya gaya-gaya tersebut berbeda sesuai dengan fungsi tiang (tiang awal/ujung, tiang tengah, tiang sudut) dan luas penghantar. Tiang, baik tiang besi atau tiang beton mempunyai kekuatan tarik (*working load*) sesuai standard yang berlaku saat ini yaitu 160 daN, 200 daN, 350 daN, 500 daN, 800daN, 1200 daN dimana daN adalah deka Newton atau setara dengan 1,01 kg gaya (Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN (Persero), 2008: 6).

2.4.1 Berat Penghantar dan Gaya Berat Penghantar

Berat penghantar didefinisikan sebagai massa penghantar tiap-tiap km dengan satuan kg/km (Kriteria Disain Enjineriing Konstruksi Jaringan Dsistribusi Tenaga Listrik, 2008: 2).

$$\text{Gaya berat penghantar} = m.g \dots\dots\dots (2-1)$$



Gambar 2.7 Panjang penghantar sebenarnya antara gawang

Sumber: Kriteria Disain Enjineriing Konstruksi Jaringan Dsistribusi Tenaga Listrik, 2008: 3

Sag atau andongan adalah jarak antara garis lurus horizontal dengan titik terendah penghantar. Panjang penghantar itu sendiri dihitung berdasarkan panjang penghantar sebenarnya sebagai fungsi dari jarak andongan, dihitung dengan rumus sebagai berikut (Kriteria Disain Enjineriing Konstruksi Jaringan Dsistribusi Tenaga Listrik, 2008: 2):

$$L = a + \frac{8s^2}{3a} \dots\dots\dots (2-2)$$

dimana,

- m = massa penghantar (kg)
- g = gravitasi (m/s²)
- L = panjang total penghantar (m)
- a = panjang andongan/sag (m)

2.4.2 Perhitungan Gaya Mekanis (*Working Load*) Tiang Awal/Ujung

Tiang awal atau tiang ujung mendapatkan gaya mekanis akibat massa penghantar(F_m) dan akibat angin pada penghantar (F_a). Maka gaya mekanis pada tiang ujung (F) adalah (Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN(Persero), 2008: 6):

$$F = \sqrt{F_m^2 + F_a^2} \dots\dots\dots (2-3)$$

dimana,

$$F_m = \text{massa} \times g \times \frac{L}{2} \dots\dots\dots (2-4)$$

$$F_a = \text{tekanan angin} \times d \times \frac{L}{2} \dots\dots\dots (2-5)$$

Arah gaya gaya mekanis karena penghantar (F_m) adalah ke bawah karena mendapat pengaruh gravitasi sedangkan arah gaya mekanis akibat angin pada penghantar (F_a) adalah tegak lurus dengan arah gaya karena penghantar (F_m). Sehingga dari sini dapat ditarik suatu gaya resultan yang merupakan gaya mekanis pada tiang (F) yang besarnya seperti yang dirumuskan pada persamaa 2-3.

g = konstanta gravitasi (9.8 m/s^2)

d = diameter penghantar

L = panjang penghantar antara titik andongan/sag dua gawang yang saling berdampingan (*weighted span*)

Massa yang dipakai adalah massa (kg) dari penghantar sepanjang L sedangkan untuk tekanan angin di indonesia adalah 40 daN/m^2 .

2.4.3 Perhitungan Gaya Mekanis (Working Load) Tiang Tengah

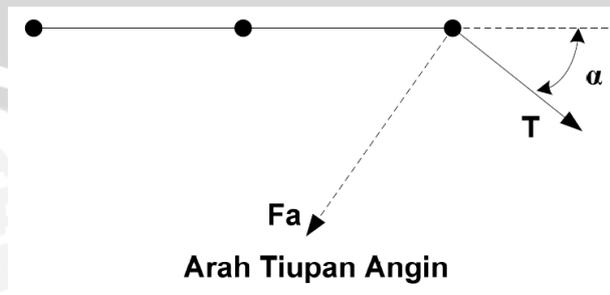
Tiang tengah dengan deviasi sudut lintasan 0° tidak menerima gaya mekanis akibat massa penghantar, karena gaya tersebut saling menghilangkan pada jarak gawang/span yang berdampingan. Namun tetap menerima gaya mekanis sebagai akibat tiupan angin (F_a). Besarnya tekanan angin adalah 40 daN/m^2 (Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN (Persero), 2008: 6).

$$F_a = \text{tekanan angin} \times d \times \frac{L}{2} \dots\dots\dots (2-6)$$

2.4.4 Tengah Perhitungan Gaya Mekanis (Working Load) Tiang Sudut

Tiang sudut adalah tiang dimana deviasi lintasan penghantar sampai dengan 90° . Jika tiang awal/ujung memikul gaya sebesar F kg gaya (daN), maka tiang sudut /massa penghantardan tiupan angin maksimum sebesar:

$$F = F_a \cdot d \cdot a \cdot \cos \alpha / 2 + 2T \sin \alpha / 2$$



Gambar 2.8 Ilustrasi tiang sudut dengan sudut deviasi α

Sumber : Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN(Persero), 2008: 7



Dimana:

F_a = tekanan angin (daN/m²)

T = tegangan tarik maksimum penghantar pada tiang (daN)

d = diameter penghantar (m)

α = sudut deviasi lintasan (derajat)

Apabila F_1 adalah gaya mekanis maksimum pada tiang awal/ujung, dimana $F_1 = F$ akibat massa penghantar + F akibat hembusan angin, maka tiang sudut menerima gaya maksimum sebesar (Kriteria Desain Enjinerig Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN (Persero), 2008: 7):

$$F_{maks} = 2F_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \dots\dots\dots (2-7)$$

2.5 Pemilihan Level Tegangan

Tegangan saluran ditentukan oleh beban dan jarak penyaluran. Tegangan yang paling ekonomis diperoleh dari rumus empiris untuk sistem tiga fasa berikut ini (Hadi, 1991: 183):

$$V = 5,5 \times \sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{P}{100}} \dots\dots\dots (2-8)$$

dengan V = tegangan (kV)

L = panjang saluran (km)

P = beban (kW)

Untuk penerapannya, hasil dari perhitungan tegangan V akan disesuaikan dengan nilai tegangan standar terdekat yang ada.

2.6 Menentukan Dime nsi Konduktor

Jika pemilihan berdasarkan rugi tegangan dan rapat arus harus digunakan luas penampang konduktor yang berbeda. Tetapi untuk pengaman lebur yang digunakan harus tetap berdasarkan beban yang dihubungkan. Rumus-rumus yang digunakan untuk menentukan luas penampang konduktor yang diperlukan berdasarkan jatuh tegangan untuk sistem tiga fasa adalah (Harten, 1982: 145):

$$A = \frac{1,73I \cos \varphi}{\gamma v} \dots\dots\dots (2-9)$$

dimana:

A = luas penampang nominal konduktor yang diperlukan (m²)

I = kuat arus dalam konduktor (A)



l = jarak permulaan konduktor hingga ujung (m)

v = jatuh tegangan dalam konduktor (V)

γ = daya hantar jenis dari bahan konduktor yang digunakan (S/m)

Untuk tembaga : $\gamma \approx 56,2 \cdot 10^6$ S/m

Untuk aluminium : $\gamma \approx 33 \cdot 10^6$ S/m

2.7 Kapasitas Arus Pada Konduktor

Untuk tujuan keamanan, ditetapkan bahwa semua kabel harus cukup besar bagi arus yang melaluinya. Bila arus mengalir melalui sebuah penghantar, tahanan yang diberikan oleh penghantar tersebut menghasilkan kalor. Pertambahan kalor sebanding dengan tahanan penghantar yang bergantung pada luas penampang penghantar tersebut. Karena pemanasan yang berlebih dapat merusak isolasi maka ukuran penghantar harus sesuai untuk mencegah terjadinya hal tersebut.

Pertama-tama harus ditentukan arus yang dipakai berdasarkan daya beban yang dihubungkan. Untuk arus bolak-balik 3 fasa yaitu (Harten, 1982: 144):

$$I = \frac{P}{V_L \cos \varphi \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2-10)$$

dimana:

I = arus beban (A)

P = daya (W)

V_L = tegangan line (V)

$\cos \varphi$ = faktor daya

2.8 Regulasi Tegangan

Mempertahankan tegangan untuk tetap stabil di sistem distribusi sangatlah sulit, karena tegangan akan jatuh di semua bagian sistem seiring perubahan beban. Akan tetapi kerugian karena jatuh tegangan yang besar dapat diminimalisir salah satunya adalah dengan memperhatikan pengaturan tegangan sistem. Regulasi tegangan atau pengaturan tegangan sistem adalah suatu konsepsi untuk mempertahankan tegangan yang relatif stabil di ujung-ujung konsumen, naik turunnya tegangan pada tingkat yang masih dapat diterima dan dalam batas penyebaran yang diizinkan (Hadi, 1991: 58).

Perubahan pada tegangan terminal sekunder transformator dinyatakan dalam persentase (atau dalam per unit) terhadap tegangan nominal sekunder pada saat berbeban dengan faktor daya yang dapat berkurang hingga nol. Dengan beban tertentu

dan faktor daya tertentu maka regulasi tegangan transformator dapat dirumuskan sebagai berikut (Hadi, 1991: 58):

$$VR = \frac{V_{S(NL)} - V_{S(FL)}}{V_{S(FL)}} \times 100\% \quad (2-11)$$

Dimana:

$V_{S(NL)}$ = Tegangan terminal sekunder pada saat tanpa beban (Volt)

$V_{S(FL)}$ = Tegangan terminal sekunder untuk setiap beban (Volt)

V_R = Regulasi tegangan transformator (%)

2.9 Persamaan Aliran Daya DC

Persamaan aliran AC sistem tenaga disampaikan dalam persamaan yang mencangkup hubungan daya dengan besaran terkait. (McDonald, 1994: 378)

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2-12)$$

Daya aktif cabang (*Branch active power*) dirumuskan (McDonald, 1994: 379)

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - t_{ij} G_{ij} V_i^2 \quad (2-13)$$

dimana:

N = nomor node

P_i = injeksi Daya aktif di node i

V_i = besar tegangan di node i

$j \in i$ = node node yang langsung terhubung dengan node i , termasuk $j = i$

i = 1, 2, 3..., N

θ_{ij} = perbedaan sudut fasa antara cabang ij (McDonald, 1994: 379)

$$\theta_{ij} = \theta_i + \theta_j \quad (2-14)$$

t_{ij} = rasio transformer (pu)

G_{ij} = bagian real elemen matrik admitansi

B_{ij} = bagian imajiner elemen matrik amintansi

Karena,

$$G_{ij} + jB_{ij} = \frac{-1}{r_{ij} + jx_{ij}} = \frac{-r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} + j \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (2-15)$$

r_{ij} = resistansi saluran ij

x_{ij} = reaktansi saluran ij

Persamaan aliran daya AC tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan aliran daya DC, dengan beberapa asumsi (McDonald, 1994: 379):

1. Resistansi saluran tinggi diabaikan, karena jauh lebih kecil dibandingkan dengan reaktansi saluran, ($r_{ij} \ll x_{ij}$), sehingga:

$$r_{ij} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

2. Perbedaan sudut fasa tegangan tinggi adalah sangat kecil, sehingga:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{ij} &\approx 1 \\ \sin \theta_{ij} &\approx \theta_{ij} \quad \dots\dots\dots (2-17) \end{aligned}$$

3. Tegangan tiap node per unit sama dengan 1.0

$$V_i = 1.0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad \dots\dots\dots (2-18)$$

4. Tidak mempertimbangkan tapping transformator dan efek saluran ke tanah, sehingga semua transformator mempunyai rasio yang sama:

$$t_{ij} = 1 \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

Substitusikan persamaan (2-14) sampai (2-19) ke persamaan (2-12) sehingga didapat:

$$P_i = \sum_{j \in i} B_{ij} \theta_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

Dari persamaan (2-15), $B_{ij} = 1/x_{ij}$ untuk simplikasi acak (*sake of simplicity*) diberikan:

$$B_{ij} = -\frac{1}{x_{ij}} \quad \dots\dots\dots (2-21)$$

Substitusi persamaan (2-21) dan (2-14) ke persamaan (2-20), menjadi:

$$P_i = -\sum_{j \in i} \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Maka,

$$P_i = \sum_{j \in i} B_{ij} \theta_j \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Atau dalam bentuk matrik:

$$P = B\theta \quad \dots\dots\dots (2-22)$$

Dimana P adalah vektor daya masuk node dan elemen ke-i nya diberikan oleh persamaan (McDonald, 1994: 380):

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

dimana:

P_{Gi} = keluaran generator pada node i

P_{Di} = beban pada node i

θ = vektor sudut fasa

B = matrik dengan elemen bagian imajiner matrik admintasi

Persamaan (2-20) juga bisa di ekspresikan menjadi:

$$\theta = XP \dots\dots\dots (2-24)$$

Dengan X adalah matrik impedansi (McDonald, 1994: 380).

$$X = B^{-1} \dots\dots\dots (2-25)$$

Substitusikan persamaan (2-14) sampai (2-19) ke persamaan (2-13), diperoleh daya aktif cabang dengan asumsi daya mengalir dari node i ke node j, sehingga:

$$P_{ij} = B_{ij} \theta_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}}$$

Atau dalam bentuk matrik:

$$P_L = B_L \phi \dots\dots\dots (2-26)$$

Dimana:

P_L = matrik vektor daya aktif cabang $L \times 1$

B_L = matrik diagonal yang elemennya admitansi cabang

ϕ = matrik cabang vektor perbedaan sudut fasa terminal $L \times 1$

L = jumlah cabang di sistem

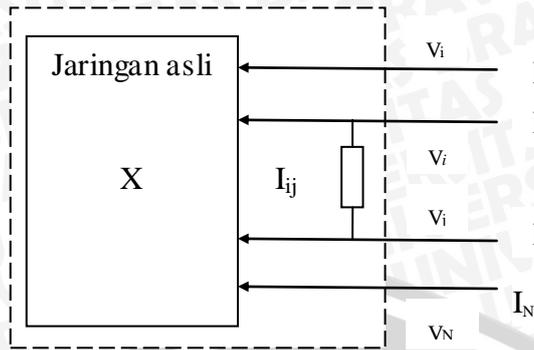
Anggap matrik insiden adalah A, sehingga diperoleh:

$$\phi = A \theta \dots\dots\dots (2-27)$$

Persamaan (2-22), (2-23) dan (2-26) adalah linier dan dasar persamaan aliran daya DC. Pada kondisi operasi sistem yang telah ditentukan, variabel keadaan θ dapat diperoleh dari invers matrik persamaan (2-24).

Daya aktif cabang dapat diperoleh dari persamaan (2-26). Dari penjelasan di atas dapat terlihat bahwa mudah dalam menyelesaikan bagian sistem (*system state*) dan aliran daya aktif dengan persamaan aliran daya DC. Berikut akan ditunjukkan bahwa karena persamaan adalah linier, dimungkinkan untuk membawa perhitungan aliran beban yang cepat setelah penambahan atau pemutusan saluran.

Anggap bahwa matrik jaringan asli X dan suatu cabang k dihubungkan pada node i dan j, cabang k bisa mempunyai saluran atau tidak. Jika ada saluran dengan reaktansi x_k ditambahkan pada cabang k maka suatu jaringan baru akan terbentuk, seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram skematik penambahan cabang

Sumber: McDonald, 1994: 381

Matrik impedansi jaringan baru adalah X' , vektor arus insiden I dan vektor tegangan adalah V .

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}$$

Sehingga variabel di atas dekat dengan persamaan:

$$V = X' I \dots\dots\dots (2-28)$$

Arus yang diinjeksikan ke jaringan diberikan dengan:

$$I' = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i - I_{ij} \\ \vdots \\ I_j + I_{ij} \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = I - e_k I_{ij} \dots\dots\dots (2-29)$$

Dengan e_k adalah transpose baris ke- k dari matrik insiden A :

$$e_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{node } i \\ \leftarrow \text{node } j \end{array}$$

Dari persamaan node asli yaitu (McDonald, 1994: 382):

$$V = X I' = X I - X e_k I_{ij} \dots\dots\dots (2-30)$$

Perbedaan tegangan terminal (McDonald, 1994: 382):

$$V_i - V_j = x_k I_{ij} = e_k^T V \dots\dots\dots (2-31)$$



Substitusikan persamaan (2-30) ke persamaan (2-31), diperoleh:

$$x_k I_{ij} = e_k^T X I - e_k^T X e_k I_{ij} \dots\dots\dots (2-32)$$

Sehingga,

$$I_{ij} = \frac{e_k^T X I}{x_k + e_k^T X e_k} \dots\dots\dots (2-33)$$

Dari persamaan (2-28)

$$V = \left(X - \frac{X e_k e_k^T X}{x_k + e_k^T X e_k} \right) I \dots\dots\dots (2-34)$$

Bandingkan persamaan (2-34) dengan persamaan (2-28), akan diperoleh matrik impedansi baru:

$$X' = \left(X - \frac{X e_k e_k^T X}{x_k + e_k^T X e_k} \right)$$

Setelah direduksi menjadi:

$$X' = X + \beta_k X e_k e_k^T X \dots\dots\dots (2-35)$$

Dimana,

$$\beta_k = \frac{-1}{x_k + \gamma_k} \dots\dots\dots (2-36)$$

$$\gamma_k = e_k^T X e_k = x_{ii} + x_{jj} - x_{ij} - x_{ji} \dots\dots\dots (2-37)$$

dimana x_{ii} , x_{ij} , x_{ij} , x_{ji} adalah elemen dari X. Dari persamaan (2-30), penambahan matrik impedansi nodal akan menjadikan:

$$\Delta X = X' - X = \beta_k X e_k e_k^T X \dots\dots\dots (2-38)$$

Berdasarkan persamaan (2-38) dan (2-24) pada kondisi daya masukan konstan, perubahan vektor keadaan asli setelah penambahan saluran k:

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= \Delta X P \\ &= \beta_k X e_k e_k^T X P \\ &= \beta_k X e_k e_k^T \theta \\ &= \beta_k X e_k \phi_k \dots\dots\dots (2-39) \end{aligned}$$

$\phi_k = \theta_i - \theta_j$ adalah perbedaan sudut fasa terminal cabang k sebelum penambahan. Vektor sudut fasa keadaan jaringan baru:

$$\theta' = \theta + \Delta \theta = \theta + \beta_k X e_k \phi_k \dots\dots\dots (2-40)$$



2.10 Metode Successive Backward

Metode modern optimalisasi perencanaan jaringan tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu metode *Heuristic* dan metode optimalisasi matematis (McDonald, 1994: 388). Optimalisasi dilakukan dengan minimalisasi biaya pembangunan saluran. Indikator besarnya biaya saluran adalah dari panjang atau pendeknya saluran yang direncanakan, dengan kata lain pertambahan panjang saluran sebanding dengan pertambahan biaya pembangunan. Metode *Heuristic* sendiri terdiri atas:

1. Pengecekan beban lebih (*overload checking*)
2. Analisis sensitivitas (*sensitivity analysis*)
3. Rencana pembentukan (*sceme formation*)

Analisis sensitivitas banyak digunakan pada perencanaan sistem tenaga, pengambilan keputusan, operasi dan kontrol. Metode ini akan menganalisis hubungan antara indeks untuk kerja operasional, pengambilan keputusan, dan variabel kontrol untuk menentukan akibat variabel ini terhadap sistem. Metode memberikan alternatif yang perlu dilakukan untuk memperbaiki kinerja sistem.

Persoalan dalam tahap rencana pembentukan (*sceme formation*) adalah menganalisis akibat penambahan saluran baru untuk mengurangi beban lebih (*overload*) dan perbaikan distribusi aliran jaringan. Berikut adalah macam metode perencanaan jaringan *Heuristic* berdasarkan analisis sensitivitas yang dibagi menjadi dua macam:

- a. Metode Successive Expansion

Menghitung nilai efektif dari saluran yang mungkin dibuat dan seberapa besar pembebanan lebih yang bisa dikurangi, kemudian saluran yang paling efektif ditambahkan ke sistem dan jaringan dikembangkan tahap demi tahap.

- b. Metode *Suscsesive Backward*

Menambahkan semua saluran yang mungkin pada jaringan khayal (termasuk di dalamnya jaringan aslinya) kemudian menghapus saluran yang mempunyai keefektifan terkecil berdasarkan kapasitas bebannya di sistem. Penghapusan saluran dilakukan dengan analisis aliran daya terhadap jaringan khayal, semua saluran dibandingkan keefektifannya dan saluran yang keefektifannya paling kecil akan dihapus, sampai tidak ada perubahan di jaringan (Kusuma, 2008: 6).

Metode ini akan memperkirakan akibat suatu saluran pada sistem dengan mencari besar arus yang ditransmisikan. Oleh karena itu, harus diperhitungkan faktor pengaruh investasi dan berdasarkan saluran yang membawa arus terbesar sebagai saluran yang efektif. Adapun indeks keefektifan didefinisikan dengan (McDonald, 1994: 388):

$$E_L = \frac{|P_L|}{C_L^2}, L \in S_e \quad \dots\dots\dots (2-41)$$

Dimana:

P_L = matrik vektor daya aktif cabang $L \times 1$

C_L = investasi pembangunan saluran L

S_C = saluran yang mungkin

Ketika akan dilakukan penghapusan saluran yang keefektifannya paling kecil harus diperhatikan beberapa hal berikut:

1. Apakah menyebabkan diskoneksi sistem (*disconnection*)
2. Apakah menyebabkan pembebanan lebih pada saluran yang lainnya (*overload*), dimana untuk mengeceknya digunakan persamaan berikut (McDonald, 1994: 386):

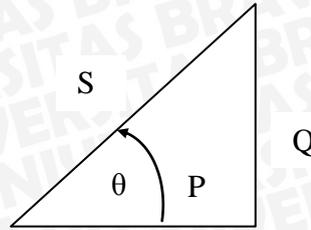
$$|P_k| \leq \overline{P_k} \quad \dots\dots\dots (2-42)$$

Dimana P_k adalah perhitungan aliran daya di saluran k , sedangkan $\overline{P_k}$ adalah kapasitas transmisi dari saluran k dan ditentukan oleh pemanasan berlebih (*overheating*), stabilitas dan jatuh tegangan.

2.11 Analisis Aliran Daya

Dalam suatu perencanaan sistem tenaga, tahap analisis aliran daya menjadi faktor penting yang tidak bisa ditinggalkan karena baik perencanaan maupun analisis adalah saling terkait. Aliran daya adalah solusi untuk kondisi normal sistem tiga fasa yang *steady-state* dari sistem tenaga elektrik. (Gonen, 1986: 457).

Sebelum memasuki perhitungan analisis aliran daya, penting untuk diketahui bagaimana penghitungan daya itu sendiri. Daya merupakan ungkapan untuk energi listrik per satuan waktu. Dalam prakteknya untuk mempermudah definisi dari daya itu sendiri, maka dibuatlah suatu segitiga daya.



Gambar 2.10 Segitiga Daya

Sumber: Smith, 1992: 171

Dimana daya nyata dirumuskan sebagai $P= I^2 R = VI \cos \theta$, (2-43)

daya reaktif dirumuskan $Q= I^2 X= VI \sin \theta$ (2-44)

dan daya kompleks dirumuskan sebagai $S= I^2 Z= VI$ (2-45)

2.11.1 Perhitungan per unit

Dalam mempermudah perhitungan mengingat tidak menutup kemungkinan perhitungan menggunakan angka dengan bilangan yang tidak bulat ataupun dengan bilangan dengan nilai besar. Untuk mengatasinya maka bisa digunakan perhitungan menggunakan sistem per unit. Nilai per unit disini sudah dinormalisasikan terhadap nilai patokan tertentu sehingga lebih ringkas dalam perhitungannya. Biasanya besaran megavoltamperes (MVA) dan tegangan (kV) digunakan sebagai besaran dasar. Untuk sistem satu fasa atau tiga fasa, dapat ditulis seperti berikut (Stevenson, 1994: 26):

arus sebagai dasar, $A = \frac{KVA \text{ base}}{KV \text{ base}}$ (2-46)

impedansi dasar (*base*), $\Omega = \frac{kV \text{ base}}{A \text{ base}}$ (2-47)

$\Omega = \frac{(kV \text{ base})^2}{kVA \text{ base}}$ (2-48)

daya dasar, kW = kVA base (2-49)

impedansi per unit dari elemen = $\frac{\text{impedansi nyata}}{\text{impedansi dasar}}$ (2-50)

2.11.2 Aljabar Matrik

Seiring perkembangan zaman, sistem tenaga menjadi semakin rumit dan perlu pengembangan juga dalam segi metode analisis karena tidak mungkin semuanya harus diselesaikan dengan cara manual jika yang dihadapi adalah sistem tenaga yang kompleks. Untuk mempermudah perhitungan dan analisis maka dibuatlah suatu aljabar matrik untuk merumuskan dan menyelesaikan persoalan sistem tenaga yang kompleks. Sebuah matrik didefinisikan sebagai susunan empat persegi dari angka-angka yang

disebut elemen, disusun secara sistematis dalam baris m dan kolom n . (Hadi, 1991: 39). Notasi matrik menjelaskan beberapa persamaan sekaligus dengan cara yang ringkas untuk selanjutnya dapat dipermudah perhitungannya menggunakan bantuan komputer digital. Penulisan matrik M dari elemen-elemen $m \times n$ adalah sebagai berikut:

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mj} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Istilah a_{ij} menentukan elemen dan matrik dalam baris ke- i dan kolom ke- j .

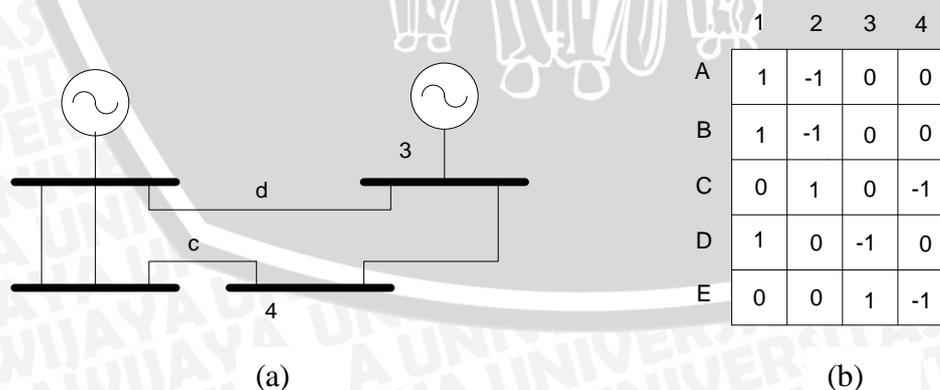
Di dalam perhitungan sebelumnya harus diawali dengan perumusan matrik rangkaian terlebih dahulu, yaitu proses mengubah rangkaian listrik maupun *line diagram* ke dalam bentuk aljabar matrik. Salah satu matrik bantu yang bisa mempermudah perhitungan adalah bentuk matrik insidensi $[A]$. Dimana matrik ini menjelaskan hubungan dari elemen-elemen rangkaian. Sembarang node dipilih sebagai titik patokan, kemudian elemen-elemen dalam matrik dari node yang lain ditentukan dengan patokan ini. Elemen-elemen matrik insidensi $[A]$ meliputi:

$a_{ij} = 1$, apabila elemen ke- i datang dan meninggalkan node ke- j

$a_{ij} = -1$, apabila elemen menuju ke node ke- j

$a_{ij} = 0$, apabila elemen ke- i tidak menuju ke node ke- j

Sebagai contoh adalah gambar di bawah ini:



Gambar 2.11 Rangkaian dan matrik bus: (a) Rangkaian; (b) Matrik bus datang

Sumber: Hadi, 1991: 48

Maka matrik insidensi [A] dapat ditulis:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Jika matrik [Y] adalah matrik admitansi sederhana, maka dari matrik insidensi ini nantinya dapat dicari matrik admitansi bus [Ybus], yaitu:

$$[Ybus] = [A]^T [\text{diagonal } Y] [A] \dots\dots\dots (2-51)$$

2.11.3 Metode Iterasi Gauss-Seidel

Dalam merumuskan suatu persoalan yang mencangkup kerangka dasar bus, penampilan dari rangkaian yang terhubung dinyatakan dengan persamaan node bebas (n-1) dimana n merupakan jumlah node. Notasi matriknya dalam bentuk impedansi adalah (Hadi, 1991: 46):

$$E_{bus} = Z_{bus} I_{bus}$$

Jika ditulis dalam bentuk arus maka:

$$I_{bus} = Y_{bus} E_{bus} \dots\dots\dots (2-52)$$

dimana,

E_{bus} = vektor dari tegangan-tegangan node yang diukur terhadap node patokan

I_{bus} = vektor arus-arus node

Z_{bus} = matrik impedansi dari bus

Y_{bus} = matrik admitansi dari bus

Dalam merumuskan persoalan aliran beban, pertama kali harus disusun data tetap dari rangkaian dan hubungannya. Pembangkitan daya atau pembebanan pada busbar tertentu diperinci. Daya yang terletak pada sembarang node dapat memakai bentuk-bentuk sebagai berikut:

- Pada sembarang busbar i, jumlah daya kompleks ($S_i = P_i + jQ_i$) dimasukkan ke atau dikeluarkan dari rangkaian yang disebutkan satu persatu.
- Pada sembarang busbar i, biasanya sebuah generator atau sebuah busbar menghubungkan dua rangkaian tambahan yang dipakai sebagai bus tegangan yang diatur. Daya (P) dan tegangan (V) disebutkan satu persatu.

- c. Dengan tidak diketahuinya kehilangan daya transmisi rangkaian, paling tidak ada satu keluaran generator S_i tidak diketahui. Yang mana tegangan masih tetap dapat dinyatakan dalam besaran dan fasa. Ini disebut bus berayun (*swing bus*)

Penyelesaian suatu sistem aliran daya menggunakan teknik perulangan, karena adanya ketidak linieran persamaan aljabar yang digambarkan sistem daya. Akan tetapi jawaban dari perhitungan harusnya memenuhi hukum Kirchoff yaitu jumlah aljabar arus pada suatu node atau jumlah tegangan pada suatu loop harus sama dengan nol. Salah satu dari hukum ini digunakan sebagai penguji konvergensi jawaban dalam perhitungan metode perulangan.

Variabel tegangan dan arus pada sembarang node i dalam rangkaian ditentukan oleh kebutuhan daya yang dinyatakan dengan:

$$S_i = V_i^* I_i = P_i + jQ_i$$

dimana S_k adalah kompleks konjugasi daya, maka arus node I_k adalah:

$$I_i = \frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots (2-53)$$

Salah satu metode yang digunakan adalah metode iterasi Gauss Seidel. Yang mana metode ini merupakan pengembangan dari metode iterasi Gauss, perbedaannya adalah metode iterasi Gauss-Seidel menggunakan teknik substitusi yang lebih efisien.

Bentuk persamaan iterasi Gauss-Seidel adalah (Gonen, 1986: 465):

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{11}} (b_1 - a_{12}x_2^{(k)} - a_{13}x_3^{(k)} - \dots - a_{1n}x_n^{(k)}) \\ x_2^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{22}} (b_2 - a_{21}x_1^{(k+1)} - a_{23}x_3^{(k)} - \dots - a_{2n}x_n^{(k)}) \\ x_3^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{33}} (b_3 - a_{31}x_1^{(k+1)} - a_{32}x_2^{(k)} - \dots - a_{3n}x_n^{(k)}) \\ &\vdots \\ x_n^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{nn}} (b_n - a_{n1}x_1^{(k+1)} - a_{n2}x_2^{(k+1)} - \dots - a_{n,n-1}x_{n-1}^{(k+1)}) \dots (2-54) \end{aligned}$$

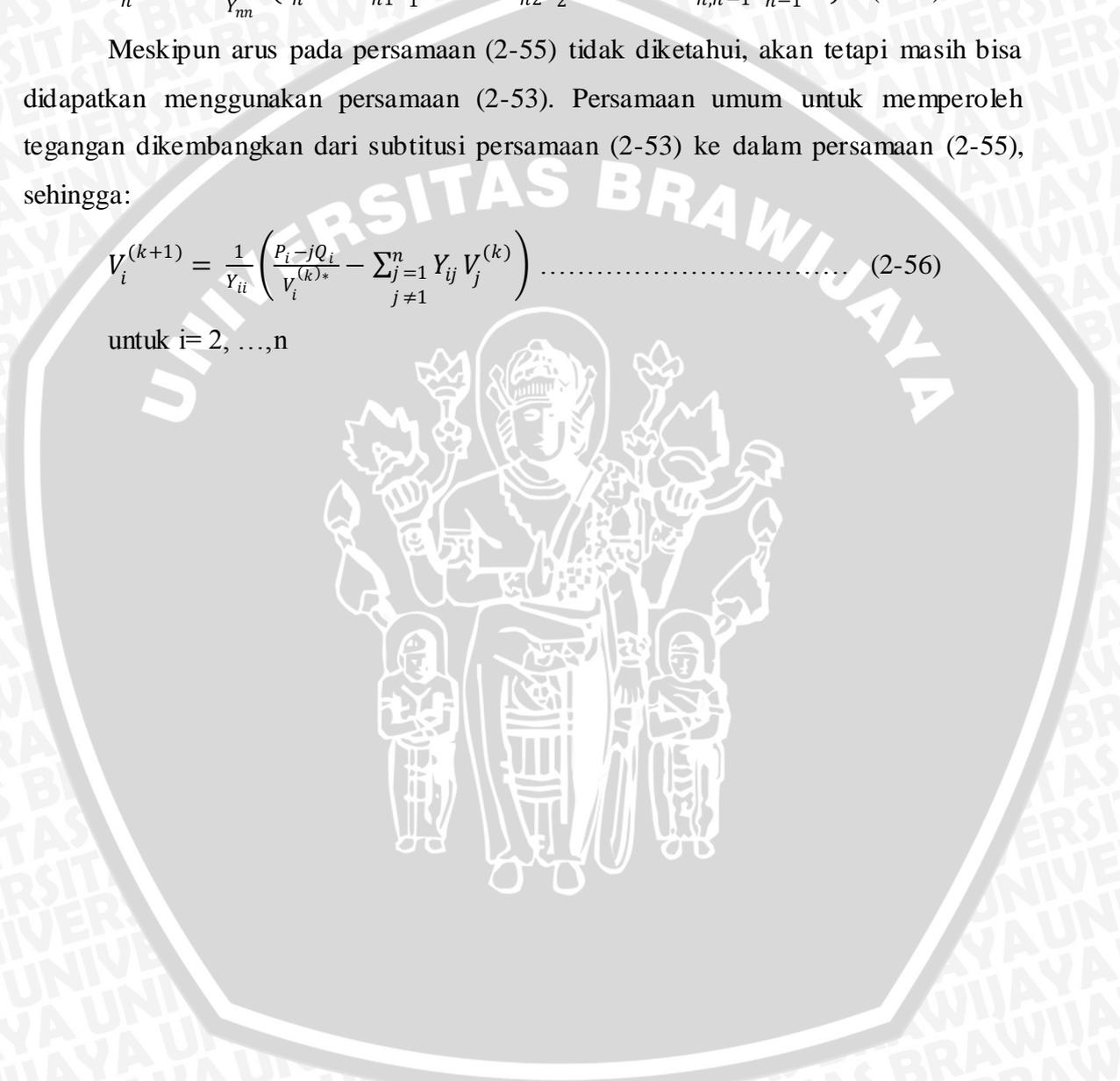
Untuk penerapannya untuk analisis sistem tenaga, persamaan (2-54) diatas dapat digunakan untuk mencari nilai tegangan jika diketahui impedansi dan daya kompleksnya. Caranya adalah dengan disesuaikan dengan persamaan (2-52), sehingga menjadi:

$$\begin{aligned}
 V_1^{(k+1)} &= \frac{1}{Y_{11}} (I_1^{(k)} - Y_{12}V_2^{(k)} - Y_{13}V_3^{(k)} - \dots - Y_{1n}V_n^{(k)}) \\
 V_2^{(k+1)} &= \frac{1}{Y_{22}} (I_2^{(k)} - Y_{21}V_1^{(k+1)} - Y_{23}V_3^{(k)} - \dots - Y_{2n}V_n^{(k)}) \\
 V_3^{(k+1)} &= \frac{1}{Y_{33}} (I_3^{(k)} - Y_{31}V_1^{(k+1)} - Y_{32}V_2^{(k+1)} - \dots - Y_{3n}V_n^{(k)}) \\
 &\vdots \\
 V_n^{(k+1)} &= \frac{1}{Y_{nn}} (I_n^{(k)} - Y_{n1}V_1^{(k+1)} - Y_{n2}V_2^{(k+1)} - \dots - Y_{n,n-1}V_{n-1}^{(k+1)}) \dots (2-55)
 \end{aligned}$$

Meskipun arus pada persamaan (2-55) tidak diketahui, akan tetapi masih bisa didapatkan menggunakan persamaan (2-53). Persamaan umum untuk memperoleh tegangan dikembangkan dari substitusi persamaan (2-53) ke dalam persamaan (2-55), sehingga:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \dots \dots \dots (2-56)$$

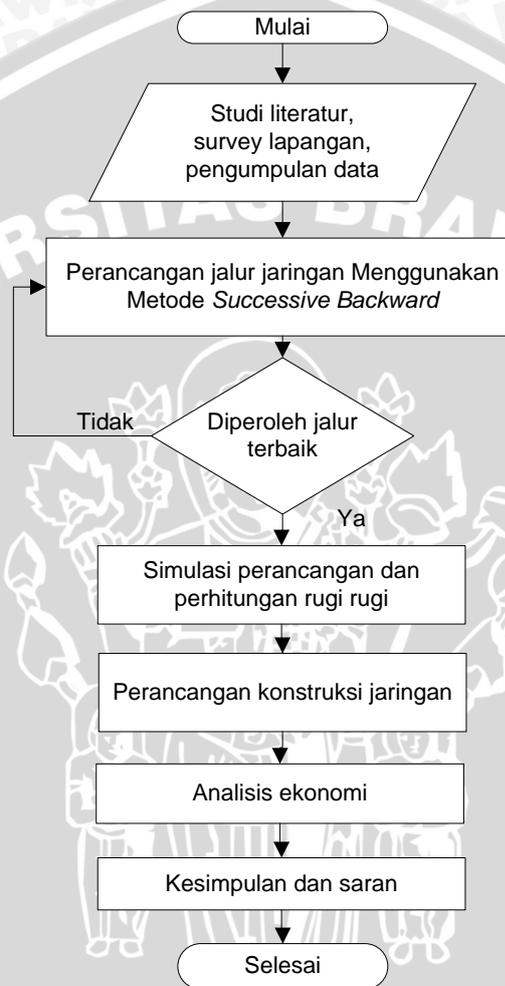
untuk $i=2, \dots, n$



BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam perencanaan jaringan listrik ini dapat dilihat pada kerangka umum penelitian pada gambar 3.1 dibawah ini:



Gambar 3.1 Kerangka umum metode pengerjaan penelitian

3.1 Pengumpulan Dasar Teori dan Literatur Terkait

Tahap pertama dari penelitian ini adalah pengumpulan dasar teori terkait yang akan menjadi acuan ataupun landasan dalam pelaksanaan. Sumber dasar teori yang dipergunakan dapat berupa buku penunjang, artikel, *browsing* internet, jurnal dan hasil dari penelitian sebelumnya yang berupa skripsi, antara lain:

- Mempelajari teknologi sistem distribusi tegangan menengah
- Mempelajari dasar perencanaan sistem distribusi

- c. Mempelajari spesifikasi dari komponen komponen konstruksi
- d. Mempelajari dasar perhitungan finansial dan ekonomi

Dari kegiatan pengumpulan dasar teori ini akan dihasilkan keputusan mengenai tempat yang sekiranya layak untuk disurvei dengan latar belakang yang mendasarinya.

3.2 Survey Lapangan

Survey lapangan ini dibagi menjadi dua, yang pertama adalah survey untuk penentuan lokasi yang akan diangkat menjadi topik skripsi ini yaitu dengan mendatangi calon tempat sasaran dan survey kedua untuk mengamati dan mengetahui kondisi riil lapangan serta mendapatkan informasi informasi penting yang terkait guna melengkapi data data yang diperlukan.

3.3 Pengumpulan Data

3.3.1 Data primer

Data primer adalah data yang langsung diambil pada lapangan yang menunjang data data yang lain, dalam data ini yang diambil adalah kondisi fisik yang didapat melalui observasi lahan, dokumentasi dan *interview* untuk mengetahui kondisi riil di lapangan sehingga menunjang dalam perencanaan nantinya. Adapun data primer yang dimaksud meliputi:

1. Panjang jalur jaringan listrik alternatif yang akan direncanakan

Untuk mendapatkan data jarak, penulis menggunakan citra satelit sebagai media bantu yang diambil dari *Google Earth*. Dan untuk mengolahnya dipergunakan *software Argis* dimana dari software ini nantinya dapat diketahui jarak dari satu tempat ke tempat lain. Pertama tama mencari lokasi lahan yang akan dikerjakan, kemudian mencari citra satelit yang jelas dan terbaru, penulis mengambil di citra satelit di tanggal 21 April 2013.

2. Letak titik-titik tiang listrik

Penentuan titik-titik tiang listrik masih menggunakan bantuan peta dari citra satelit hasil olahan *software Argis*. Dari peta yang dibuat maka selanjutnya dapat dilihat dan ditentukan dimana menempatkan tiang, tentunya hal ini disesuaikan dengan kondisi riil lapangan dengan mencocokkannya saat observasi lahan.

3. Biaya operasional selama menggunakan mesin diesel

Data ini didapat dengan melakukan *interview* dengan operator pompa dan juga pihak terkait. Hal hal yang perlu ditanyakan adalah jam kerja pompa dalam beroperasi, konsumsi bahan bakar solar perhari, gaji operator perhari, biaya perawatan dan lain-lain.

3.3.2 Data Sekunder

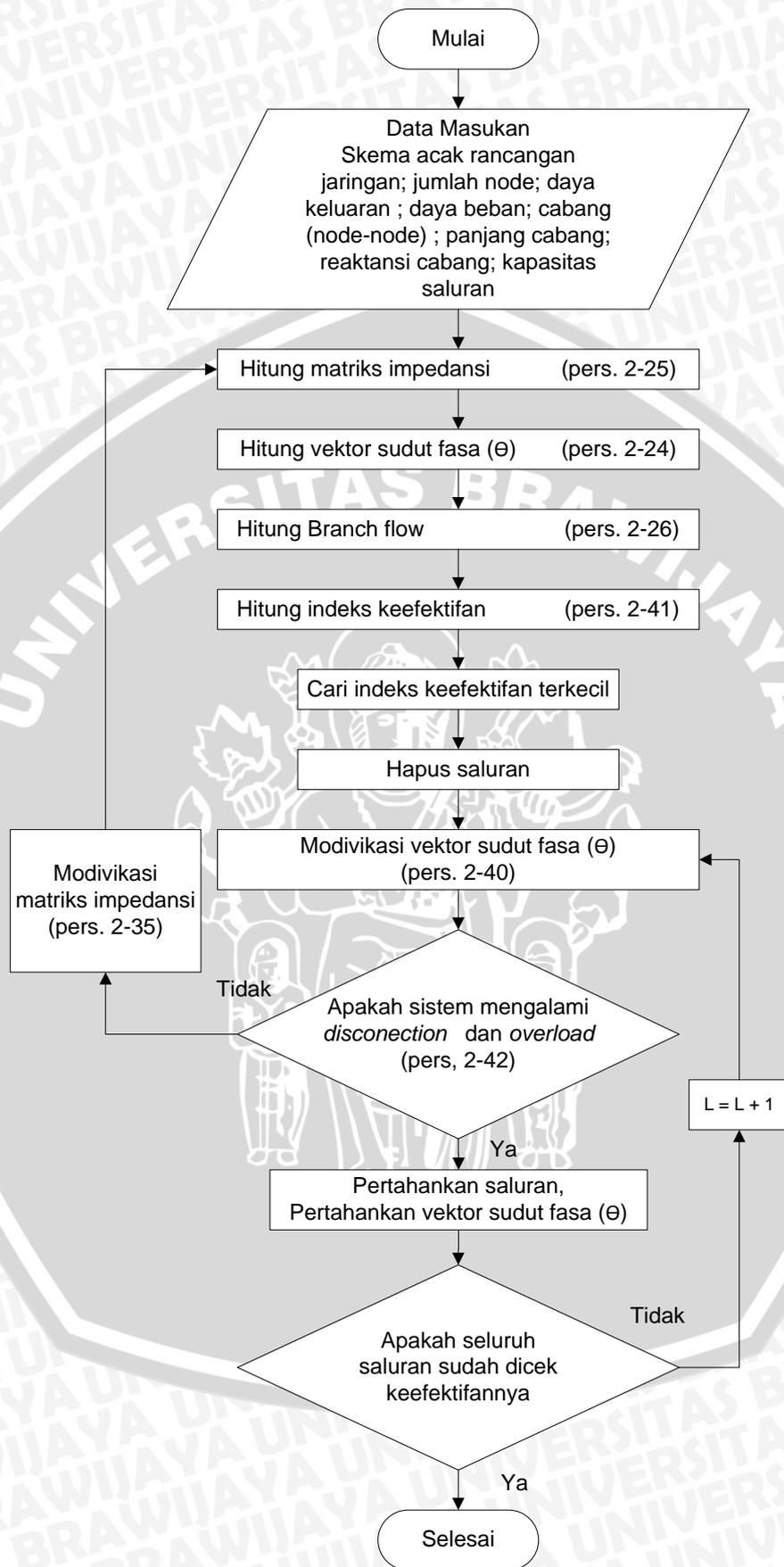
Data sekunder adalah data yang diperoleh dari atau berasal dari bahan perpustakaan peneliti secara tidak langsung melalui media perantara. Di penelitian ini diambil pada saat pelaksanaan pengambilan data sesuai surat balasan yang diterbitkan PTPN XI (Persero) yaitu tanggal 28 Mei – 1 Juni 2013, data yang diambil antara lain:

1. Peta topologi lahan HGU PTPN XI di PG Asembagoes Situbondo
2. Peta perencanaan yang terdapat titik peletakan 13 motor listrik penggerak pompa (*electric pump*) pengganti 28 pompa bermesin bakar diesel

3.4 Perencanaan

Tahap perencanaan ini berupa perencanaan jalur jaringan listrik dengan menggunakan metode *successive backward*. Untuk mendapatkan jalur saluran yang paling efisien maka harus dicapai beberapa aspek dari perencanaan yang dilakukan. Salah satu aspek yang dimaksud adalah dari segi rugi rugi saluran yang dihasilkan, kelebihan dan kekurangan dari perencanaan saluran dan panjang total keseluruhan saluran. Sebagai pembanding, dalam penulisan ini nantinya dibuat tiga macam alternatif perencanaan kemudian diambil yang paling efisien.

Adapun intisari dari metode *successive backward* ini adalah menambahkan semua saluran yang mungkin pada jaringan khayal kemudian saluran dieliminasi satu per satu berdasarkan indeks keefektifannya hingga tidak ditemukan lagi saluran yang bisa dihapus. Penghapusan saluran dilakukan dengan analisis aliran daya terhadap jaringan khayal yang dibagi dengan kuadrat investasi untuk membangun saluran. Semua saluran dibandingkan indeks keefektifannya dan saluran yang keefektifannya paling kecil akan dihapus, dimana dalam proses penghapusan harus dipenuhi beberapa syarat pengecekan. Berikut adalah tahap tahapnya:



Gambar 3.2 Diagram alir metode *Successive Backward*

Tahap tahapnya adalah:

1. Menentukan titik titik node yang akan dibuat jaringan. Data-data yang diperlukan meliputi:
 - a. Jumlah node
 - b. Daya beban tiap node
2. Menghubungkan node satu dengan yang lain sesuai perkiraan yang terbaik, selanjutnya penghubung antar node ini akan disebut dengan cabang. Beri nama cabang agar lebih memudahkan dalam perhitungan. Data data yang diperlukan meliputi:
 - a. Cabang (node-node)
 - b. Impedansi semua cabang (Ω)
 - c. Kapasitas saluran (kVA)
 - d. Panjang tiap cabang (km)

Cabang	Node-node	Panjang (km)	Impedansi Data (Ω)

3. Menyusun matrik insidensi (A)

Matrik insidensi A disini menjelaskan bagaimana node-node terhubung oleh cabang L. Apabila matrik insidensi dideklarasikan $A_{L \times N}$ dimana L adalah menyatakan cabang dan N adalah node, maka komponen baris pada matrik insidensi A menjelaskan cabang dan kolom pada matrik menjelaskan node dari jaringan.

4. Menyusun matrik impedansi sistem yang terdiri dari nilai resistansi dan reaktansi. Di persamaan (2-28) hanya dicantumkan nilai reaktansi (x) karena nilai resistansi (r) dari persamaan di bab sebelumnya diabaikan mengingat penjelasan yang dijabarkan dilakukan di saluran transmisi. Untuk kasus ini setelah melakukan konsultasi dengan dosen pembimbing maka nilai resistansi tidak diabaikan, sehingga yang digunakan adalah nilai impedansi yang meliputi nilai resistansi dan reaktansinya. Selanjutnya impedansi cabang diubah terlebih dahulu menjadi admitansi cabang, kemudian admitansi cabang digunakan untuk menyusun matrik admitansi sistem (Y), Akhirnya matrik impedansi sistem (Z) diperoleh dengan cara menginverskan matrik admitansi sistem di persamaan (2-25) menjadi:

$$Z = Y^{-1}$$

5. Menghitung matrik total daya (P), yaitu selisih daya pembangkitan dan daya pembebanan pada tiap tiap node $P = P_G - P_D$, kemudian menghitung vektor sudut fasa θ menggunakan persamaan (2-24) dengan tetap menggunakan nilai impedansi (Z), menjadi:

$$\theta = ZP$$

6. Menghitung aliran daya (*Branch flow*) menggunakan persamaan (2-26), karena perhitungan daya yang dicari adalah daya kompleks (S), maka persamaan menjadi:

$$S_L = B_L \phi$$

7. Menghitung indeks keefektifan (*effectiveness index*) dengan persamaan (2-41).

$$E_L = \frac{|S_L|}{C_L^2}$$

8. Menentukan indeks keefektifan.

Cabang	Node- node	Panjang (km)	Branch Flow (kVA)	Indeks keefektifan	Rangking

9. Menghapus sementara saluran yang mempunyai rangking indeks keefektifan terkecil.
10. Mengecek apakah terjadi diskoneksi sistem dengan persamaan (2-36), akan tetapi mengganti nilai reaktansi (x) menjadi nilai impedansi (z). Yaitu apakah penjumlahan dari $z_k + \gamma_k$ adalah nol, dan pengecekan pembebanan lebih dengan persamaan (2-42) $|S_k| \leq \overline{S}_k$. Jika terjadi diskoneksi dan pembebanan lebih, maka penghapusan saluran dibatalkan dengan konsekuensi mempertahankan penggunaan vector sudut fasa sebelum dimodifikasi. Akan tetapi jika sebaliknya maka cabang wajib dihapus.
11. Modifikasi vector sudut fasa (θ) akibat penghapusan cabang menggunakan persamaan (2-40).

$$\theta' = \theta + \beta_k Z e_k e_k^T \theta$$

12. Modifikasi matrik impedansi (Z) jika penghapusan saluran tidak menimbulkan diskoneksi dan pembebanan lebih sistem menggunakan

persamaan (2-35) kemudian indeks keefektifan disusun lagi dari vektor sudut fasa (θ) dan matrik impedansi baru.

$$Z' = Z + \beta_k Z e_k e_k^T Z$$

Langkah - langkah di atas berlanjut sampai tidak ada cabang yang dapat dihapus dan semua cabang sudah dilakukan pengecekan.

3.5 Simulasi dan Perhitungan Rugi-Rugi

Simulasi perhitungan dilakukan dengan menghitung parameter yang dihasilkan saat sistem dioperasikan. Ketiga alternatif yang dibuat masing-masing disimulasikan dengan dibantu software Matlab 7.5.1. Dari sini akan diperoleh nilai rugi-rugi jaringan dan jatuh tegangan untuk kemudian dilakukan analisis untuk menentukan alternatif yang dipilih.

3.6 Perencanaan Konstruksi untuk Konfigurasi Jaringan yang Dipilih

Merancang konstruksi dari konfigurasi jaringan yang meliputi pemilihan tiang yang digunakan, macam tiang yang digunakan, jarak antar tiang, dan panjang konduktor.

3.7 Perhitungan Ekonomi dan Analisis

Menghitung biaya operasional yang dikeluarkan per tahun saat masih menggunakan pompa diesel dan menghitung biaya investasi proyek pergantian ini ditambah dengan perkiraan biaya operasional saat sudah beralih ke pompa listrik, melakukan analisis dari hasil perhitungan yang didapatkan kemudian dibandingkan.

3.8 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Melakukan penarikan kesimpulan berdasarkan perencanaan yang sudah dibuat, Sedangkan saran yang disampaikan dipergunakan untuk memperbaiki atau menyampaikan hal-hal yang berkaitan dengan penelitian.

BAB IV

PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perencanaan jaringan listrik untuk suplai motor penggerak pompa di lahan perkebunan PG Asembagus Situbondo beserta dengan analisis hasil perencanaan. Perencanaan ini merupakan konfigurasi baru untuk membuat lokasi yang awalnya belum teraliri listrik untuk kemudian menjadi terpenuhi kebutuhan listriknya. Pada akhirnya juga akan diberikan mengenai analisis aliran daya dan rugi-rugi beserta perencanaan konstruksi jaringan listrik.

4.1 Gambaran Umum Lokasi Perencanaan Jaringan Listrik

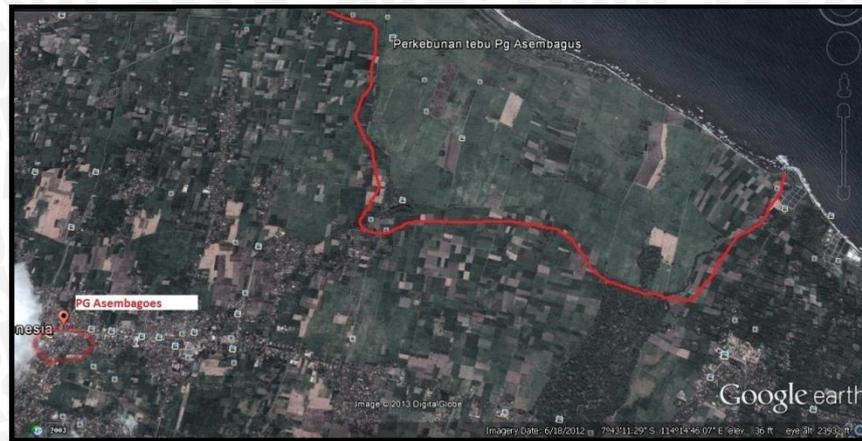
Mengingat lokasi yang akan dibuat perencanaan listrik cukup luas dan kondisinya tersebar, maka pengetahuan kondisi lahan beserta persebaran beban yang ada menjadi faktor penting. Hal tersebut dimaksudkan untuk memberikan perencanaan jaringan listrik yang baik guna tercapainya keandalan dan layak untuk direalisasikan.

4.1.1 Lokasi Perencanaan Jaringan

Perencanaan jaringan listrik ini berlokasi di lahan HGU PG Asembagoes Kecamatan Asembagoes Kabupaten Situbondo Jawa Timur. Lokasi tersebut adalah lahan perkebunan tebu milik PTPN XI yang dikelola untuk memproduksi tebu guna keperluan bahan baku PG Asembagoes yang berlokasi tidak jauh dari lahan.

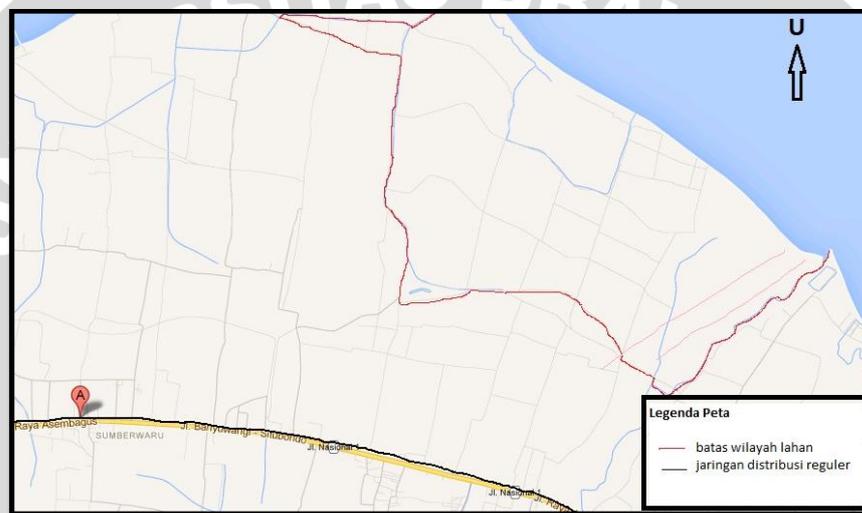
Luas lahan secara keseluruhan ± 500 ha dimana di sebelah utara sampai timur laut berbatasan langsung dengan selat Madura sedangkan lainnya berbatasan dengan lahan masyarakat, hutan dan pemukiman penduduk. Gambar lokasi lahan disajikan dalam citra satelit dan gambar peta. Pada gambar 4.1 lahan HGU disajikan dengan area yang diberi batas merah, dan lokasi PG Asembagoes ditampilkan untuk menggambarkan lokasi lahan dari pabrik. Citra satelit diambil pada tanggal 18 Juli 2012.

Sedangkan untuk gambar peta ditunjukkan pada Gambar 4.2, dimana batas lahan ditunjukkan dengan garis warna merah dan jalur jaringan distribusi yang sudah ada ditunjukkan dengan warna hitam. Jalur jaringan distribusi yang sudah ada berada pada sepanjang jalan penghubung utama antara Situbundo – Banyuwangi.



Gambar 4.1 Foto satelit lokasi lahan HGU PG Asembagoes Situbondo

Sumber: Google Earth

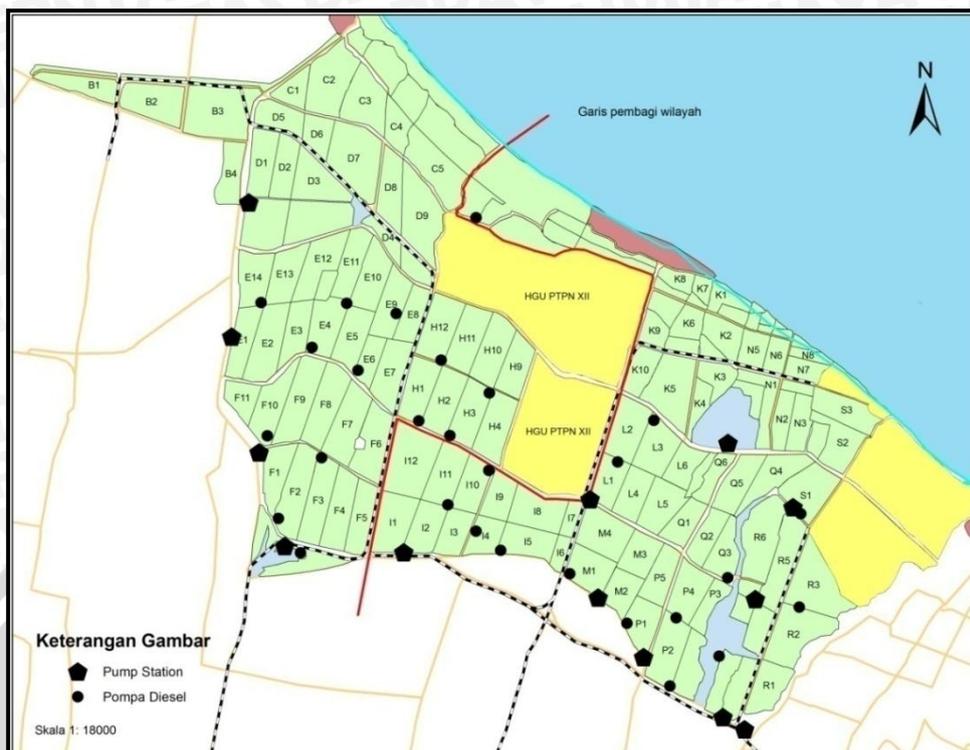


Gambar 4.2 Peta Lahan HGU PG Asembagoes Situbondo

Sumber : Google Map dan survey

4.1.2 Analisis Kondisi Lahan

Secara topologi, ketinggian lahan di bagian selatan lebih tinggi daripada di utara yang berdekatan dengan lautan. Ini membuat aliran air yang ada seharusnya mengalir ke utara, sehingga sistem pengairan yang dibuat harus dirancang sedemikian hingga agar mampu mencakup semua lahan dari sumber yang letaknya terpencar. Lahan tebu terbagi menjadi petak-petak, masing-masing mempunyai luasan yang berbeda. Untuk keperluan transportasi, dilahan disediakan jalan setapak sekitar 3 meter lebarnya untuk lalu lalang kendaraan besar pengangkut tebu dan kendaraan lain. Untuk transportasi lain juga telah disediakan jalur rel untuk kereta mini pengangkut tebu yang disebut lori. Jalur lori yang ada sudah didesain agar mampu menjangkau semua lahan, sehingga jalurnya terkadang juga berdampingan dengan jalan setapak utama.



Gambar 4.3 Peta Lahan dan Persebaran Pompa diesel HGU PG Asembagoes Situbondo

Sumber : PG Asembagus Situbondo

Untuk mencukupi kebutuhan air, PG membuat saluran irigasi berupa parit-parit yang mengalirkan air tawar agar bisa menjangkau semua lahan. Adapun air dari parit didapat dari beberapa sumber yang ada di lahan. Sumber sumber tadi ada yang langsung dibor dan ditanam pipa untuk kemudian dipompakan keluar dari dalam tanah ke permukaan atau ke parit dan ada juga yang dibuat danau sehingga air akan menggenang kemudian baru dipompakan ke parit. Peran pompa disini sangatlah penting baik untuk mengalirkan air dari danau sumber air ke parit maupun sebagai pompa sumur bor yang memompa air dari bawah tanah ke atas permukaan tanah.

Umumnya pompa yang digunakan memiliki kapasitas yang berbeda, karena je las jika ukuran pompa untuk danau buatan lebih besar daripada pompa untuk sumur bor. Pompa untuk danau buatan bertugas memompakan air dari sumber air ke parit-parit, pompa seperti ini diletakkan dekat dengan sumber air. Sedangkan pompa dari sumur bor bertugas mengalirkan air sumur ke parit, ada pula yang diletakkan untuk memompakan air dari parit ke petak-petak tebu.

Untuk faktor keamanan peralatan termasuk pompa dan penggeraknya itu sendiri, maka di setiap pompa diberikan rumah pompa atau disebut *Pump Station*. Ada 3 buah sumber air besar antara lain di sebelah utara dekat *Pump Station I*, di bagian selatan di

waduk selatan dan sebelah timur yaitu sumber air Taman Kembar atau masyarakat lebih mengenal dengan nama waduk Lebung. Berikut penjelasan mengenai masing masing sumber air mengenai arah aliran parit:

1. Sumber air sebelah utara di daerah *Pump Station I*

Air dari danau buatan dipompakan/ didorong ke parit menuju selatan melewati *Pump Station II* dan *Pump Station III*. Dari masing masing rumah pompa air dipompakan dari parit ke petak petak lahan. *Pump Station I* juga mengalirkan air ke utara petak D1, D2 sampai D3. *Pump Station II* ke utara petak E1, E2, E3 dan E5. *Pump Station III* ke parit di sebelah utara petak F1, F2, F3, F4 dan F5.

2. Sumber air waduk selatan

Dari danau buatan, air didistribusikan ke selatan petak F1, F2, F3, F4 dan F5.

3. Sumber air Taman Kembar / Lebung

Merupakan sumber air yang terbesar, bertugas mengisi waduk buatan yang ada. Dari waduk air dipompakan ke parit guna untuk pengairan di petak K9, K5, K3, K4, N1, N2, N3, N4, L6, O6, O5, O4 dan petak petak sekitarnya.

Untuk petak petak yang tidak terjangkau parit, untuk lebih efisien dalam penyaluran air maka di tempatkan titik titik sumur bor yang bersifat mandiri. Sumur bor dipompakan oleh pompa yang digerakkan oleh mesin diesel. Di bagian tengah lahan HGU terdapat lahan perkebunan yang bukan milik dari PTPN XI yaitu lahan HGU Kapas dari PTPN XII. Lahan ini cukup luas, akan tetapi dalam pengoperasiannya terpisah dan tidak ada campur tangan dari PTPN XI.

Dari kondisi lahan yang sudah digambarkan selanjutnya dapat ditarik beberapa analisis. Untuk memudahkan dalam memahami kondisi lahan mengingat luasnya daerah yang akan dirancang, maka penulis menganalisis kondisi lahan berdasarkan wilayahnya. Pembagian wilayah dibagi menjadi dua, yaitu HGU Barat dan HGU Timur. Pembagian wilayah seperti yang sudah ditampilkan dalam Gambar 4.3.

Berikut adalah analisis di setiap bagian wilayah:

A. HGU Wilayah Barat

1. Terdapat 4 buah *Pump Station* yang terletak cukup berdekatan, semuanya terletak di pinggir jalan utama yaitu motor listrik nomor 10, 11, 12, 13.
2. Di sumber waduk selatan terletak *Pump Station* dengan motor listrik nomor 1, dimana titik ini adalah yang terdekat dari akses jaringan listrik terdekat yang berada di jalan raya Situbondo-Banyuwangi.

3. Kondisi wilayah masih didominasi lahan tebu, semak belukar dan tidak ada pemukiman penduduk.
4. Di bagian tengah terdapat lahan tebu milik PTPN XII seluas kurang lebih 20 ha, daerah ini bukan merupakan tanggungan dari PTPN XI sehingga pengelolannya pun terpisah.

B. HGU Wilayah Timur

1. Terdapat 9 titik *Pump Station* yang semuanya tersebar, motor listrik dengan nomor motor 1, 2, 3, 4, 6, 8 dan 9 terletak di pinggir rel kereta lori dan jalan utama. Sedangkan motor listrik nomor 5 dan 7 terletak hanya di pinggir jalan utama.
2. Di ujung wilayah dan dekat dengan pantai terdapat sebuah pemukiman bernama desa Banongan yang dihuni sekitar 80 kepala keluarga. Selama ini penduduk memenuhi kebutuhan listrik dengan generator diesel dan beberapa rumah menggunakan panel surya mandiri.
3. Motor listrik nomor 1, 2, 3 dan 4 terletak di pinggir sungai besar yang sudah mati, sehingga jalan utama dan rel kereta lori untuk menjangkau motor listrik nomor 1 dan 2 harus dilewatkan sebuah jembatan.
4. Kondisi lahan masih didominasi lahan tebu dan semak semak.

4.1.3 Data Beban

Pada Gambar 4.3 sudah dijelaskan mengenai kondisi lahan dengan persebaran pompa dieselnnya, ini merupakan kondisi saat belum dilaksanakannya proyek PLN-isasi dimana semua penggerak pompa menggunakan penggerak mesin bakar diesel. Pada proyek yang direncanakan, nantinya mesin bakar diesel akan diganti dengan motor listrik sehingga diperlukan perencanaan jaringan listrik. Untuk proyek tahap pertama ini, mesin diesel yang akan diganti hanya terbatas mesin diesel yang berkapasitas besar yaitu yang ada di *Pump Station* sejumlah 13 titik. Dalam kasus ini, penulis hanya membatasi perencanaan jaringan untuk tahap pertama saja, akan tetapi juga memperhatikan hal hal lain yang bisa berkontribusi untuk tahap selanjutnya.

Adapun beban yang akan disalurkan tenaga listrik adalah beban motor listrik dengan kapasitas yang berbeda tergantung dari besarnya kapasitas pompa yang digerakkan. Berikut adalah data beban yang diambil.

Tabel 4.1 Tabel data beban motor listrik 1

No	Nama	Lokasi	Beban (kW)	Cos Θ
1	Motor Listrik 1	HGU bagian barat	37	0.85
2	Motor Listrik 2	HGU bagian timur	37	0.85
3	Motor Listrik 3	HGU bagian timur	37	0.85
4	Motor Listrik 4	HGU bagian timur	37	0.85
5	Motor Listrik 5	HGU bagian timur	75	0.89
6	Motor Listrik 6	HGU bagian timur	37	0.85
7	Motor Listrik 7	HGU bagian timur	75	0.89
8	Motor Listrik 8	HGU bagian timur	37	0.85
9	Motor Listrik 9	HGU bagian timur	37	0.85
10	Motor Listrik 10	HGU bagian timur	75	0.89
11	Motor Listrik 11	HGU bagian barat	37	0.85
12	Motor Listrik 12	HGU bagian barat	75	0.89
13	Motor Listrik 13	HGU bagian barat	75	0.89
Total			671	

Sumber: PG Asembagoes

Secara garis besar beban motor listrik yang akan tersambung ada dua macam yaitu:

1. Motor listrik besar

Daya nyata (P): 75 kW; kutub: 4; frekuensi: 50 Hz; cos Θ : 0.89; tegangan kerja: 380-415 V; arus nominal: 129 A; Motor induksi 3 fasa; Merk: Teco; Produksi *Teco Elec. & Mach. Pte Ltd.*

2. Motor listrik kecil

Daya nyata (P): 37 kW; kutub: 4; frekuensi: 50 Hz; cos Θ : 0.85; tegangan kerja: 380-415 V; arus nominal: 114 A; Motor induksi 3 fasa; Merk: Teco; Produksi *Teco Elec. & Mach. Pte Ltd.*

4.2 Pemilihan Sistem Distribusi

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perencanaan saluran listrik untuk suplai motor penggerak pompa di lahan HGU PG Asembagoes Situbondo beserta dengan analisis hasil perencanaan. Melihat total keseluruhan beban yang cukup besar dan kondisinya semuanya tersebar, maka akan diberikan pertimbangan untuk memilih

sistem jaringan yang digunakan apakah menggunakan sistem distribusi primer (20 kV) atau keseluruhan menggunakan distribusi sekunder (380/220 V):

a. Menggunakan distribusi sekunder (380/220) keseluruhan

- Motor 75 kW memiliki $\cos \Theta = 0,89$ sehingga untuk $\sin \Theta = 0,46$
- Motor 37 kW memiliki $\cos \Theta = 0,85$ sehingga untuk $\sin \Theta = 0,53$
- Untuk efisiensi motor dapat diperoleh dari literatur yaitu motor 75 kW kutub 4 efisiensinya adalah 0,91 dan motor 37 kW 4 kutub efisiensinya adalah 0,90 (Shawney, 1990: 602)
- Sehingga daya masukan yang diperlukan untuk masing-masing motor adalah:

$$\begin{aligned} P_{\text{input motor 75 kW}} &= 75 \text{ kW}/0,91 \\ &= 82,416 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{input motor 37 kW}} &= 37 \text{ kW}/0,90 \\ &= 41,111 \text{ kW} \end{aligned}$$

- Daya semu (S) beban motor seperti pada persamaan (2-43):

$$\begin{aligned} S_{\text{motor listrik 75 kW}} &= 82,416 \text{ kW}/0,89 \\ &= 92,602 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{motor listrik 37 kW}} &= 41,111 \text{ kW}/0,85 \\ &= 48,366 \text{ kVA} \end{aligned}$$

- Daya reaktif seperti persamaan (2-44)

$$\begin{aligned} Q_{\text{motor listrik 75 kW}} &= 92,602 \text{ kVA} \times 0,46 \\ &= 42,597 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{motor listrik 37 kW}} &= 48,366 \text{ kVA} \times 0,53 \\ &= 25,634 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

- Total kebutuhan daya semu atau daya kompleks (S) dengan melibatkan daya reaktif (Q) dan daya nyata(P) adalah:

$$\begin{aligned} \text{Total daya motor} &= (5 \text{ unit} \times (82,416 + j42,597 \text{ kVA})) + (8 \text{ unit} \times \\ &\quad (41,111 + j25,634 \text{ kVA})) \\ &= 740,97 + j418,06 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Kebutuhan akan datang (penduduk calon pengguna listrik di desa Banongan), 30 kepala keluarga, @ 450 VA

$$\begin{aligned} &= 30 \times 0,450 \\ &= 13,5 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Total kebutuhan daya} &= 740,97 + j418,06 + 13,5 \\
 &= 754,47 + j418,06 \text{ kVA} \\
 &= 864,5538 \angle 28,99^\circ
 \end{aligned}$$

Berdasarkan total daya beban yang dihubungkan, maka untuk penentuan ukuran kabel adalah harus diketahui terlebih dahulu arus maksimal yang mengalir. Dimana untuk nilai $\cos\phi = 0,87$ yang diperoleh dari totalkebutuhan daya, sehingga arus maksimal yang mengalir berdasarkan persamaan (2-10):

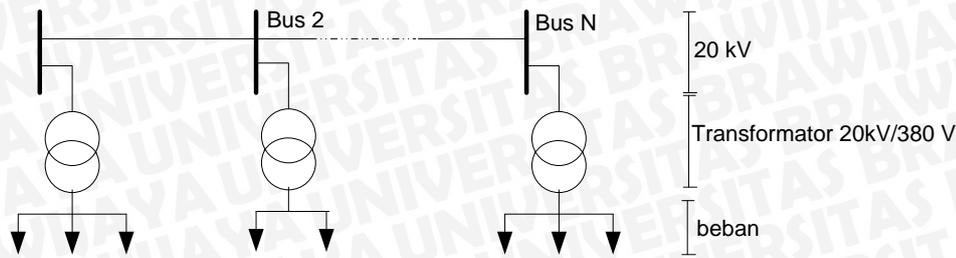
$$\begin{aligned}
 I &= \frac{P}{V_L \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3}} \\
 &= \frac{754,47 \text{ kW}}{220 \cdot 0,857 \cdot \sqrt{3}} \\
 &= 2278,52 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Menurut tabel karakteristik penghantar kabel pilin tegangan rendah berinti alumunium untuk kabel dengan penampang nominal terbesar yaitu $3 \times 95 + 70 \text{ mm}^2$ (lampiran 3), KHA yang disebutkan hanya sebesar 242 pada suhu lingkungan 30° C . Sedangkan kebutuhan bisa mencapai 6 kali lipat dari KHA kabel yang ada di pasaran.

Salah satu pertimbangan solusi dari persoalan ini adalah dengan memparalelkan kabel untuk memenuhi arus maksimal yang diperkirakan. Akan tetapi dalam segi ekonomis hal ini tidak layak (*feasible*) karena secara kasat mata pengeluaran untuk pembelian konduktor kabel akan berlipat. Belum lagi dari segi teknis bahwa kemungkinan jatuh tegangan dan rugi rugi yang dihasilkan akan besar.

b. Menggunakan distribusi primer (20 kV) dengan pengelompokan beban

Melihat dari persoalan yang muncul dari jika menggunakan distribusi tegangan rendah keseluruhan maka alternatif lain yang bisa digunakan adalah dengan menggunakan distribusi primer tegangan menengah (20 kV) sebagai penyalur tenaga listrik untuk menjangkau beban tersebar. Akan tetapi karena beban motor listrik bekerja menggunakan tegangan kerja rendah (380 V) maka dari jaringan distribusi primer tegangan menengah nanti perlu diturunkan menjadi tegangan rendah baru disambungkan dan disebarkan ke beban-beban. Ilustrasinya lewat diagram satu garis adalah seperti di bawah ini:



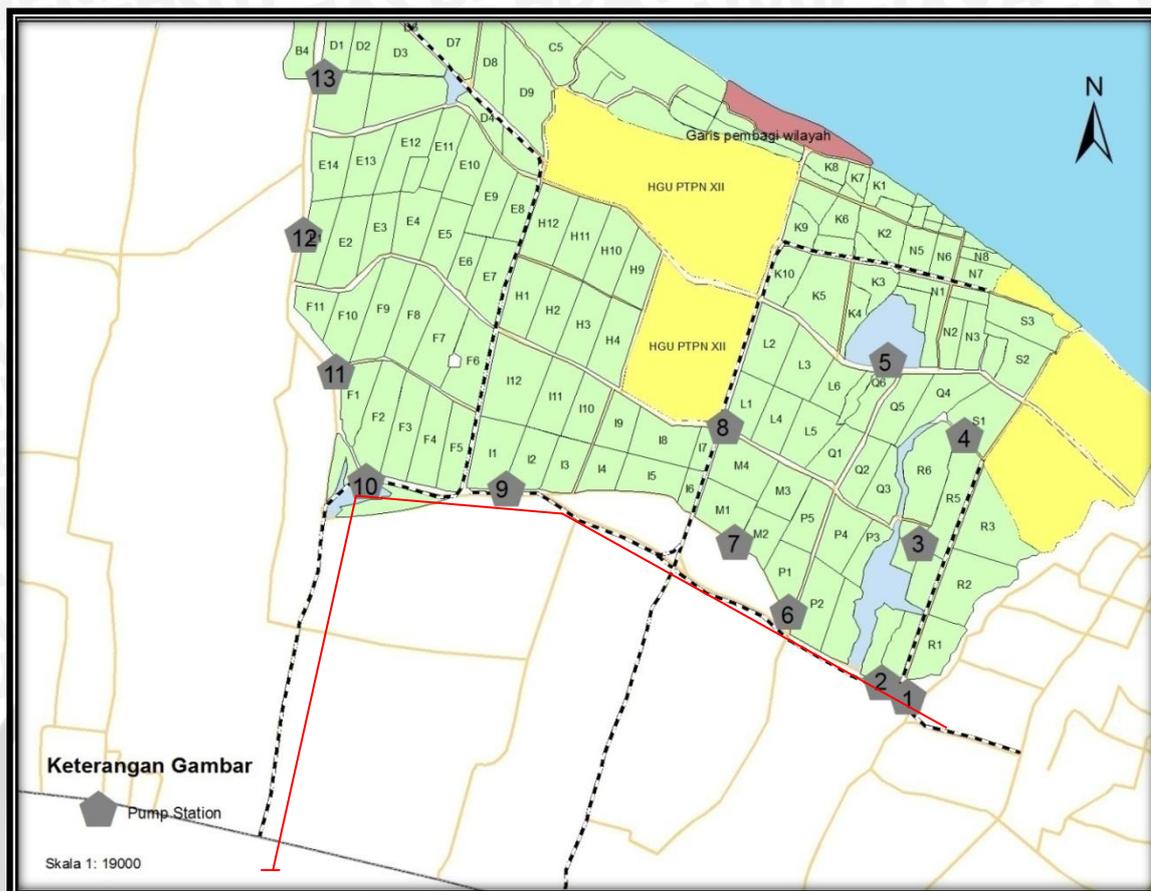
Gambar 4.4 Rencana jaringan distribusi

Mula-mula dibuat suatu pengelompokan beban ke dalam beberapa titik, kemudian dilakukan penempatan titik berdasarkan persebaran beban di kondisi sebenarnya nanti. Selanjutnya dari titik yang sudah ditempatkan akan dibuat suatu perencanaan jalur untuk jaringan distribusi sekunder 20 kV. Perencanaan jalur menggunakan metode *Successive Backward* untuk mendapatkan jalur yang paling baik. Setelah diperoleh jalur jaringan distribusi primer, langkah selanjutnya adalah meletakkan transformator menurut titik beban tadi. Kemudian untuk menjangkau beban-beban motor akan ditarik kabel distribusi tegangan rendah berdasarkan pengelompokan beban di awal tadi.

Untuk memperkuat pertimbangan alternatif ini, maka digunakan perhitungan secara matematis untuk mengetahui perkiraan tegangan yang bisa dipergunakan berdasarkan kondisi beban yang akan terpasang. Rumus yang digunakan adalah persamaan (2-1), dimana data yang diperlukan adalah panjang saluran (L) dalam km dan total beban terpasang (P) dalam kW. Panjang saluran disini diasumsikan sebagai jarak dari jalan raya ke beban pompa terjauh. Diambil jalan raya karena nantinya titik awal masuknya penyambungan jaringan distribusi ada di sini. Sedangkan titik pompa terjauh dipilih pompa 1, gambaran lebih lengkap dapat dilihat pada gambar 4.5. Dengan menggunakan software Argis maka panjang dari jalan raya ke pompa 1 (ditunjukkan dengan garis warna merah) adalah sejauh 5,5 km, dan jumlah total beban tersambung menurut tabel 4.1 adalah 754,47 kW.

Sehingga menurut persamaan (2-8) didapatkan:

$$\begin{aligned}
 V &= 5,5 \times \sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{P}{100}} \\
 &= 5,5 \times \sqrt{\frac{5.5}{1.6} + \frac{754,47}{100}} \\
 &= 18,23 \text{ kV}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.5 Persebaran pompa listrik

Sumber: PG Asembagus

Menurut standar level tegangan yang ada dipergunakan di Indonesia, dari hasil perhitungan 17,52 kV maka yang paling mendekati untuk dipergunakan adalah level tegangan 20 kV. Hasil ini memperkuat opsi bahwa tegangan 20 kV bisa diterapkan dalam sistem ini.

Dari penjelasan kedua sistem di atas maka ditentukan sistem distribusi yang digunakan adalah dengan sistem distribusi primer (20 kV) dan pengelompokan beban.

4.3 Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Distribusi Primer (20 kV) Menggunakan Metode Successive Backward

Sebelum masuk ke perencanaan jalur, terlebih dahulu harus ditentukan pengelompokan beban dengan kondisi yang ada ke dalam beberapa titik sesuai persebaran. Dalam penulisan ini pengelompokan beban didasarkan pada lokasi beban yang terdekat dengan mempertimbangkan total kebutuhan daya. Diharapkan dari pengelompokan beban yang dibuat akan didapatkan pengelompokan yang hamper

setimbangan antara satu titik dengan titik yang lain. Setelah titik didapat, selanjutnya adalah meletakkannya di lokasi yang tidak jauh dari persebaran beban.

Selanjutnya adalah menambahkan cabang yang mungkin untuk menghubungkan titik-titik tadi, penambahan cabang ini disebut penambahan cabang semu. Kemudian dengan metode *Successive Backward*, jumlah cabang tadi dikecilkan dengan mengeliminasi cabang-cabang menurut indeks keefektifannya, indeks keefektifan cabang yang paling kecil dihapus. Indeks keefektifan didapat dari pembagian antara harga mutlak aliran daya di cabang (*Branch Flow*) dengan kuadrat investasi konstruksi dari cabang. Investasi konstruksi sebanding dengan panjang cabang, maka yang digunakan dalam perhitungan adalah panjang cabang. (Wang, 1994: 388)

Penghapusan mempertimbangkan tes diskoneksi dan pembebanan berlebih (*overload*). Jika lolos kedua pengecekan tadi maka cabang bisa dihapus. Perhitungan berulang sampai tidak ada lagi cabang yang bisa dihapus dan semua cabang sudah dianalisis. Sampai nantinya terbentuk jaringan hasil akhir dari eliminasi cabang yang menghubungkan semua beban. Perhitungan dilakukan secara manual dan dibantu komputer menggunakan *software Matlab 7.5.0*.

4.3.1 Penentuan Konduktor

Sebelum masuk ke perhitungan terlebih dahulu harus ditentukan jenis kabel karena hal ini akan menentukan nilai impedansi yang akan digunakan dalam perhitungan.

- Tegangan kerja (V_{L-L}) yang dipakai adalah 20 kV
- Daya yang disalurkan adalah 3 fasa dengan asumsi kondisi tiap fasa setimbang
- Daya beban total didapatkan dari total penggunaan beban tersambung, dalam hal ini adalah daya total dari beban 13 buah motor listrik yaitu sebesar 754,47 kW
- $\cos\phi$ diberikan 0,87 yang didapat dari perhitungan sebelumnya
- Perkiraan arus maksimal yang mengalir dengan asumsi semua beban sedang dalam kondisi beroperasi menggunakan persamaan (2-10):

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{V_L \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3}} \\ &= \frac{754,47 \text{ kW}}{20 \text{ kV} \cdot 0,87 \cdot \sqrt{3}} \\ &= 25,0638 \text{ A} \end{aligned}$$

- Perkiraan jatuh tegangan ditetapkan 1 % dari tegangan kerja atau sebesar 200 V

- g. Bahan konduktor ditentukan aluminium, daya hantar jenis sebesar 33.10^6 S/m
- h. Panjang saluran dari titik penyulang ke titik beban terjauh sebesar 5500 m
- i. Luas penampang konduktor (A) menurut persamaan (2-9) adalah:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1,73 \ l I \cos \varphi}{\gamma \ v} \\
 &= \frac{1,73 \cdot 5500 \cdot 25.0638 \cdot 0,87}{33.10^6 \cdot 200} \\
 &= 31,436 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Menurut Tabel 4.2 maka luas penampang yang digunakan dipilih yang berada di atas nilai $31,436 \text{ mm}^2$ yaitu 35 mm^2 , dengan nilai $z = 0,9217 + j0,3790 \ \Omega/\text{km}$. Dari nilai impedansi ini nantinya dapat digunakan untuk mencari nilai impedansi cabang dengan mengalikannya dengan panjang cabang (l).

Kapasitas maksimal daya hantar saluran (\bar{S}_L) berdasarkan kHA kabel yang dipilih menurut persamaan (2-45) adalah sebesar:

$$\bar{S}_L = 20.000 \times 170 = 3400 \text{ kVA}$$

Tabel 4.2 Spesifikasi penghantar konduktor AAAC

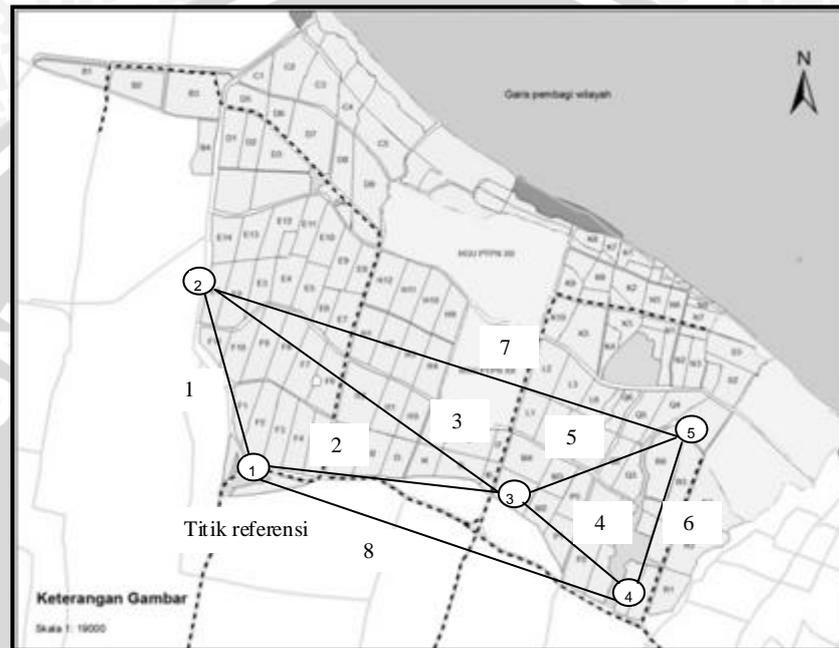
Luas Penampang (mm ²)	Impedansi (Ω/km)		KHA AAAC (A)
16	2,0161	j 0,4036	105
25	1,2903	j 0,3895	135
35	0,9217	j 0,3790	170
50	0,6452	j 0,3678	210
70	0,4608	j 0,3572	255
95	0,3096	j 0,3449	320
120	0,2688	j 0,3376	365
150	0,2162	j 0,3305	425
185	0,1744	j 0,3239	490
240	0,1344	j 0,3158	585

Sumber: SPLN 64, 1985: 64

4.3.2 Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-1

Dasar pemikiran dari perencanaan ini adalah menggunakan node 1 sebagai titik mula masuknya penyulang, sehingga dalam perhitungan nantinya titik ini akan dijadikan titik referensi. Semua cabang yang mungkin ditambahkan di jaringan ini, guna mengetahui jalur mana yang lebih baik. Maksudnya adalah dari tiap node yang berdekatan ditarik suatu jalur, kemudian menggunakan node 3 sebagai pusat penarikan jalur karena di node ini terhubung dengan 4 jalur yaitu dengan node 1, 2, 4 dan 5. Perancangan jalur yang dibuat dapat ditunjukkan pada gambar 4.6. Adapun 5 node dalam perencanaan ini mempunyai pengelompokan beban sebagai berikut:

- Node 1: motor listrik 9, 10 dengan total daya $123,527 + j68,231$ kVA
- Node 2: motor listrik 11, 12, 13 dengan daya total $205,943 + j110,828$ kVA
- Node 3: motor listrik 7, 8 dengan total daya $123,527 + j68,231$ kVA
- Node 4: motor listrik 1, 2, 6, dengan total daya $123,333 + j76,902$ kVA
- Node 5: motor listrik 3, 4, 5 dan perkiraan kebutuhan daya mendatang dari penduduk desa Banongan sehingga total daya $178,138 + j93,864$ kVA



Gambar 4.6 Peta jalur perencanaan jaringan listrik alternatif ke-1 di lahan HGU PG Asembagus Situbondo

Sumber: Arcgis

Sisi wilayah HGU bagian barat ditempati 2 node dimana node 1 sebagai referensi dan node 2 sebagai ujung percabangan dari wilayah bagian barat. Di HGU wilayah timur terdapat 3 node yaitu node 3, 4 dan 5 dimana node 4 dan 5 terletak di seberang sungai mati sehingga nantinya harus melintasi sungai. Node 5 diharapkan mampu memenuhi permintaan kebutuhan listrik penduduk di pesisir pantai nantinya karena lokasinya yang paling berdekatan dengan desa Banongan.

Adapun langkah-langkah dalam menentukan jalur jaringan listrik menggunakan metode *Successive Backward* adalah dijelaskan di bawah ini:

1. Data perencanaan

Dengan menggunakan *software Arcgis* dapat diketahui jarak antar node yang dihubungkan. Data ini dapat dijadikan dasar untuk memilih jalur jaringan listrik yang

tepat berdasarkan perhitungan dan analisis. Data perencanaan yang didapatkan dari observasi ditampilkan pada tabel 4.3. Dari tabel yang didapat diketahui bahwa panjang total jalur jaringan untuk perencanaan alternatif ke-1 ini adalah sebesar 13,355 km.

Tabel 4.3 Data perencanaan jalur jaringan listrik alternatif ke-1

Cabang	Node-node	Panjang (km)	Impedansi data
1	1 – 2	3.0770	2.8361 + 1.1662i
2	1 – 3	3.6200	3.3366 + 1.3720i
3	2 – 3	2.6100	2.4056 + 0.9892i
4	3 – 4	1.0080	0.9291 + 0.3820i
5	3 – 5	1.6500	1.5208 + 0.6253i
6	4 – 5	1.3700	1.2627 + 0.5192i
7	2 – 5	4.5000	4.1476 + 1.7055i
8	1 – 4	4.1000	3.7790 + 1.5539i
Total		21.9350	

2. Menyusun matrik insidensi (A)

Matrik insidensi A disini menjelaskan bagaimana node-node terhubung oleh cabang L. Apabila matrik insidensi dideklarasikan $A_{L \times N}$ dimana L adalah menyatakan cabang dan N adalah node, maka komponen baris pada matrik insidensi A menjelaskan cabang dan kolom pada matrik menjelaskan node dari jaringan. Suatu cabang L menghubungkan persambungan dari node N menuju node M maka komponen tersebut bernilai 1 jika di komponen LN (awal sambungan), dan -1 untuk komponen LM (akhir sambungan), untuk komponen yang lain bernilai 0. Berikut adalah pembentukan matrik insidensi:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Menyusun matrik impedansi (Zbus)

Matrik impedansi didapat dari menyusun matrik admitansi terlebih dahulu sesuai dengan cabang yang direncanakan. Komponen matrik admitansi Y_{nm} didapat dengan menjumlahkan semua admitansi yang terhubung, sedang komponen matrik yang lain Y_{nm} didapat dari nilai negatif komponen admitansi. Setelah tersusun matrik admitansi selanjutnya adalah menginverskan matrik admitansi tadi untuk mendapatkan matrik impedansi. Sebelumnya data admitansi dibuat dalam bentuk matrik diagonal, kemudian

matrik admitansi Ybus dibentuk dengan mengkalikannya dengan matrik insidensi dan transpose matrik insidensi yaitu persamaan (2-57) dimana:

$$Y=[A]^T [\text{diagonal}(Y)] [A]$$

Matrik admitansi (Y) yang disusun:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.8634 - 0.3550i & -0.3556 + 0.1462i & 0 & -0.2062 + 0.0848i \\ -0.3556 + 0.1462i & 2.0951 - 0.8615i & -0.9207 + 0.3786i & -0.5624 + 0.2313i \\ 0 & -0.9207 + 0.3786i & 1.8244 - 0.7502i & -0.6774 + 0.2785i \\ -0.2062 + 0.0848i & -0.5624 + 0.2313i & -0.6774 + 0.2785i & 1.4461 - 0.5946i \end{bmatrix}$$

Kemudian menginverskan matrik admitansi untuk mendapatkan matrik impedansi, dimana $[Z]=[Y]^{-1}$. Sehingga didapatkan:

$$Z = \begin{bmatrix} 1.5524 + 0.6383i & 0.8398 + 0.3453i & 0.7593 + 0.3122i & 0.9037 + 0.3716i \\ 0.8398 + 0.3453i & 1.3586 + 0.5586i & 1.1213 + 0.4611i & 1.1734 + 0.4825i \\ 0.7593 + 0.3122i & 1.1213 + 0.4611i & 1.4972 + 0.6157i & 1.2458 + 0.5123i \\ 0.9037 + 0.3716i & 1.1734 + 0.4825i & 1.2458 + 0.5123i & 1.7604 + 0.7239i \end{bmatrix}$$

4. Mencari vektor sudut fasa setiap node (θ)

Daya injeksi node yaitu $S = [-(123,527 + j61,834), -(205,943 + j110,828);$
 $-(123,527 + j61,834); -(123,333 + j76,902); -(178,138 + j93,864)]$

Dari persamaan (3-20) dimana $\theta = Z.S$, maka diberikan:

$$\theta = (7,0542; 70,1593; 7,12,52; 7,9082)^T$$

Karena node 1 dijadikan sebagai node acuan atau node referensi maka besarnya sudut vektor node 1 adalah sama dengan 0.

5. Menghitung aliran daya (*Branch Flow*) setiap cabang

Menurut persamaan (2-30) yaitu $S_L = B_L \phi$, maka sebelumnya harus diketahui terlebih dahulu nilai dari B_L dan ϕ yang masing masing dalam bentuk matrik. Matrik B_L adalah matrik diagonal $L \times L$ yang elemennya diagonalnya adalah nilai admitansi dari cabang. Sedangkan untuk matrik ϕ adalah perkalian dari matrik insidensi A (*incidence matrik*) dengan matrik vektor sudut fasa $\theta_{N \times 1}$, sehingga nantinya akan didapatkan nilai matrik $\phi_{L \times 1}$ yang telah dirumuskan dengan $\phi = A \theta$.

$$\phi = \begin{bmatrix} -778.3641 \\ -774.9136 \\ 3.4505 \\ -12.1757 \\ -99.0722 \\ -86.8964 \\ -95.6216 \\ -787.0893 \end{bmatrix}$$

Matrik diagonal admitansi (B_L)

$$B_L = \begin{bmatrix} 0.30 - 0.12i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 - 0.10i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 - 0.14i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.92 - 0.37i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.56 - 0.23i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 - 0.27i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.21 - 0.08i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.23 - 0.09i & 0 \end{bmatrix}$$

Aliran daya (*Branch Flow*)

$$S_L = B_L \phi$$

$$S_L = \begin{bmatrix} -234.76 + 96.53i \\ -198.66 + 81.69i \\ 1.23 - 0.5i \\ -11.21 + 4.61i \\ -55.72 + 22.9i \\ -58.86 + 24.20i \\ -19.72 + 8.11i \\ -178.16 + 73.26i \end{bmatrix}$$

6. Menghitung indeks keefektifan (E_L)

Sebagai contoh diambil salah satu cabang, yaitu cabang 1 (node 1 – 2), dengan panjang cabang adalah 3,077 km. Nilai C adalah banyaknya investasi di jaringan, pada persoalan ini diasumsikan sebagai panjangnya jaringan karena dirasakan investasi sebanding dengan panjang jaringan, sehingga menurut persamaan (2-41):

$$\begin{aligned} E_{1-2} &= \frac{|S_{1-2}|}{C_{1-2}^2} \\ &= \frac{|-234.76 + 96.53i|}{3.077^2} \\ &= 26.8095 \end{aligned}$$

Untuk data cabang yang lain setelah dihitung menggunakan bantuan Matlab 7.5.0 dan Microsoft Excel 2007 didapatkan hasil yang dimasukkan ke dalam tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan indeks keefektifan perencanaan alternatif ke-1

Cabang	Node-node	Panjang (km)	Branch Flow (kVA)	Indeks keefektifan (E_L)	Rangking
1	1 – 2	3.0770	-234.76 + 96.53i	26.8095	7
2	1 – 3	3.6200	-198.66 + 81.69i	16.3914	5
3	2 – 3	2.6100	1.23 - 0.50i	0.1947	1
4	3 – 4	1.0080	-11.21 + 4.61i	11.9289	4
5	3 – 5	1.6500	-55.72 + 22.91i	22.1303	6
6	4 – 5	1.3700	-58.86 + 24.20i	33.9100	8
7	2 – 5	4.5000	-19.72 + 8.11i	1.0529	2
8	1 – 4	4.1000	-178.16 + 73.26i	11.4594	3

Sumber: Hasil Perhitungan

7. Penghapusan cabang dengan indeks keefektifan terkecil

Setelah tabel hasil perhitungan indeks keefektifan didapat, dapat terlihat bahwa cabang yang memiliki indeks keefektifan terkecil adalah cabang nomor 7 (node 2-5). Sehingga penghapusan pertama dilakukan pada cabang ini, penghapusan bersifat sementara sampai cabang melalui tes diskoneksi dan tes overload.

Tes diskoneksi:

$$\gamma_k = e_k^T Z e_k = z_{ii} + z_{jj} - z_{ij} - z_{ji}; z_k \text{ adalah impedansi cabang ke-k}$$

$$D = -z_k + \gamma_k; \text{ syarat diskoneksi adalah } D \neq 0$$

Tes overload:

$|S_k| \leq \overline{S}_k$; dimana S_k adalah aliran daya (*Branch Flow*) cabang ke-k dan \overline{S}_k adalah kapasitas transmisi dari saluran k.

Dalam perhitungan ini hanya sebatas ditentukan oleh spesifikasi dari kabel yang digunakan dan sudah dihitung sebelumnya yaitu bernilai 3400 kVA.

8. Tes diskoneksi

Dari data impedansi jaringan dan matrik impedansi Z, didapatkan:

$$Z_3 = 2.4056 + 0.9892i$$

$$\begin{aligned} \gamma_k &= (1.5524 + 0.6383i) + (1.3586 + 0.5586i) - 2 \times (0.8398 + 0.3453i) \\ &= 1.2314 + 0.5063i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D &= -(2.4056 + 0.9892i) + (1.2314 + 0.5063i) \\ &= -1.1742 - 0.4829i \end{aligned}$$

Hasil pengurangan tidak sama dengan 0, maka penghapusan cabang tidak menyebabkan diskoneksi.

Tabel 4.5 Hasil tes diskoneksi perencanaan alternatif ke-1

Cabang (k)	Node m-n	γ_k	Zk	D= γ_k -Zk	Keterangan	Hasil
3	2-3	1.2314 + 0.5063i	2.4056 + 0.9892i	-1.1742 - 0.4829i		Hapus
7	2-5	1.2400 + 0.5099i	4.1476 + 1.7055i	-2.9076 - 1.1956i		Hapus
8	1-4	1.4332 + 0.5893i	3.7790 + 1.5539i	-2.3458 - 0.9646i		Hapus
2	1-3	0.9085 + 0.2743i	3.3366 + 1.3720i	-0.3921 - 0.1183i	Node 3,4,5 terputus	Jangan hapus
5	3-5	0.6881 + 0.2829i	1.5208 + 0.6253i	-0.8327 - 0.3424i		Hapus
1	1-2	2.4436 + 0.7376i	2.8361 + 1.1662i	-1.5267 - 0.4609i	Node 2 terputus	Jangan hapus
6	4-5	0.6798 + 0.2052i	1.2627 + 0.5192i	-1.0879 - 0.3284i	Node 5 terputus	Jangan hapus
4	3-4	0.7429 + 0.2243i	0.9291 + 0.3820i	-0.5577 - 0.1683i	Node 4 terputus	Jangan hapus

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari hasil tabel memperlihatkan bahwa cabang nomor 3, 5, 7 dan 8 telah lolos tes diskoneksi karena hasil tes diskoneksi (D) tidak menghasilkan nilai 0.

Untuk cabang yang lain sebenarnya juga mengalami hal yang sama, akan tetapi cabang tidak bisa dihapus. Alasannya adalah karena apabila cabang-cabang tersebut dihapus maka node yang lain bisa terputus dari sistem. Hal ini menunjukkan bahwa tes diskoneksi selain didapat dari perhitungan juga harus dilihat dari sistem keseluruhan.

9. Membentuk vektor sudut fasa baru akibat penghapusan cabang (θ')

Selanjutnya vektor sudut (θ) diupdate menjadi vektor sudut baru akibat penghapusan cabang 7 (θ') berdasarkan persamaan (2-40) $\theta' = \theta + \beta_k Z e_k e_k^T \theta$

$$\beta_7 = \frac{-1}{x_7 + j\gamma_7} = -0.1588 + 0.0653j$$

Dimana:

$$e_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ dan } e_7^T = [1 \ -1 \ 0 \ 0] \text{ sehingga didapatkan vektor sudut baru yaitu:}$$

$$\theta' = (7.0452; 7.0211; 7.1289; 7.9109)^T$$

10. Menghitung aliran daya baru (*Branch Flow*) akibat penghapusan cabang 3

Aliran daya yang baru akibat penghapusan cabang 3 dihitung kembali dengan membuat nilai impedansi cabang 3 (z_3) menjadi nilai negatifnya. Karena jika suatu cabang mulanya mempunyai nilai impedansi z_k , apabila dihapus maka artinya impedansi cabang tersebut menjadi bernilai tidak berhingga (∞) atau hambatannya besar sekali.

Untuk mendekati nilai tak berhingga, maka nilai impedansi dibuat menjadi $-z_k$. Sehingga impedansi cabang 6 (elemen matrik 7x7) menjadi $-(2.4056 + 0.9892j)$ dan admitansinya menjadi $0.2352 - 0.0967j$.

Aliran daya baru (*Branch Flow*) akibat penghapusan cabang 7:

$$S_L = \begin{bmatrix} -237.02 + 97.45j \\ -197.92 + 81.36j \\ -4.95 + 2.04j \\ -7.85 + 3.23j \\ -49.64 + 20.41j \\ -54.01 + 22.20j \\ 15.33 - 6.30j \\ -176.70 + 72.66j \end{bmatrix}$$

11. Tes pembebanan berlebih (*overload*)

Dilakukan dengan cara membandingkan *Branch Flow* (S_L) dengan nilai kapasitas saluran \bar{S}_L dari perhitungan sebelumnya yaitu 3400 kVA. Berdasarkan

persamaan (2-42) maka jika nilai *Branch Flow* melebihi kapasitas saluran maka akan terjadi *overload* dan cabang tidak jadi dihapus.

Tabel 4.6 Hasil tes pembebanan berlebih (*overload*) perencanaan alternatif ke-1

Cabang (k)	Node-node	Kapasitas saluran (kVA)	Aliran daya (S_L) karena hapus cabang ke-k (kVA)			
			k=3	k=7	k=8	k=5
1	1-2	3400	-234.55 + 96.43i	-237.02 + 97.45i	-198.03 + 81.42i	-194.67 + 80.04i
2	1-3	3400	-198.81 + 81.73i	-197.92 + 81.36i	-157.39 + 64.70i	-155.91 + 64.09i
3	2-3	3400	-0.81 + 0.33i	-4.95 + 2.04i	-15.20 + 6.25i	-13.29 + 5.47i
4	3-4	3400	-11.07 + 4.55i	-7.85 + 3.23i	44.19 - 18.17i	29.03 - 11.94i
5	3-5	3400	-55.59 + 22.86i	-49.64 + 20.41i	-40.65 + 16.72i	27.84 - 11.45i
6	4-5	3400	-58.80 + 24.18i	-54.01 + 22.20i	-81.47 + 33.50i	-54.89 + 22.57i
7	2-5	3400	-19.91 + 8.19i	15.33 - 6.30i	6.09 - 2.50i	2.50 - 1.03i
8	1-4	3400	-178.27 + 73.31i	-176.70 + 72.66i	128.11 - 52.68i	130.53 - 53.68i
Tes Overload			Lolos tes	Lolos tes	Lolos tes	Lolos tes

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari hasil perhitungan aliran daya baru akibat penghapusan cabang 3, maka di semua cabang tidak ada yang melebihi nilai kapasitas jaringan 3400 kVA, maka penghapusan cabang tidak menyebabkan jaringan mengalami pembebanan berlebih.

12. Membentuk matrik impedansi baru (Z_{bus})

Penghapusan sementara dari cabang 3 menghasilkan hasil yang lolos tes diskoneksi dan tes overload, maka penghapusan cabang 3 wajib untuk dilakukan. Penghapusan cabang 3 berdampak pada perubahan susunan matrik impedansi (Z), sehingga diperlukan modifikasi matrik impedansi (Z) menurut persamaan (2-39).

Dengan nilai e_3 dan β_3 dari perhitungan sebelumnya, maka diperoleh:

$$Z' = \begin{bmatrix} 1.4128 + 0.5809i & 0.9414 + 0.3871i & 0.8302 + 0.3414i & 0.9566 + 0.3933i \\ 0.9414 + 0.3871i & 1.2846 + 0.5282i & 1.0696 + 0.4398i & 1.1350 + 0.4667i \\ 0.8302 + 0.3414i & 1.0696 + 0.4398i & 1.4612 + 0.6008i & 1.2189 + 0.5012i \\ 0.9566 + 0.3933i & 1.1350 + 0.4667i & 1.2189 + 0.5012i & 1.7404 + 0.7156i \end{bmatrix}$$

Selanjutnya nilai matrik impedansi baru (Z') ini akan dipergunakan untuk perhitungan selanjutnya, langkah langkah dimulai kembali dari menentukan indeks keefektifan setelah penghapusan cabang 3. Cabang dengan indeks keefektifan terkecil dihapus sementara dan dilakukan pengecekan dan perhitungan apakah cabang memungkinkan untuk dihapus. Selama perhitungan jika terjadi diskoneksi, pembebanan lebih (*overload*), dan penghapusan cabang menyebabkan node lain menjadi terputus dari sistem maka penghapusan saluran dibatalkan dengan konsekuensi mempertahankan penggunaan vektor sudut fasa (θ) dan matrik impedansi (Z) saat sebelum dimodifikasi.

Kemudian kembali ke pengecekan di indeks keefektifan untuk cabang dengan rangking di bawahnya dan berlangsung proses yang sama kembali.

Apabila penghapusan cabang memenuhi syarat penghapusan maka cabang dihapus dan matrik impedansi (Z) dimodifikasi. Begitu seterusnya sampai tidak ada lagi cabang yang bisa dihapus dan semua cabang sudah dilakukan pengecekan. Sebagai hasil dari perhitungan di atas, dari 6 cabang yang direncanakan didapatkan 4 cabang yang berhasil dihapus yaitu cabang 3, 5, 7 dan 8. Cabang yang bertahan adalah cabang 1, 2, 4 dan 6 dengan panjang total 7,403 km.

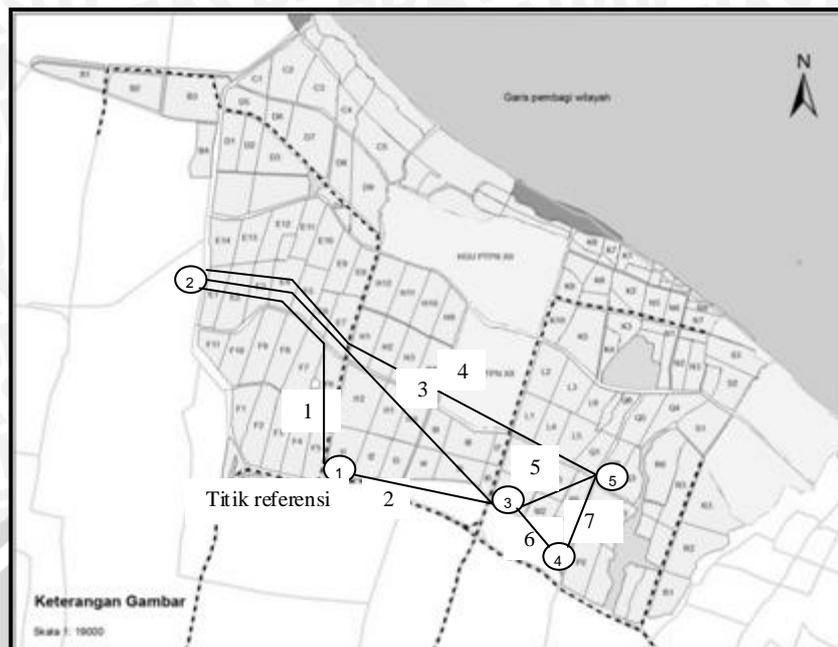
4.3.3 Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-2

Dasar pemikiran dari perencanaan ini adalah memindahkan node 1 sebagai referensi lebih ke timur, sehingga jalur penarikan kabel juga berbeda daripada perencanaan alternatif ke-1 yaitu lewat utara mengikuti jalur rel kereta lori. Di HGU wilayah timur node 4 dan 5 dipindahkan ke barat sungai, sehingga penarikan kabel lebih pendek. Semua jalur yang mungkin disambungkan untuk mencari jalur mana yang lebih efektif. Pengelompokan beban masih sama dengan perencanaan alternatif ke-1, hanya saja perbedaan ada pada jalur penarikan kabel dan panjang kabel.

Ada 5 node dalam perencanaan ini, adapun pengelompokan bebannya adalah:

- Node 1: motor listrik 9, 10 dengan total daya $123,527 + j68,231$ kVA
- Node 2: motor listrik 11, 12, 13 dengan daya total $205,943 + j110,828$ kVA
- Node 3: motor listrik 7, 8 dengan total daya $123,527 + j68,231$ kVA
- Node 4: motor listrik 1, 2, 6, dengan total daya $123,333 + j76,902$ kVA
- Node 5: motor listrik 3, 4, 5 dan perkiraan kebutuhan daya mendatang dari penduduk desa Banongan sehingga total daya $178,138 + j93,864$ kVA

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa penarikan kabel berbeda dengan perencanaan 1, disini kabel dari node 1 ditarik ke arah utara mengikuti jalan setapak dan jalan kereta lori. Node 2 terhubung dengan 3 node yaitu node 1, 3 dan node 5. Dari sini nantinya akan dicari jalur mana yang lebih efektif menurut perhitungan metode *Successive Backward*.



Gambar 4.7 Peta jalur perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2 di lahan HGU PG Asembagus Situbondo

Sumber: Arcgis

Proses penentuan jalur yang efektif menggunakan metode *Successive Backward* adalah sebagai berikut:

1. Data perencanaan

Data perencanaan yang didapatkan dari observasi ditampilkan pada tabel 4.6. Dari tabel yang didapat diketahui bahwa panjang total jalur jaringan untuk perencanaan alternatif ke-2 ini adalah sebesar 19,584 km.

Tabel 4.7 Data perencanaan jalur jaringan listrik alternatif ke-2 1

Cabang	Node-node	Panjang (k m)	Impedansi Data
1	1 – 2	1.975	$1.8204 + 0.7485i$
2	1 – 3	3.320	$3.0600 + 1.2583i$
3	2 – 3	5.295	$4.8804 + 2.0068i$
4	2 – 5	2.750	$2.5347 + 1.0423i$
5	3 – 5	2.944	$2.7135 + 1.1158i$
6	3 – 4	2.656	$2.4480 + 1.0066i$
7	4 – 5	0.644	$0.5936 + 0.2441i$
Total		19.584	

2. Menyusun matrik insidensi (A)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

3. Menyusun matrik impedansi (Zbus)

Matrik admitansi (Y) yang disusun:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.9826 - 0.4041i & -0.1753 + 0.0721i & 0 & -0.3375 + 0.1388i \\ -0.1753 + 0.0721i & 1.1194 - 0.4603i & -0.3494 + 0.1437i & -0.3152 + 0.1296i \\ 0 & -0.3494 + 0.1437i & 1.7905 - 0.7362i & -1.4411 + 0.5926i \\ -0.3375 + 0.1388i & -0.3152 + 0.1296i & -1.4411 + 0.5926i & 2.0937 - 0.8609i \end{bmatrix}$$

Kemudian menginverskan matrik admitansi untuk mendapatkan matrik impedansi, dimana $[Z] = [Y]^{-1}$

$$Z = \begin{bmatrix} 1.3516 + 0.5558i & 0.7880 + 0.3240i & 0.9519 + 0.3914i & 0.9916 + 0.4078i \\ 0.7880 + 0.3240i & 1.7354 + 0.7136i & 1.4599 + 0.6003i & 1.3931 + 0.5728i \\ 0.9519 + 0.3914i & 1.4599 + 0.6003i & 2.3832 + 0.9800i & 2.0135 + 0.8279i \\ 0.9916 + 0.4078i & 1.3931 + 0.5728i & 2.0135 + 0.8279i & 2.1639 + 0.8898i \end{bmatrix}$$

4. Mencari vektor sudut fasa setiap node (θ)

Daya injeksi node yaitu $S = [-(123,527 + j61,834), -(205,943 + j110,828); -(123,527 + j61,834); -(123,333 + j76,902); -(178,138 + j93,864)]$

Dari persamaan (3-23) dimana $\theta = Z.S$, maka diberikan:

$$\theta = (6,91; 8,197; 10,346; 10,046)^T$$

Karena node 1 dijadikan sebagai node acuan atau node referensi maka besarnya sudut vektor node 1 adalah sama dengan 0.

5. Menghitung aliran daya (*Branch Flow*) setiap cabang

$$\phi = A \theta.$$

$$\phi = \begin{bmatrix} -762.8759 \\ -905.4708 \\ -142.5949 \\ -347.3480 \\ -204.7532 \\ -237.6832 \\ 32.9300 \end{bmatrix}$$

Matrik diagonal admitansi (B_L)

$$B_L = \begin{bmatrix} 0.47 - 0.19i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.28 - 0.12i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.18 - 0.07i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.38 - 0.14i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.32 - 0.13i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.35 - 0.15i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.35 - 0.15i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.44 - 0.59i \end{bmatrix}$$

6. Menghitung indeks keefektifan (E_L)

Indeks keefektifan setiap cabang dihitung dan dimasukkan ke dalam tabel 4.8

Tabel 4.8 Hasil perhitungan indeks keefektifan perencanaan alternatif ke-2 1

Cabang	Node-node	Panjang (km)	Branch Flow (kVA)	Indeks Keefektifan (E_L)	Rangking
1	1 – 2	1.9750	-358.47 + 147.40i	99.3666	7
2	1 – 3	3.3200	-253.11 + 104.08i	24.8284	5
3	2 – 3	5.2950	-24.99 + 10.28i	0.9638	1
4	2 – 5	2.7500	-117.22 + 48.20i	16.7592	4
5	3 – 5	2.9440	-64.54 + 26.54i	8.0520	2
6	3 – 4	2.6560	-83.05 + 34.15i	12.7292	3
7	4 – 5	0.6440	47.45 - 19.51i	123.715	6

Sumber: Hasil Perhitungan

7. Penghapusan cabang dengan indeks keefektifan terkecil

Dari hasil yang diperlihatkan tabel 4.7 maka cabang yang pertama kali dihapus adalah cabang nomor 3 (2 – 3).

8. Tes diskoneksi

Tabel 4.9 Hasil tes diskoneksi perencanaan alternatif ke-2

Cabang	Node m-n	γ_k	Z_k	$D = \gamma_k - Z_k$	Keterangan	Hasil
3	2 – 3	1.5110 + 0.6214i	4.8804 + 2.0068i	-3.3694 - 1.3854i		Hapus
5	3 – 5	1.0665 + 0.4385i	2.7135 + 1.1158i	-1.6470 - 0.6773i		Hapus
6	3 – 4	1.3630 + 0.4114i	2.4480 + 1.0066i	-2.0640 - 0.6231i	Node 4,5 terputus	Jangan hapus
4	2 – 5	1.2749 + 0.524i	2.5347 + 1.0423i	-1.2598 - 0.5181i		Hapus
2	1 – 3	2.1131 + 0.6379i	3.0600 + 1.2583i	-2.1707 - 0.6552i	Node 3,4,5 terputus	Jangan hapus
1	1 – 2	1.7801 + 0.5374i	1.8204 + 0.7485i	-0.7682 - 0.2319i	Node 2 terputus	Jangan hapus
7	4 – 5	0.7067 + 0.2132i	0.5936 + 0.2441i	-0.1243 - 0.0376i	Node 5 terputus	Jangan hapus

Sumber: Hasil Perhitungan

Hasil tes diskoneksi menunjukkan cabang yang bisa dihapus adalah cabang 3, 4 dan cabang 5.

9. Membentuk vektor sudut fasa baru akibat penghapusan cabang (θ')

$$\beta_3 = \frac{-1}{x_3 + \gamma_3}$$

$$= -0.1338 + 0.0550i$$

Dimana:

$$e_k = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ dan } e_k^T = [1 - 1 0 0] \text{ sehingga didapatkan vektor sudut baru yaitu:}$$

$$\theta' = (7,024; 8,006; 1,0244; 9,965)^T$$

10. Menghitung aliran daya baru (*Branch Flow*) akibat penghapusan cabang 3
Akibat penghapusan maka nilai impedansi cabang 3 dirubah menjadi nilai negatifnya, sehingga matrik diagonal B_L karena penghapusan cabang 3 (elemen 3×3) menjadi $-0.18 + 0.07i$

$$B_L = \begin{bmatrix} 0.47 - 0.19i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.28 - 0.12i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(0.18 - 0.07i) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.38 - 0.14i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.32 - 0.13i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.35 - 0.15i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.44 - 0.59i \end{bmatrix}$$

Aliran daya baru (*Branch Flow*) akibat penghapusan cabang 3 dihitung kembali.

11. Tes pembebanan berlebih (*overload*)

Tabel 4.10 Hasil tes pembebanan berlebih (*overload*) perencanaan alternatif ke-2

Cabang(k)	Node-node	Kapasitas saluran (kVA)	Aliran daya (S_L) karena hapus cabang ke-k (kVA)		
			k=3	k=5	k=4
1	1 – 2	3400	$-364.38 + 149.82i$	$-360.19 + 148.09i$	$-370.92 + 152.51i$
2	1 – 3	3400	$-247.17 + 101.61i$	$-251.36 + 103.33i$	$-240.63 + 98.92i$
3	2 – 3	3400	$19.09 - 7.85i$	$23.28 - 9.58i$	$12.55 - 5.16i$
4	2 – 5	3400	$-109.96 + 45.22i$	$-97.38 + 40.05i$	$64.79 - 26.65i$
5	3 – 5	3400	$-68.38 + 28.11i$	$49.08 - 20.18i$	$37.95 - 15.60i$
6	3 – 4	3400	$-86.47 + 35.56i$	$-69.26 + 28.48i$	$-59.33 + 24.40i$
7	4 – 5	3400	$44.03 - 18.11i$	$61.24 - 25.18i$	$71.18 - 29.27i$
Tes Overload			Lolos tes	Lolos tes	Lolos tes

Sumber: Hasil Perhitungan

Hasil tes menunjukkan penghapusan cabang 3, 4 dan cabang 5 tidak akan berdampak pada pembebanan berlebih pada sistem, karena aliran daya di cabang kurang dari kapasitas saluran.

12. Membentuk matrik impedansi baru ($Z_{bus'}$)

Penghapusan sementara dari cabang 3 menghasilkan hasil yang lolos tes diskoneksi dan tes overload, maka penghapusan cabang 3 wajib untuk dilakukan. Penghapusan cabang 3 berdampak pada perubahan susunan matrik impedansi (Z), sehingga diperlukan modifikasi matrik impedansi (Z) menurut persamaan (2-41).

Dengan nilai e_3 dan β_3 dari perhitungan sebelumnya, maka diperoleh:

$$Z' = \begin{bmatrix} 1.3019 + 0.5353i & 0.8715 + 0.3584i & 0.9967 + 0.4098i & 1.0270 + 0.4223i \\ 0.8715 + 0.3584i & 1.5950 + 0.6559i & 1.3846 + 0.5693i & 1.3336 + 0.5484i \\ 0.9967 + 0.4098i & 1.3846 + 0.5693i & 2.3428 + 0.9634i & 1.9816 + 0.8148i \\ 1.0270 + 0.4223i & 1.3336 + 0.5484i & 1.9816 + 0.8148i & 2.1387 + 0.8794i \end{bmatrix}$$

Selanjutnya nilai matrik impedansi baru (Z') ini akan dipergunakan untuk perhitungan selanjutnya, langkah langkah dimulai kembali dari menentukan indeks keefektifan setelah penghapusan cabang 3. Hasil dari perhitungan di atas, dari 7 cabang yang direncanakan didapatkan 3 cabang yang berhasil dihapus yaitu cabang 3,4 dan 5. Cabang yang bertahan adalah cabang 1, 2, 6 dan 7 dengan panjang total 6,531 km.

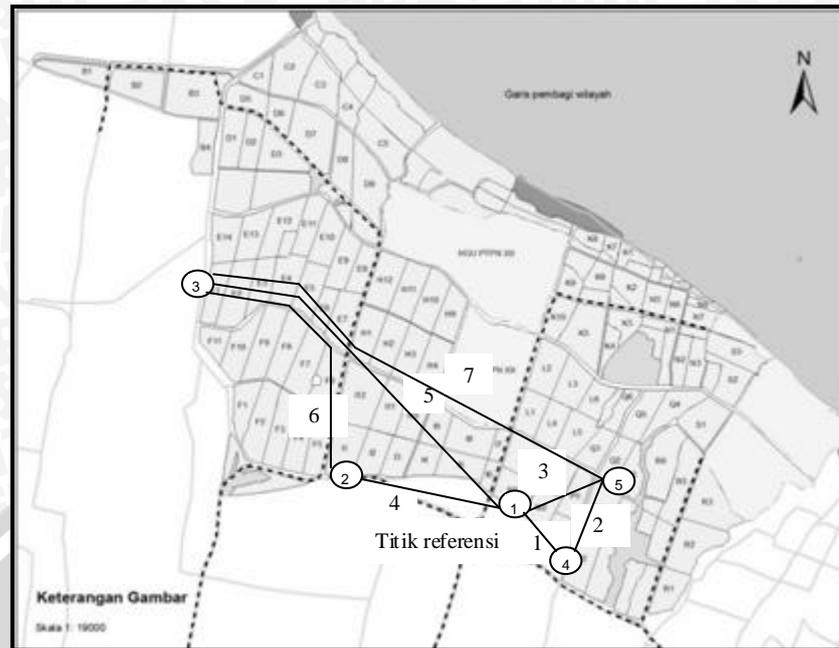
4.3.4 Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-3

Dasar pemikiran dari perencanaan alternatif ke-3 ini adalah mencoba memindahkan jalur masuknya penyulang yang awalnya dari HGU wilayah barat, sekarang menjadi di HGU wilayah timur. tentunya ini akan mempengaruhi konfigurasi jaringannya. Pengelompokan beban dan penempatan node masih sama dengan perencanaan alternatif ke-2, hanya saja karena perbedaan yang dibuat tadi akan membuat perubahan penomoran node saja. Hal ini dilakukan untuk mempermudah proses perhitungan dan analisis.

Penarikan jalur kabel juga masih sama dengan perencanaan sebelumnya, hanya yang membedakan adalah penomoran dari jalur/ cabang yang dirancang. Dari sini nantinya akan didapatkan jalur mana yang efektif bilamana letak masuknya penyulang dirubah. Pengelompokan beban adalah sebagai berikut:

- Node 1 : motor listrik 7, 8 dengan total daya $123,527 + j68,231$ kVA
- Node 2 : motor listrik 9, 10 dengan total daya $123,527 + j68,231$ kVA
- Node 3 : motor listrik 11, 12, 13 dengan daya total $205,943 + j110,828$ kVA
- Node 4 : motor listrik 1, 2, 6, dengan total daya $123,333 + j76,902$ kVA
- Node 5 : motor listrik 3, 4, 5 dan perkiraan kebutuhan daya mendatang dari penduduk desa Banongan sehingga total daya $178,138 + j93,864$ kVA

Jumlah total cabang yang dibuat ada 7 buah, dari sini nantinya akan dieleminasi 3cabang dengan menggunakan metode *Successive Backward*. Gambar perencanaan jalur ditampilkan dalam gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.8 Peta jalur perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3 di lahan HGU PG Asembagus Situbondo

Sumber : Arcgis

Proses penentuan jalur yang efektif menggunakan metode *Successive Backward* adalah sebagai berikut:

1. Data perencanaan
Dari data yang diambil maka panjang total keseluruhan dari perencanaan alternatif ke-3 ini adalah sebesar 19,584 km

Tabel 4.11 1 Data perencanaan jalur jaringan listrik alternatif ke-3

Cabang	Node-node	Panjang (km)	Impedansi data
1	1 – 4	2.656	$2.4480 + 1.0066i$
2	4 – 5	0.644	$0.5936 + 0.2441i$
3	1 – 5	2.944	$2.7135 + 1.1158i$
4	1 – 2	3.320	$3.0600 + 1.2583i$
5	1 – 3	5.295	$4.8804 + 2.0068i$
6	2 – 3	1.975	$1.8204 + 0.7485i$
7	3 – 5	2.750	$2.5347 + 1.0423i$
Total		19.584	

2. Menyusun matrik insidensi (A)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

3. Menyusun matrik impedansi (Zbus)

Matrik admitansi (Y) yang disusun:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.7494 - 0.3082i & -0.4699 + 0.1932i & 0 & 0 \\ -0.4699 + 0.1932i & 0.9826 - 0.4041i & 0 & -0.3375 + 0.1388i \\ 0 & 0 & 1.7905 - 0.7362i & -1.4411 + 0.5926i \\ 0 & -0.3375 + 0.1388i & -1.4411 + 0.5926i & 2.0937 - 0.8609i \end{bmatrix}$$

Kemudian menginverskan matrik admitansi untuk mendapatkan matrik impedansi, dimana $[Z] = [Y]^{-1}$

$$Z = \begin{bmatrix} 1.7354 + 0.7136i & 0.9475 + 0.3896i & 0.2756 + 0.1133i & 0.3424 + 0.1408i \\ 0.9475 + 0.3896i & 1.5111 + 0.6214i & 0.4395 + 0.1807i & 0.7644 + 0.2307i \\ 0.2756 + 0.1133i & 0.4395 + 0.1807i & 1.1988 + 0.4930i & 0.5460 + 0.2245i \\ 0.3424 + 0.1408i & 0.7644 + 0.2307i & 0.5460 + 0.2245i & 1.1132 + 0.4577i \end{bmatrix}$$

4. Mencari vektor sudut fasa setiap node (θ)

Daya injeksi setiap node dengan mengabaikan node referensi,

$$S = [-(123,527 + j61,834); -(123,527 + j61,834); -(205,943 + j110,828); -(123,333 + j76,902); -(178,138 + j93,864)]$$

Dari persamaan (2-24) dimana $\theta = Z.S$, maka diberikan:

$$\theta = (5,6919; 6,5593; 5,4078; 5,3565)^T$$

Karena node 1 dijadikan sebagai node acuan atau node referensi maka besarnya sudut vektor node 1 adalah sama dengan 0.

5. Menghitung aliran daya (*Branch Flow*) setiap cabang

$$\phi = A \theta.$$

$$\phi = \begin{bmatrix} -596.9205 \\ 5.3415 \\ -591.5790 \\ -627.7806 \\ -723.4790 \\ -95.6984 \\ 131.9001 \end{bmatrix}$$

Aliran daya (*Branch Flow*)

$$S_L = B_L \phi$$



$$S_L = \begin{bmatrix} -208.57 + 85.76i \\ 7.70 - 3.17i \\ -186.48 + 76.68i \\ -175.48 + 72.16i \\ -126.80 + 52.14i \\ -44.97 + 18.49i \\ 44.51 - 18.30i \end{bmatrix}$$

6. Menghitung indeks keefektifan (E_L)

Indek keefektifan perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3 ini ditampilkan dalam tabel 4.11, dari sana akan terlihat seberapa besar aliran daya (*Branch flow*) di setiap cabang. Adapun perhitungan menggunakan satuan yang sebenarnya, secara manual dibantu *Software Matlab* dan *Microsoft Excel 2007*.

7. Penghapusan cabang dengan indeks keefektifan terkecil

Dari hasil yang ditunjukkan oleh tabel 4.11 maka cabang yang pertama kali dihapus adalah cabang nomor 5 (node 1 – 3).

Tabel 4.12 1 Hasil perhitungan indeks keefektifan perencanaan alternatif ke-3

Cabang	Node-node	Panjang (km)	Branch Flow (kVA)	Indeks keefektifan (E_L)	Rangking
1	1 – 4	2.6560	-208.57 + 85.76i	31.9683	6
2	4 – 5	0.6440	7.70 - 3.17i	20.0675	7
3	1 – 5	2.9440	-186.48 + 76.68i	23.2641	5
4	1 – 2	3.3200	-175.48 + 72.16i	17.2140	4
5	1 – 3	5.2950	-126.80 + 52.14i	4.8901	1
6	2 – 3	1.9750	-44.97 + 18.49i	12.4650	3
7	3 – 5	2.7500	44.51 - 18.30i	6.3641	2

Sumber: Hasil Perhitungan

8. Tes diskoneksi

Tabel 4.13 1 Hasil tes diskoneksi perencanaan alternatif ke-3

Cabang	Node m-n	γ_k	Z_k	$D = \gamma_k - Z_k$	Keterangan	Hasil
5	1 – 3	1.5111 + 0.6214i	4.8804 + 2.0068i	-3.3693 - 1.3854i		Hapus
7	3 – 5	1.3866 + 0.5703i	2.5347 + 1.0423i	-1.1481 - 0.4720i		Hapus
6	2 – 3	1.7958 + 0.5421i	1.8204 + 0.7485i	-0.7525 - 0.2272i	Node 3 terputus	Jangan hapus
4	1 – 2	2.1575 + 0.6513i	3.0600 + 1.2583i	-2.1263 - 0.6418i	Node 2,3 terputus	Jangan hapus
3	1 – 5	0.9589 + 0.3943i	2.7135 + 1.1158i	-1.7546 - 0.7215i		Hapus
1	1 – 4	1.3289 + 0.4011i	2.4480 + 1.0066i	-2.0981 - 0.6334i	Node 1,2 terputus	Jangan hapus
2	4 – 5	0.7077 + 0.2135i	0.5936 + 0.2441i	-0.1233 - 0.0373i	Node 5 terputus	Jangan hapus

Sumber: Hasil Perhitungan

Hasil tes diskoneksi menunjukkan cabang yang bisa dihapus adalah cabang 3, 5 dan cabang 7. Hal ini sesuai syarat penghapusan cabang yang ditampilkan di persamaan (2-40). Akan tetapi juga melihat apakah penghapusan juga akan menyebabkan node lain terputus dari sistem, jika terputus maka penghapusan dibatalkan.

9. Membentuk vektor sudut fasa baru akibat penghapusan cabang (θ')

$$\beta_5 = \frac{-1}{x_5 + j\gamma_5} = -0.1338 + 0.0550i, \text{ dimana:}$$

$$e_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ dan } e_5^T = [0 \ -1 \ 0 \ 0] \text{ sehingga didapatkan vektor sudut baru yaitu:}$$

$$\theta' = (471.9533, 500.9007, 495.6830, 479.6121)^T$$

10. Menghitung aliran daya baru (*Branch Flow*) akibat penghapusan cabang

Akibat penghapusan maka nilai impedansi cabang 5 (elemen 5x5) dirubah menjadi nilai negatifnya, sehingga menjadi $-(4.8804 + 2.0068i)$. Penghapusan cabang berarti impedansi yang awalnya mempunyai nilai tertentu menjadi impedansi dengan nilai besar sekali. Hal ini dikarenakan tidak ada cabang atau konduktor lagi. Setelah nilai impedansi baru dimasukkan, maka aliran daya baru karena penghapusan cabang 4 dapat dicari.

11. Tes pembebanan berlebih (*overload*)

Hasil perhitungan *Branch Flow* dibandingkan dengan kapasitas maksimum perencanaan konduktor untuk melihat apakah sistem mengalami *overload*.

Tabel 4.14 1 Hasil tes pembebanan berlebih (*overload*) perencanaan alternatif ke-3

Cabang(k)	Node-node	Kapasitas Saluran (kVA)	SL karena hapus cabang ke-k (kVA)		
			k=5	k=7	k=3
1	1-4	3400	-191.18 + 78.63i	-192.24 + 79.06i	-155.55 + 63.97i
2	4-5	3400	25.08 - 10.31i	24.02 - 9.88i	60.72 - 24.97i
3	1-5	3400	-166.98 + 68.66i	-168.17 + 69.14i	127.04 - 52.24i
4	1-2	3400	-145.49 + 59.81i	-144.74 + 59.50i	-131.89 + 54.22i
5	1-3	3400	96.84 - 39.83i	96.09 - 39.52i	83.24 - 34.24i
6	2-3	3400	-14.99 + 6.16i	-14.24 + 5.86i	-1.39 + 0.57i
7	3-5	3400	7.65 - 3.15i	-4.94 + 2.03i	-24.23 + 9.96i
Tes Overload			Lolos	Lolos	Lolos

Sumber: Hasil Perhitungan

Hasil tes menunjukkan penghapusan pada cabang 3, 5 dan cabang 7 tidak akan berdampak pada pembebanan berlebih pada sistem, karena aliran daya di cabang kurang dari kapasitas saluran.

12. Membentuk matrik impedansi baru (Z_{bus})

Penghapusan sementara dari cabang 5 menghasilkan hasil yang lolos tes diskoneksi dan tes overload, maka penghapusan cabang 5 wajib untuk dilakukan.

Modifikasi matrik impedansi (Z) menurut persamaan (2-35) diperoleh:

$$Z' = \begin{bmatrix} 1.5950 + 0.6559i & 0.7235 + 0.2975i & 0.2104 + 0.0865i & 0.2614 + 0.1075i \\ 0.7235 + 0.2975i & 1.1538 + 0.4745i & 0.3356 + 0.1380i & 0.4169 + 0.1714i \\ 0.2104 + 0.0865i & 0.3356 + 0.1380i & 1.1686 + 0.4805i & 0.8584 + 0.3530i \\ 0.2614 + 0.1075i & 0.4169 + 0.1714i & 0.8584 + 0.3530i & 1.0666 + 0.4386i \end{bmatrix}$$

Selanjutnya nilai matrik impedansi baru (Z') ini akan dipergunakan untuk perhitungan selanjutnya, langkah langkah dimulai kembali dari menentukan indeks keefektifan setelah penghapusan cabang 5. Hasil dari perhitungan di atas adalah dari 7 cabang yang direncanakan didapatkan 3 cabang yang berhasil dihapus yaitu cabang 3, 5 dan 7. Cabang yang bertahan adalah cabang 1, 2, 4 dan 6 dengan panjang total 6,185 km.

4.3.5 Perbandingan Ketiga Alternatif Perencanaan Jalur Jaringan Listrik

Untuk mendapatkan gambaran lebih jelas dari perencanaan jalur yang dibuat maka ketiga perencanaan yang sudah melewati eliminasi menggunakan metode *Successive Backward* akan dibandingkan.

Setelah mendapatkan perbandingan yang jelas maka selanjutnya adalah mendapatkan satu buah perencanaan yang terpendek untuk meminimalkan biaya investasi dalam pelaksanaannya.

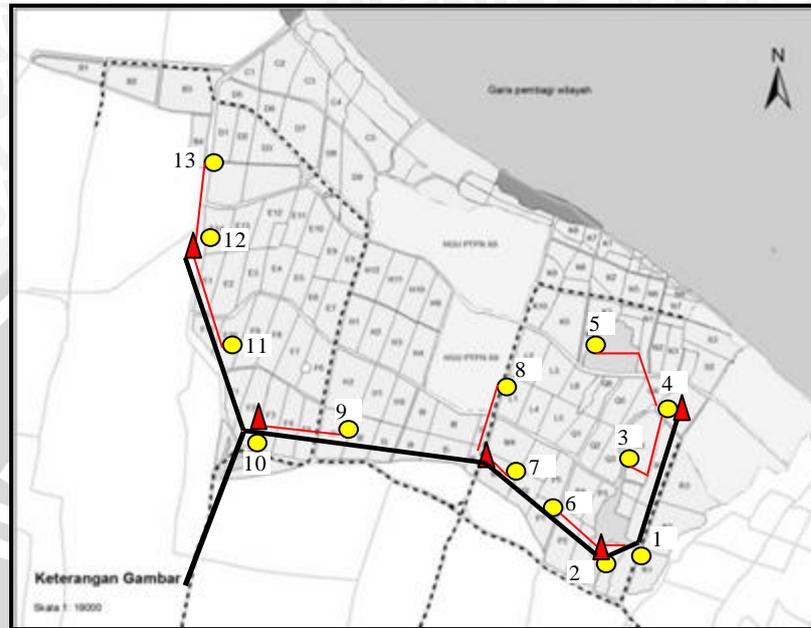
Untuk perencanaan jalur jaringan tegangan rendah (380/220 V) tidak dibahas dalam penulisan ini mengingat perencanaan hanya dibatasi dalam perencanaan jalur untuk tegangan listrik level menengah (20 kV). Sehingga dalam gambar akan langsung ditampilkan perkiraan rancangan untuk tegangan rendah yang mendampingi jalur tegangan menengahnya. Berikut adalah tabel perbandingan ketiga jalur.

Tabel 4.15 Perbandingan ketiga alternatif jalur jaringan listrik

No	Alternatif perencanaan	Panjang total (km)
1	Alternatif ke-1	7,4030
2	Alternatif ke-2	6,5310
3	Alternatif ke-3	6,1850

Di bawah ini adalah gambar dari ketiga hasil perencanaan dimana menggambarkan jalur jaringan listrik tegangan menengah (—), tegangan rendah (—), transformator (▲) dan motor listrik (●) setelah proses eliminasi.

a. Hasil perancangan alternatif ke-1

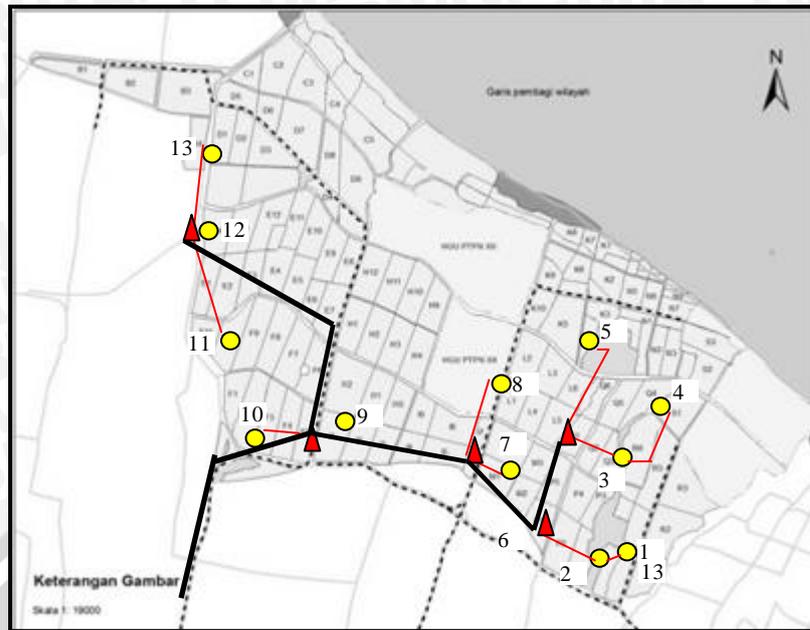


Gambar 4.9 Hasil eliminasi perencanaan alternatif ke-1

Penarikan jalur kabel ditarik dari jalan menuju ke pompa nomor 10, kemudian dari sana bercabang ke wilayah barat dan timur. Di wilayah barat kabel ditarik sampai ke titik di dekat pompa nomor 12 dimana nantinya akan ditarik kabel tegangan rendah menuju pompa 11, 12 dan 13. Di wilayah barat kabel menuju ke arah pompa nomor 7 melewati pompa nomor 9. Dari titik di dekat pompa nomor 7 berbelok ke kanan berturut-turut menuju pompa nomor 2, 1, 3 dan 4.

b. Hasil perancangan alternatif ke-2

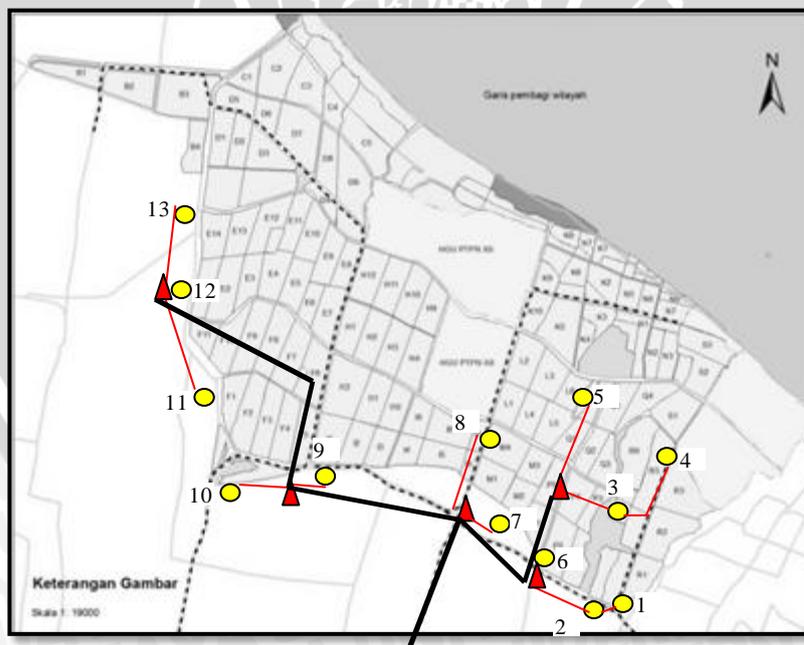
Penarikan jalur kabel masih seperti perencanaan alternatif ke-1, hanya saja panjang jalur berbeda. Titik bakal ditematkannya transformator sedikit berbeda. Dari percabangan di titik dekat pompa nomor 10, jalur diteruskan menuju pompa nomor 9 kemudian mengarah ke utara melewati jalan setapak menuju pompa nomor 12. Dari titik di dekat pompa nomor 12 sebagai ujung dari jalur, kemudian nantinya akan ditarik kabel tegangan rendah menuju pompa nomor 11 dan 13. Untuk percabangan yang ke arah timur, jalur ditarik menuju pompa nomor 7 dan nomor 6. Dari pompa nomor 6 mengarah ke utara kemudian berakhir di persimpangan. Dari titik ini nantinya akan ditarik kabel tegangan rendah menuju pompa nomor 3, 4 dan 5.



Gambar 4.10 Hasil eliminasi perencanaan alternatif ke-2

c. Hasil perancangan alternatif ke-3

Jalur penarikan serupa dengan alternatif ke-2 hanya saja yang membedakan adalah awal jalur masuknya jaringan berada di tengah yaitu HGU wilayah timur, dimana langsung bertemu di pompa nomor 7 sebagai titik percabangan.



Gambar 4.11 Hasil eliminasi perencanaan alternatif ke-3

Untuk perencanaan jalur alternatif ke-1 dan ke-2 memiliki persamaan sisi awal masuknya jaringan yaitu berada di wilayah HGU bagian barat. Akan tetapi konfigurasi jaringannya berbeda. Perencanaan jalur alternatif ke-2 sama dengan perencanaan jalur

alternatif ke-3 hanya berbeda titik masuk awal masuknya jaringan. Perencanaan alternatif ke-3 memiliki titik awal masuknya jaringan di sisi wilayah HGU bagian timur. Perencanaan untuk jalur jaringan listrik level tegangan rendah diberikan perencanaan yang paling memungkinkan, karena lokasi penempatan titik transformator juga awalnya melihat kondisi persebaran juga. Akan tetapi dalam penulisan ini tidak dibahas secara menajau tentang perencanaan dan analisis untuk sistem tegangan rendahnya, karena penulis membatasi permasalahan untuk sistem tegangan menengahnya saja.

Dari hasil perencanaan terlihat bahwa perencanaan yang memiliki total panjang saluran terpendek dimiliki oleh perencanaan alternatif ke-3, yaitu sebesar 6,185 km kemudian diikuti oleh alternatif ke-2 dan ke-1 dengan total panjang saluran berturut-turut 6,5310 km serta 7,4030 km. Jika dilihat dari sisi investasi maka perencanaan alternatif ke-3 adalah yang paling mungkin untuk dipilih, mengingat faktor yang mempengaruhi biaya investasi adalah panjang saluran. Panjang saluran disini dibandingkan dengan kebutuhan konduktor dan konstruksi yang lain, sehingga semakin panjang saluran maka biaya investasi juga semakin bertambah. Akan tetapi dalam pemilihan juga harus dilihat dari faktor yang lain, dalam hal ini adalah dari segi kelistrikan.

Apakah dengan perencanaan jalur yang dibuat akan menghasilkan hasil yang baik juga dari sisi kelistrikan. Karena belum tentu perencanaan jalur yang pendek juga berpengaruh ke sisi kelistrikan yaitu jatuh tegangan yang kecil dan total rugi-rugi saluran yang juga kecil. Hal ini akan diketahui setelah ada hasil proses simulasi perhitungan di subbab selanjutnya.

4.4 Simulasi dan Analisis Perencanaan Jaringan Listrik

Analisis perhitungan dilakukan untuk mencari tegangan di tiap titik beban, arus yang mengalir pada saluran dan rugi daya yang terjadi pada seluruh sistem jaringan. Simulasi perhitungan dilakukan untuk ketiga alternatif perencanaan jalur.

4.4.1 Data Jaringan

Nilai Resistansi pada setiap saluran didapat dengan mengkalikan harga per km dari data impedansi yang dipilih dengan panjang saluran di lapangan. Menurut tabel 4.2, luas penampang kabel yang dipilih adalah 35 mm^2 maka nilai impedansi per km adalah $0,9217+0,3790 \Omega/\text{km}$.

4.4.2 Data Beban

Pada perencanaan jalur sudah ditentukan pengelompokan beban yang ada, ketiga alternatif perencanaan menggunakan pengelompokan beban yang sama hanya saja berbeda jalur dan lokasi. Dalam simulasi perhitungan dan analisis maka titik hasil pengelompokan beban diberikan notasi sebagai berikut:

Beban A : motor listrik 11, 12, 13 sebesar $205,943 + j110,828$ kVA

Beban B : motor listrik 9, 10 sebesar $123,527 + j68,231$ kVA

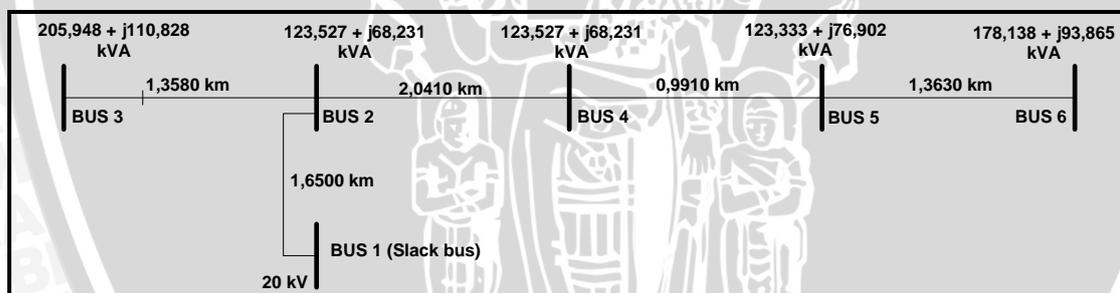
Beban C : motor listrik 7, 8 sebesar $123,527 + j68,231$ kVA

Beban D : motor listrik 1, 2, 6 sebesar $123,333 + j76,902$ kVA

Beban E : motor listrik 3, 4, 5 ditambah perkiraan kebutuhan daya desa Banongas sebesar sebesar $178,138 + j93,864$ kVA

Sedangkan untuk data impedansi di tiap saluran akan ditampilkan dalam gambar dan tabel hasil perhitungan impedansi. Dari gambar maka dapat dicari besarnya impedansi di setiap saluran, dimana jumlah bus adalah 6 buah dan bus 1 digunakan sebagai *slack* bus.

1. Alternatif ke-1



Gambar 4.12 Diagram segaris perencanaan jaringan listrik alternatif ke-1

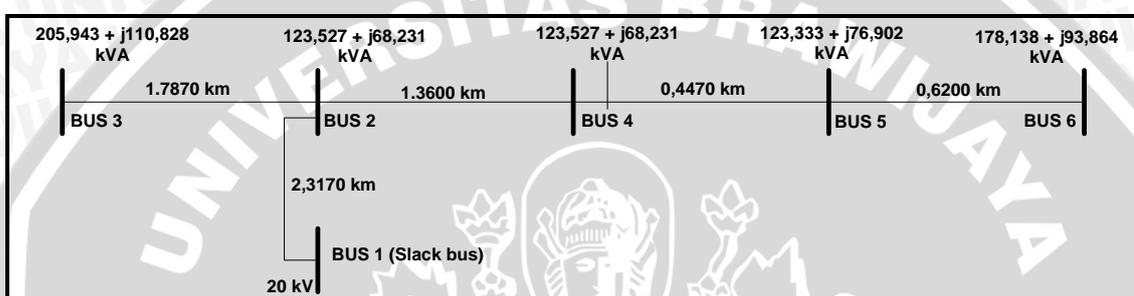
Bus 1 adalah awal masuknya jaringan dimana menghubungkan penyulang ke lokasi lahan. Bus ini diasumsikan adalah dari sisi pembangkitan, untuk itu bus ini digunakan sebagai *slack* bus. Ditambah dengan bus hasil pengelompokan beban, maka jumlah bus total adalah 6 buah. Bus 1 hanya memiliki nilai tegangan awal yang diasumsikan nilainya sebesar 20 kV, sedangkan bus yang lain hanya diketahui nilai daya beban. Untuk itu nantinya perlu dicari besarnya tegangan tiap bus, berdasarkan data-data yang ada ditambah dengan data impedansi tiap cabang. Data impedansi tiap cabang ditunjukkan pada tabel 4.15.

Tabel 4.16 1 Data impedansi tiap saluran perencanaan jaringan listrik alternatif ke-1

Cabang	Penghubung	Panjang (k m)	Impedansi (Ohm)
1	Bus 1 – 2	1.6500	$1.5208 + 0.6253i$
2	Bus 2 – 3	1.3580	$1.2517 + 0.5147i$
3	Bus 2 – 4	2.0410	$1.8812 + 0.7735i$
4	Bus 4 – 5	0.9910	$0.9134 + 0.3756i$
5	Bus 5 – 6	1.3630	$1.2563 + 0.5166i$

2. Alternatif ke-2

Diagram segaris perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2 diberikan pada gambar berikut:



Gambar 4.13 Diagram segaris perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2

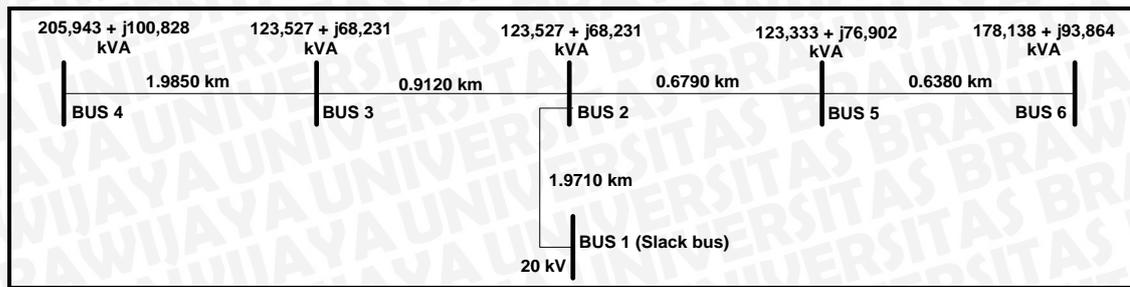
Sama halnya dengan perencanaan alternatif ke-1, pengelompokan beban masih saja sama hanya saja panjang jarak antara node berbeda. Berikut juga dengan perancangan jalur alternatif ke-3.

Tabel 4.17 Data impedansi tiap saluran perencanaan jaringan listrik alternatif ke-2

Cabang	Penghubung	Panjang (k m)	Impedansi (Ohm)
1	Bus 1 – 2	2.3170	$2.1356 + 0.8781i$
2	Bus 2 – 3	1.7870	$1.6471 + 0.6773i$
3	Bus 2 – 4	1.3600	$1.2535 + 0.5154i$
4	Bus 4 – 5	0.4470	$0.4120 + 0.1694i$
5	Bus 5 – 6	0.6200	$0.5715 + 0.2350i$

3. Alternatif ke-3

Diagram segaris perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3 diberikan pada gambar 4.14 di bawah ini. Dari sisi jumlah total daya beban yang tersambung, alternatif ke-3 tidak memiliki perbedaan, akan tetapi yang menjadi perbedaan adalah sisi masuknya jaringan berada di bus 2 pada alternatif ke-3 atau bus 4 pada alternatif yang sebelumnya. Sehingga penamaan bus yang lain pun ikut berubah.



Gambar 4.14 Diagram segaris perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3

Tabel 4.18 Data impedansi tiap saluran perencanaan jaringan listrik alternatif ke-3

Cabang	Penghubung	Panjang (km)	Impedansi (Ohm)
1	Bus 1 – 2	1.9710	$1.8167 + 0.7470i$
2	Bus 2 – 3	0.9120	$0.8406 + 0.3456i$
3	Bus 3 – 4	1.9850	$1.8296 + 0.7523i$
4	Bus 2 – 5	0.6790	$0.6258 + 0.2573i$
5	Bus 5 – 6	0.6380	$0.5880 + 0.2418i$

4.4.3 Proses Iterasi dan Perhitungan Jatuh Tegangan Serta Rugi Daya Pada Saluran

Setelah didapatkan data-data jaringan, maka proses iterasi menggunakan metode Gauss-Seidel dapat dilakukan, yaitu:

1. Besaran dasar ditentukan antara lain, tegangan dasar adalah 20 kV dan daya dasar adalah 100 kVA. Sehingga impedansi dasar dapat dicari menggunakan persamaan (2-48) menjadi:

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{20 \text{ kV}^2}{100 \text{ kVA}} \\ &= 4 \text{ pu} \end{aligned}$$

2. Panjang saluran antar bus di masing-masing alternatif dikalikan dengan nilai impedansi per km dari konduktor yang dipilih yaitu sebesar $1,2903 + j0,3895 \Omega/\text{km}$.
3. Impedansi dasar dari data kemudian dijadikan besaran per unit menggunakan persamaan (2-50) yaitu impedansi data yang ada dibagi dengan impedansi dasar (Z_{base})
4. Daya beban (S) pada setiap alternatif dibagi dengan daya dasar yang ditetapkan di awal untuk mendapatkan besaran daya dalam per unit
5. Matrik insidensi [A] dicari di setiap alternatif, kemudian mencari matrik admitansi [Ybus] dengan persamaan (2-51), kemudian menginverskan matrik [Ybus] untuk mendapatkan matrik impedansi [Zbus] seperti dalam persamaan (2-25)

6. Tegangan awal untuk setiap bus ditetapkan bernilai 1, akan tetapi dalam perhitungan tegangan awal dan juga daya beban untuk node 1 adalah 0 karena digunakan sebagai referensi, sehingga:

$$E = [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

7. Perhitungan arus injeksi (I_i) menggunakan persamaan (2-53)

$$I_i = \frac{P_{bi} - jQ_{bi}}{V_i^*}$$

Atau dalam matrik yaitu mengalikan tegangan awal dengan harga konjugatnya ($[E]^*$) dengan matrik daya beban $[S]$. (dalam persamaan menggunakan notasi untuk tegangan yaitu V karena mengutip dari daftar pustaka)

8. Tegangan baru setelah perhitungan arus injeksi didapatkan dengan menjumlahkan tegangan awal dengan hasil kali matrik impedansi dengan matrik arus injeksi
9. Kemudian arus injeksi dihitung kembali menggunakan matrik tegangan yang baru, begitu seterusnya sampai didapatkan hasil dengan eror yang ditentukan. Eror atau indeks presisi dalam perhitungan ini ditetapkan sebesar 0,0001, pengecekan dilakukan saat $[V_i^k] - [V_i^{k-1}] \leq \epsilon$, dimana k adalah indeks iterasi. Jika nilai tersebut masih dibawah indeks presisi maka proses iterasi dilanjutkan (kembali ke poin 1) dengan terlebih dahulu menetapkan :

$$V_i^{k+1} = V_i^k$$

Jika indeks presisi berhasil dicapai maka proses iterasi selesai.

10. Setelah iterasi terakhir dan matrik tegangan ditemukan maka selanjutnya adalah mengembalikan besaran per unit tadi menjadi besaran sebenarnya, yaitu dikalikan dengan 20 kV untuk tegangan dan 100 kVA untuk daya.
11. Persentase jatuh tegangan didapat dari selisih tegangan awal dengan tegangan setelah iterasi dalam satuan persen (%)
12. Setelah itu rugi daya pada saluran dapat dihitung menggunakan persamaan (2-43):

$$[S_{rugi}] = [I_{sal}^2][Z]$$

13. Hasil yang didapatkan dikembalikan lagi ke besaran dasar

4.4.4 Hasil Perhitungan Dengan Bantuan Komputer

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan software MATLAB 7.5, spesifikasi komputer yang digunakan adalah Pentium 4 2.00 Ghz, RAM 384 MB. Berikut ini adalah hasil perhitungan yang didapat:

Tabel 4.19 Hasil perhitungan perencanaan jaringan alternatif ke-1

Bus	Isaluran (A)	Tegangan (V)	% Jatuh tegangan	Srugi (VA)
1	9.4933 - 5.0051i	20000	0	0
2	5.6858 - 3.0759i	19929	0.36	110.64 - 69.86i
3	3.8075 - 1.9292i	19913	0.44	135.54 - 85.57i
4	0.0193 - 0.0057i	19880	0.60	126.95 - 73.54i
5	0.0196 - 0.3770i	19862	0.69	134.87 - 75.33i
6	2.6058 - 0.7789i	19849	0.76	146.01 - 77.69i
Total				654.02 - 381.99i

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.20 Hasil perhitungan perencanaan jaringan alternatif ke-2

Bus	Isaluran (A)	Tegangan (V)	% Jatuh tegangan	Srugi (VA)
1	9.5090 - 5.0115i	20000	0	0
2	5.6929 - 3.0793i	19900	0.50	155.80 - 98.33i
3	3.8161 - 1.9322i	19880	0.60	188.72 - 119.08i
4	0.0129 - 0.0038i	19867	0.67	166.65 - 100.77i
5	0.0193 - 0.3760i	19860	0.70	170.21 - 101.58i
6	2.6021 - 0.7777i	19853	0.74	175.27 - 102.65i
Total				856.64 - 522.41i

Sumber: Hasil Perhitungan

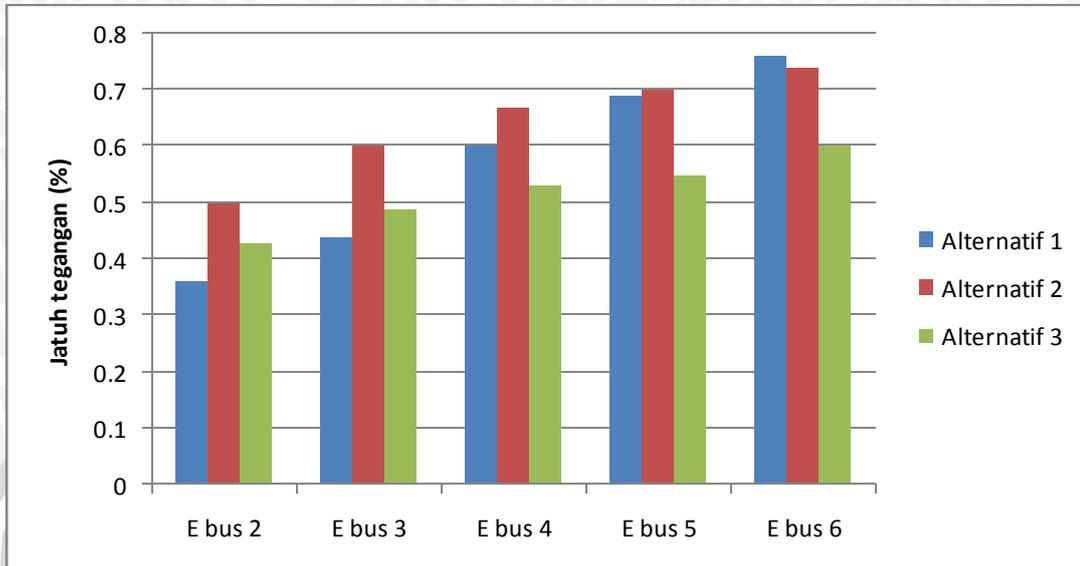
Tabel 4.21 Hasil perhitungan perencanaan jaringan alternatif ke-3

Bus	Isaluran (A)	Tegangan (V)	% Jatuh tegangan	Srugi (VA)
1	5.7114 - 3.4535i	20000	0	0
2	5.6911 - 3.0775i	19915	0.43	132.27 - 83.53i
3	0.0203 - 0.3760i	19903	0.49	137.69 - 84.75i
4	2.6029 - 0.7795i	19895	0.53	142.90 - 85.86i
5	0.0049 - 0.0015i	19890	0.55	149.01 - 94.08i
6	3.8029 - 1.9294i	19880	0.60	185.44 - 117.06i
Total				747.32 - 465.29i

Sumber: Hasil Perhitungan

Jika dilihat pada tabel hasil simulasi perhitungan, pada tabel pertama yaitu perencanaan alternatif ke-1 memberikan nilai jatuh tegangan pada titik terjauh sebesar 0.69 % atau turun 137 V dari tegangan awal 20.000 V. Dengan memberikan total rugi-rugi saluran sebesar 538.12-349.26i VA. Untuk perencanaan alternatif ke-2 menghasilkan nilai jatuh tegangan di titik terjauh sebesar 0.67 % atau turun sebesar 133

V dari tegangan awal 20.000V dan total rugi-rugi saluran sebesar 704.82 - 463.59i VA. Untuk perencanaan alternatif ke-3 menghasilkan nilai jatuh tegangan di titik terjauh dan total rugi-rugi saluran berturut-turut sebesar 0.55% (turun 109 V dari tegangan awal) dan 791.99 - 517.83i VA. Jika digambarkan akan seperti di bawah ini:



Gambar 4.15 Grafik perbandingan jatuh tegangan ketiga alternatif perencanaan

Semua nilai jatuh tegangan menunjukkan nilai yang kecil yaitu dibawah 1 % dikarenakan sistem bekerja di level tegangan 20.000 V sehingga perbandingan antara selisih tegangan dengan tegangan awal relatif menunjukkan angka yang kecil. Nilai jatuh tegangan di semua alternatif masih jauh di bawah standar prosentase jatuh tegangan yang diizinkan yaitu 10%. Untuk hasil perbandingan ketiga alternatif yang dibuat, maka perencanaan alternatif ke-3 memberikan hasil paling baik dari sisi drop tegangan yang dihasilkan. Jatuh tegangan di titik terjauhnya adalah yang paling kecil, berikut di bus 4 dan bus 5. Meskipun di bus 2 dan bus 3 tidak berada posisi paling baik, akan tetapi hasil ini masih bisa ditolerir mengingat jatuh tegangan di titik terjauhnya adalah yang terkecil.

Hal ini dipengaruhi karena dari sisi impedansi tiap saluran memiliki nilai yang lebih kecil dari ketiga alternatif mengingat impedansi saluran sebanding dengan panjang saluran tersebut. Dan untuk total panjang saluran, alternatif ke-3 memiliki total panjang saluran yang terpendek. Selain itu juga dikarenakan titik awal masuknya saluran berada di tengah-tengah bus dari total bus beban yang sejumlah 5 buah, yaitu di bus 2 (lihat gambar 4.9). Sehingga pembagian arus juga relatif seimbang untuk beban di kanan dan di kiri.

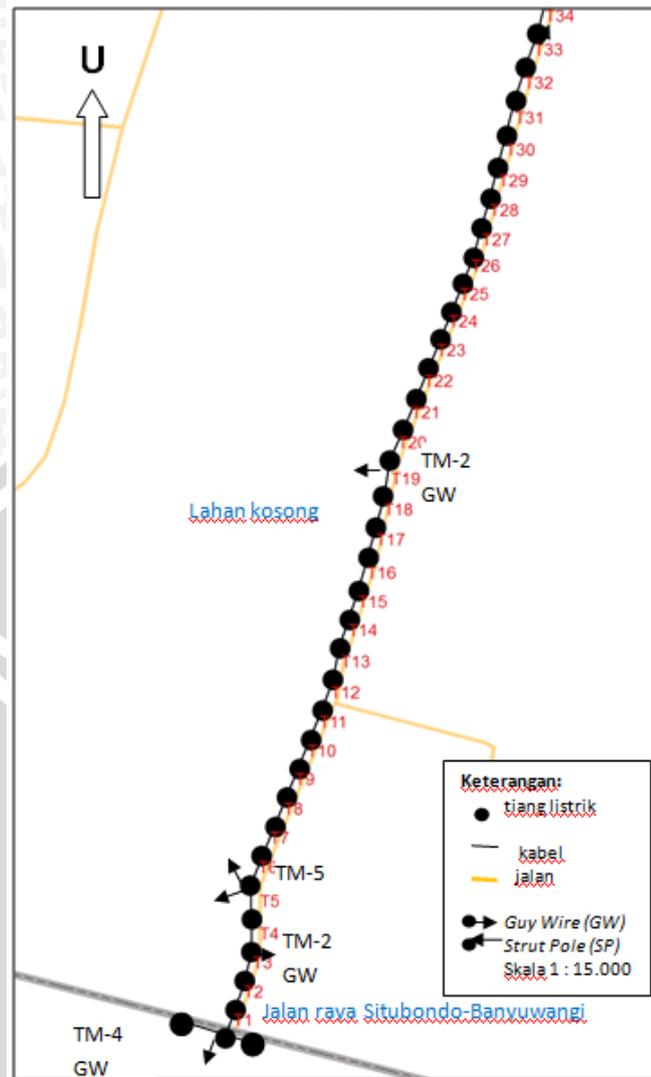
Untuk total rugi-rugi saluran terkecil, perencanaan alternatif ke-1 berada ditempat tertinggi daripada alternatif ke-3 yang berada di urutan kedua diikuti alternatif ke-2. Meski total panjang saluran paling panjang akan tetapi bisa menghasilkan total rugi-rugi saluran yang kecil, hal ini disebabkan karena faktor pengaruh beban yang tersambung ke sistem. Akan tetapi selisih total rugi daya antara perencanaan alternatif ke-1 dengan alternatif ke-3 hanyalah berkisar 200 VA sehingga hal tersebut masih bisa kembali ditolerir. Dari pemaparan yang dibuat, maka memilih alternatif ke-3 sebagai alternatif terbaik dengan melihat pertimbangan sisi investasi maka hal tersebut masih dianggap *feasible* untuk dilaksanakan.

4.5 Perencanaan Konstruksi Jaringan yang Dipilih

Pada pembahasan sebelumnya telah dianalisis dan dipilih alternatif jaringan mana yang dipilih, yaitu jaringan alternatif ke-3. Selanjutnya pada subbab ini akan dibuat suatu rancangan konstruksi dari jaringan yang meliputi peletakan tiang-tiang dan pemilihan tiang listrik berdasarkan *working load*.

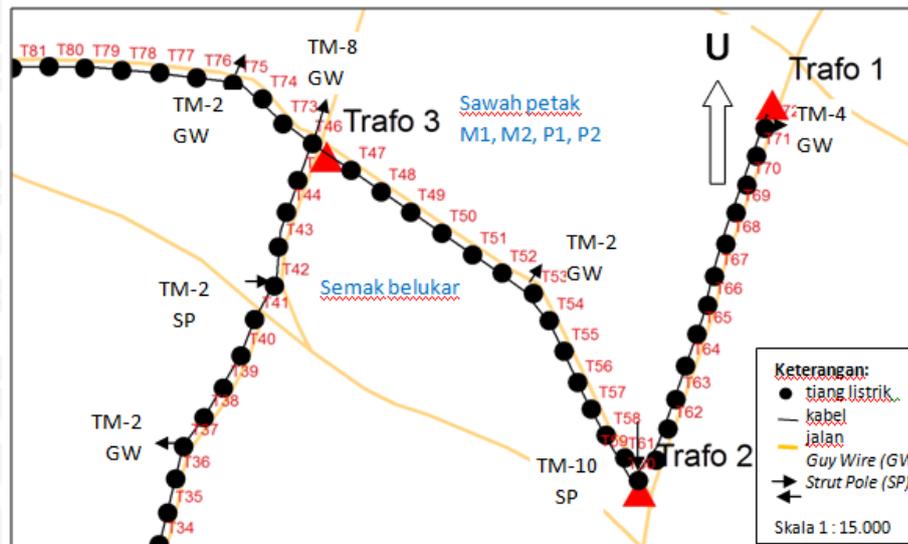
Peletakan tiang listrik disesuaikan dengan kondisi geografis lapangan, maksudnya adalah kondisi tanah dan melihat akses jalan yang ada. Berikut adalah perencanaan konstruksinya yang digambarkan dalam gambar 4.16, 4.17 dan 4.18.

Di awal penarikan kabel, tiang pertama di berseberangan dengan tiang ke-2 dimana dipisahkan oleh jalan raya Situbondo-Banyuwangi. Kabel diambil dari jaringan tegangan menengah (JTM) yang sudah ada yang lokasinya berada di selatan jalan raya. Kemudian tiang disusun ke arah utara, pada gambar ditampilkan tiang pertama (T1) sampai dengan tiang ke-34 (T34). Perencanaan selanjutnya akan bersambung di gambar 4.17 dan gambar 4.18.

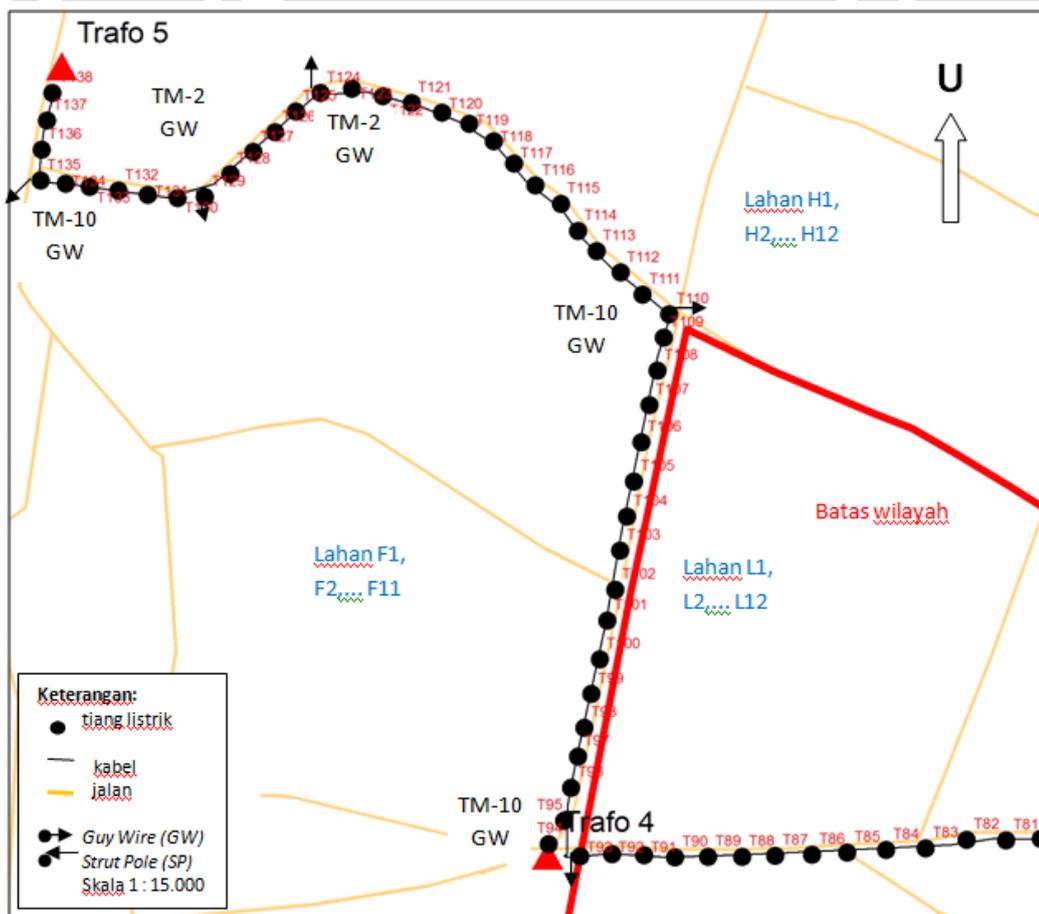


Gambar 4.16 Perencanaan konstruksi alternatif ke-3 bagian pertama

Dari tiang nomor T34, tiang terus mengarah ke utara sampai di tiang nomor T46 dimana pada tiang ini adalah titik percabangan yang akan membelah jalur menjadi dua bagian yaitu bagian timur dan bagian barat. Di antara tiang T46 dengan tiang T47 nantinya akan diletakkan transformator nomor 3 yang akan menyuplai motor listrik nomor 7 dan 8. Selanjutnya di bagian timur tiang listrik disusun sampai titik belokan yaitu di tiang T60, dimana di titik ini terdapat transformator nomor 2 yang akan menyuplai motor listrik nomor 1, 2 dan 6. Dari belokan kemudian mengarah ke utara lagi menuju ke tiang ujung T72 dimana terdapat transformator 1 yang akan menyuplai motor listrik 3, 4, dan 5. Di titik inilah nantinya penduduk desa Banongan dapat menarik kabel tegangan rendah menuju desa karena di titik ini adalah akses terdekat dari desa. Untuk percabangan bagian barat, pada gambar 4.17 tiang listrik dimulai dari tiang T73 sampai tiang T81.



Gambar 4.17 Perencanaan konstruksi alte rnatif ke-3 bagian kedua



Gambar 4.18 Perencanaan konstruksi alte rnatif ke-3 bagian ketiga

Pada gambar di atas tiang listrik dari T81 diteruskan ke arah barat sampai dititik belokan yaitu di tiang T93, dimana nantinya akan diletakkan transformator 4 yang akan menyuplai motor listrik nomor 9 dan 10. Dari T93 tiang mengarah ke utara dan berada

di sisi sebelah kiri mengikuti jalan setapak sampai ke T109 yang merupakan tiang sudut. Sedikit menyering ke kiri tiang kemudian diarahkan menuju ke T138 mengikuti jalan sampai ke tiang T138 sebagai tiang akhir. Disini akan ditempatkan transformator 5 yang akan menyuplai kebutuhan listrik untuk motor listrik nomor 11, 12 dan 13.

Untuk mendapatkan pemilihan tiang listrik terlebih dahulu harus dilakukan perhitungan matematis berdasarkan persamaan dari literatur yang didapatkan. Untuk memilih jenis kekuatan tiang terlebih dahulu harus dihitung *working load* (daN) dari setiap tiang. Kemudian baru bisa ditentukan jenis tiang dengan kekuatan yang cukup dimana tiang yang dipilih harus melebihi nilai dari 2 x hasil perhitungan gaya mekanis tiang. Hal ini dikarenakan tiang listrik dikatakan gagal fungsi jika gaya mekanis melebihi 2 kali *working load* ($breaking\ load = 2 \times working\ load$). (Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN(Persero), 2008: 7). Berikut adalah contoh perhitungan dari tiang awal T1.

- ditentukan jarak gawang (a) adalah 60 m
- panjang andongan (s) adalah 1 m.
- dari perhitungan sebelumnya didapatkan bahwa penampang konduktor yang digunakan adalah 35 mm², ini berarti diameter (d) adalah sebesar 0,0075 m
- percepatan gravitasi (g) adalah 9,8 m/s², tekanan angin adalah 40 daN/m²
- massa konduktor seperti yang terlihat dalam tabel 4.21 adalah sebesar 0,28 kg/m

Tabel 4.22 Tabel Gaya Mekanis pada Tiang

No.	Penampang Penghantar [mm ²]	Massa [kg/m]	Diameter d [m]	F ₁ massa x g [daN]	F ₂ Resultan [Kg/m]	F = $\sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ [daN]
I	<u>JTR</u>					
	▪ 3 x 35 + N	0,67	0,031	148	28	150
	▪ 3 x 50 + N	0,78	0,034	172	31	175
	▪ 3 x 70 + N	1,01	0,041	223	37	224
II	<u>JTM AAAC</u>					
	▪ 3 x 35	0,28	0,008	62	21,6	65
	▪ 3 x 70	0,63	0,011	139	29,7	142
	▪ 3 x 150	1,22	0,016	269	45	273
	▪ 3 x 240	1,88	0,019	414	243	480
III	<u>JTM AAAC-S</u>					
▪ 3 x 150	1,54	0,017	340	46	343	
IV	<u>JTM AAAC-T</u>					
▪ 3 x 150	3,23	0,066	712	59	715	

Sumber: Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik PT PLN(Persero), 2008: 8

Sebelum perhitungan gaya mekanis terlebih dahulu harus dihitung panjang sebenarnya dari konduktor dimana menurut persamaan (2-2):

$$\begin{aligned} L &= a + \frac{8s^2}{3a} \\ &= 60 + \frac{8 \cdot 1^2}{3 \cdot 60} \\ &= 60,0444 \text{ m} \end{aligned}$$

Karena T1 adalah tiang awal maka menurut persamaan (2-3), (2-4) dan (2-5) gaya mekanis (*working load*) dapat dihitung:

$$\begin{aligned} F_m &= \text{massa} \times g \times \frac{L}{2} \\ &= 0,28 \times 9,8 \times \frac{60,0444}{2} \\ &= 86,6989 \text{ daN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_a &= \text{tekanan angin} \times d \times \frac{L}{2} \\ &= 40 \times 3 \times 0,0075 \times \frac{60,0444}{2} \\ &= 27,01998 \text{ daN} \end{aligned}$$

Sehingga daya mekanis (F)

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_m^2 + F_a^2} \\ &= 86,6989 \text{ daN} \end{aligned}$$

Dua kali gaya mekanis (F) tiang T1 adalah berkisar 180 daN sehingga tiang yang dipilih adalah jenis tiang dengan kekuatan 200 daN.

Untuk tiang penyangga/tiang tengah diambil contoh tiang T2, dimana jarak antar gawang dengan tiang (T3) adalah 50 m. Sesuai persamaan (2-6) maka:

$$\begin{aligned} F_a &= \text{tekanan angin} \times d \times \frac{L}{2} \\ &= 40 \times 3 \times 0,0075 \times \frac{50,053}{2} \\ &= 22,5237 \text{ daN} \end{aligned}$$

Dua kali gaya mekanis tiang T2 adalah berkisar di 40 daN, sehingga tiang yang dipilih adalah jenis tiang dengan kekuatan 160 daN. Perhitungan gaya mekanis untuk tiang sudut diambil contoh adalah tiang T60 dimana tiang berbelok dengan sudut belokan (α) sebesar 120° , menurut persamaan (2-7):

$$\begin{aligned} F_{maks} &= 2F_a \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ &= 2 \times 22,5237 \times \sin\left(\frac{120}{2}\right) \\ &= 35,1203 \text{ daN} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan jenis kekuatan semua tiang disajikan dalam lampiran 1. Dari sana terlihat bahwa hampir semua tiang menggunakan jenis tiang berkekuatan 160 daN, hanya tiang T1 saja yang membutuhkan tiang dengan kekuatan 200 daN. Tabel menunjukkan bahwa perencanaan membutuhkan 1 buah tiang awal yaitu T1 dan 2 tiang akhir yaitu T71 dan T138. Untuk tiang sudut dimiliki oleh tiang T60, T94, T109 dan T135. Untuk selainnya adalah tiang tengah/tiang penyangga dan tiang penyangga ganda. Di beberapa titik tiang menggunakan perangkat *Guy Wire (GW)* dan *Strut Pole (SP)* untuk memperkokoh dan menstabilkan posisi tiang.

4.6 Analisis dari Segi Ekonomi

Pada intinya proyek pergantian penggunaan pompa air penggerak mesin diesel dengan penggerak motor listrik adalah untuk menekan biaya pengeluaran pabrik sehingga keuntungan pabrik gula per tahunnya bisa meningkat. Jadi tidak akan ada gunanya jika rupanya proyek ini tidak menghasilkan keuntungan untuk pabrik. Untuk menampilkan hal ini maka perlu dilakukan perhitungan untuk melihat perbedaan di keduanya.

Hasil pengambilan data yang dilakukan di lapangan meliputi data hasil interview dengan pihak operator dan pegawai yang berwenang serta beberapa asumsi dan batasan adalah sebagai berikut:

- Terdapat 5 rumah pompa yang menggunakan mesin diesel dimana setiap harinya setiap mesin diesel membutuhkan hingga 150 liter bahan bakar minyak solar.
- Mesin diesel yang lebih kecil sejumlah 23 unit membutuhkan 35 liter bahan bakar
- Mesin diesel beroperasi setiap harinya selama 10 jam sepanjang tahun yaitu pukul 07.00 – 15.00 WIB, sebelum beban puncak
- Perhitungan dilakukan dalam satu tahun, yaitu 365 hari
- Mesin diesel selalu beroperasi setiap harinya dan tidak ada kendala
- Biaya yang dihitung adalah biaya dari konsumsi bahan bakar dan tidak menghitung faktor lain
- Harga per liter dari bbm jenis solar (nonsubsidi) adalah Rp 11.450,-/liter

Sehingga dapat dihitung pengeluaran setiap tahunnya:

Biaya mesin diesel besar = 5 unit x 150 liter x 365 hari x Rp 11.450,-/liter
= Rp 3.134.437.500,-

Biaya mesin diesel kecil = 23 unit x 35 liter x 365 hari x Rp 11.450,-/liter
= Rp 3.364.296.250,-

Jadi total pengeluaran = Rp 6.498.733.750,- dalam setahun

Sedangkan perhitungan apabila menggunakan motor listrik dengan Tarif Dasar Listrik (TDL) berdasarkan lampiran 13 adalah total dari perhitungan kWh, kVARh dan daya tersambung (Rekening Minimum 3). Berdasarkan hasil survey nantinya akan dipasang beban tersambung sebesar 5x197 kVA atau sebesar 985 kVA. Ini menempatkan perhitungan berada di golongan tarif I-3/TM yaitu di atas 200 kVA.

- Untuk total per-kWh

Beban beroperasi di waktu bukan beban puncak sehingga dikenakan biaya per-kWh untuk LWBP (Luar Waktu Beban Puncak) yaitu sebesar Rp 803,-/kWh

$$\begin{aligned} \text{Motor listrik 75 kW} &= 5 \text{ unit} \times 75 \text{ kW} \times 10 \text{ jam} \times 365 \text{ hari} \times \text{Rp } 803,-/\text{kWh} \\ &= \text{Rp } 1.099.106.250,- \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Motor listrik 37 kW} &= 8 \text{ unit} \times 37 \text{ kW} \times 10 \text{ jam} \times 365 \text{ hari} \times \text{Rp } 803,-/\text{kWh} \\ &= \text{Rp } 867.561.450,- \end{aligned}$$

$$\text{Jadi total pemakaian} = \text{Rp } 1.966.667.450,-$$

- Untuk total kVARh

Dikenakan biaya Rp 864,-/kVARh

$$\begin{aligned} \text{Motor listrik 75 kW} &= 5 \text{ unit} \times ((75 \text{ kW}/0,89) \times 0,45) \text{ kVA} \times 10 \text{ jam} \times 365 \text{ hari} \times \\ &\text{Rp } 864,- \\ &= \text{Rp } 611.226.652,- \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Motor listrik 37 kW} &= 8 \text{ unit} \times ((37 \text{ kW}/0,85) \times 0,53) \text{ kVA} \times 10 \text{ jam} \times 365 \text{ hari} \times \\ &\text{Rp } 864,- \end{aligned}$$

$$\text{Jadi totalnya} = \text{Rp } 582.037.750,-$$

- Untuk biaya daya tersambung

Dari lampiran 13 dapat diperoleh perhitungan besarnya Rekening Minimum golongan tarif 3 (RM 3) yaitu:

$$\begin{aligned} \text{RM 3} &= 40 \text{ (jam nyala)} \times 985 \text{ kVA (daya tersambung)} \times \text{Rp } 864,- \\ &\text{(LWBP)} \end{aligned}$$

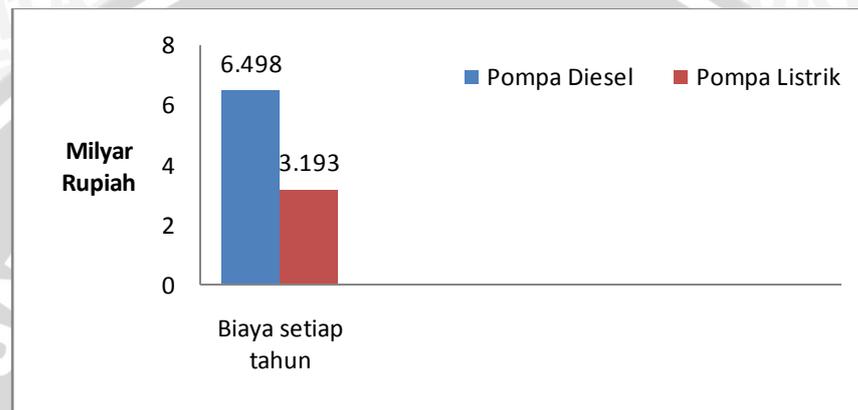
$$= \text{Rp } 34.041.600,-$$

- Sehingga total biaya yang harus dikeluarkan dari ketiga macam perhitungan di atas sebesar Rp 3.193.973.453,-

Dari pengeluaran biaya saat menggunakan mesin diesel dengan perkiraan saat menggunakan motor listrik didapatkan penghematan sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Penghematan} &= \text{Biaya mesin diesel} - \text{biaya pemakaian motor listrik} \\ &= (\text{Rp } 6.498.733.750,-) - (\text{Rp } 3.193.973.453,-) \\ &= \text{Rp } 3.304.760.297,- \end{aligned}$$

Jika ditampilkan dalam bentuk grafik maka akan terlihat sepertipada gambar 4.19 di bawah ini.



Gambar 4.19 Perbandingan biaya penggunaan mesin diesel dengan motor listrik

Bisa terlihat di grafik bahwa penggunaan motor listrik menggantikan mesin diesel mampu memberikan pengurangan dari pengeluaran setiap tahun hampir separuhnya. Hal ini tentu menandakan bahwa proyek modernisasi ini patut dilaksanakan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis perencanaan jaringan distribusi untuk suplai motor penggerak pompa air di lahan HGU PG Asembagoes, Situbondo maka dapat disimpulkan:

1. Jalur jaringan listrik alternatif ke-3 adalah yang paling efisien dibandingkan dengan kedua alternatif yang lain karena memiliki total jalur terpendek yaitu sebesar 6.185 km. Berdasarkan kondisi lapangan yang dihadapi pada jalur jaringan listrik alternatif ke-3, terdapat jenis tiang listrik berdasarkan fungsinya adalah 131 tiang penyangga, 4 tiang sudut dan 3 tiang awal / akhir. Perlengkapan tiang listrik yang dibutuhkan 14 buah *Guy Wire* (GW) dan 2 buah *Strut Pole* (SP).
2. Jatuh tegangan (%) dan rugi jaringan (VA) di perencanaan alternatif ke-1, ke-2, serta ke-3 berturut-turut adalah:
di bus 1 = 0; 0; 0 % dan 0; 0; 0 VA
di bus 2 = 0,36; 0,50; 0,43 % dan 110,6-69,86i; 155,80-98,33i; 132,27- 83,53i VA
di bus 3 = 0,44; 0,60; 0,49 % dan 135,54-85,57i; 188,72-119,08i; 137,69 -84,75i VA
di bus 4 = 0,60; 0,67; 0,53 % dan 126,95-73,54i; 166,65-100,77i; 142,90-85,86i VA
di bus 5 = 0,69; 0,70; 0,55 % dan 134,87-75,33i; 170,21-101,58i; 149,01-94,08i VA
di bus 6 = 0,76; 0,74, 0,60 % dan 146,01-77,69i; 175,27-102,6i; 185,44-117,06i VA
3. Biaya saat menggunakan mesin diesel selama satu tahun adalah Rp 6.498.733.750,- sedangkan biaya saat menggunakan motor listrik adalah Rp 3.193.973.453,-

5.2 Saran

1. Perencanaan di penelitian ini baru sebatas di jaringan distribusi tegangan menengah (JTM), sehingga masih bisa dibahas kembali mengenai jaringan tegangan rendahnya
2. Penempatan transformator bisa dikaji lagi menggunakan metode yang berbeda agar mengoptimalkan kinerja sistem
3. Perhitungan biaya bisa lebih didetailkan untuk mendapatkan proyeksi biaya yang semakin jelas

DAFTAR PUSTAKA

- ..., 1985. *SPLN 64 Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah*. Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi PLN
- ..., 2010. *Kriteria Disain Enjineriing Konstruksi Jaringan Dsistribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: PT PLN (Persero)
- ..., 2010. *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik*. Jakarta: PT PLN (Persero)
- ..., 2011. *Peraturan Menteri ESDM RI Nomor 9 Tahun 2011. Tentang Ketentuan Pelaksanaan Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh Perusahaan Perseroan (Persero)*. Jakarta: PT PLN (Persero)
- Gonen, Turan. 1986. *Modern Power System Analysis*. California: John Wiley & Sons
- Hadi, Abdul. 1991. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga
- Harten, P. Van. 1985. *Instalasi Listrik Arus Kuat 3: Rangkaian Motor, Tindakan Pengamanan, Soal-soal Ujian dan Praktikum*. Jakarta: Bina Cipta
- Kadir, Abdul. 2006. *Distribusi Dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press)
- Kusuma, Wijaya. 2008. *Optimalisasi Perencanaan Jaringan Tenaga Listrik Menggunakan Metode Successive Backward*. Malang: Jurnal Elektro Teknik Polinema Negeri Malang
- McDonald, JR and X. Wang, 1993. *Modern Power Sistem Planning*. London: McGraw-Hill
- Sawhney. A.K. 1990. *A Course in Electrical Machine Design*. Delhi: Dhanpat rai & son
- Smith, Ralph J. 1992. *Rangkaian Piranti dan Sistem*, Edisi keempat, Alih Bahasa oleh AdhiSusanto, M.Sc., Ph.D. Jakarta: Erlangga
- Stevenson. William D. Jr, 1993. *Analisis Sistem Tenaga*, Edisi keempat, Alih Bahasa oleh Ir. Kamal idris. Jakarta: Erlangga
- Suhadi & Wrahatnolo, Tri. 2008. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional

Lampiran 1 Tabel Hasil Perhitungan Working Load dan Pemilihan Tiang

Nama Tiang	Fungsi Tiang	Lebar (L)	Working Load (daN)	Jenis Kekuatan Tiang Yang Dipilih (daN)
T1	Tiang tarik awal (TM-4)	60.0444	86.6989	200 + GW
T2	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T3	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T4	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T5	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + 2GW
T6	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T7	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T8	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T9	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T10	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T11	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T12	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T13	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T14	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T15	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T16	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T17	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T18	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T19	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + GW
T20	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T21	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T22	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T23	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T24	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T25	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T26	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T27	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T28	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T29	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T30	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T31	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T32	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T33	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T34	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T35	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T36	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + GW
T37	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T38	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T39	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T40	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T41	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + SP

1	2	3	4	5
T42	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T43	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T44	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T45	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T46	Tiang percabangan (TM-8)	40.0667	57.8528	160 + GW
T47	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T48	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T49	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T50	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T51	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T52	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T53	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + GW
T54	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T55	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T56	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T57	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T58	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T59	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T60	Tiang sudut (TM-10)	45.0593	35.1203	160 + SP
T61	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T62	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T63	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T64	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T65	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T66	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T67	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T68	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T69	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T70	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T71	Tiang akhir (TM-4)	50.0530	72.2721	160 + GW
T72	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T73	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T74	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T75	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + GW
T76	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T77	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T78	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T79	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T80	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T81	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T82	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T83	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T84	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T85	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160

1	2	3	4	5
T86	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T87	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T88	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T89	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T90	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T91	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T92	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T93	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T94	Tiang sudut (TM-10)	45.0593	28.2756	160 + GW
T95	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T96	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T97	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T98	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T99	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T100	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T101	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T102	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T103	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T104	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T105	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T106	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T107	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T108	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T109	Tiang sudut (TM-10)	40.0667	18.0300	160 + GW
T110	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T111	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T112	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T113	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T114	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T115	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T116	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T117	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T118	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T119	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T120	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T121	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T122	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T123	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T124	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T125	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + GW
T126	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T127	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T128	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T129	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160

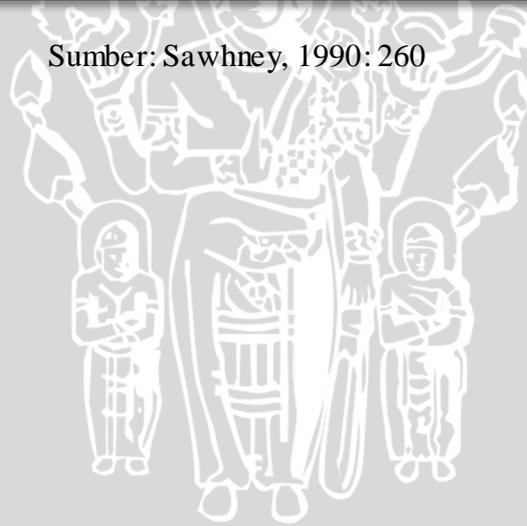
1	2	3	4	5
T130	Tiang penyangga ganda (TM-2)	50.0530	22.5237	160 + GW
T131	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T132	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T133	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T134	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T135	Tiang sudut (TM-10)	40.0667	18.0300	160 + GW
T136	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T137	Tiang penyangga (TM-1)	50.0530	22.5237	160
T138	Tiang akhir (TM-4)	50.0530	72.2721	160 + GW



Lampiran 2 Tabel Efisiensi Motor Listrik

Output kW	Efficiency		Power Factor	
	$p=4$	$p=8$	$p=4$	$p=8$
Squirrel Cage				
0.75	0.72	—	0.75	—
2.20	0.81	0.75	0.82	0.66
3.70	0.83	0.81	0.84	0.69
7.50	0.86	0.82	0.87	0.78
15.00	0.88	0.85	0.89	0.83
37.00	0.90	0.89	0.90	0.85
75.00	0.91	0.90	0.92	0.89
Slip Ring				
7.50	0.84	0.83	0.84	0.70
15.00	0.87	0.85	0.89	0.80
37.00	0.89	0.88	0.90	0.83
75.00	0.91	0.89	0.92	0.89

Sumber: Sawhney, 1990: 260



Lampiran 3 Tabel Karakteristik Penghantar Kabel Pilin Tegangan Rendah

Jenis kabel	Penampang nominal	KHA terus menerus	Penggunaan
1	2	3	4
NFA2X	3 x 25 + 25	103	Saluran Tegangan Rendah
	3 x 35 + 25	125	
	3 x 50 + 35	154	
	3 x 70 + 50	196	
	3 x 95 + 70	242	
	2 x 10 re	54	
	2 x 10 rm	54	
	2 x 16 rm	72	
	4 x 10 re	54	
	4 x 10 rm	54	
NFAY	4 x 16 rm	72	Saluran Tenaga Listrik
	4 x 25 rm	102	
	2 x 10 re	42	
	2 x 10 rm	42	
	2 x 16 rm	58	
	4 x 10 re	42	
4 x 10 rm	42		
4 x 16 rm	58		
4 x 25 rm	75		

Sumber: Kriteria Desain Enjinerig Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010: 13



Lampiran 4 Spesifikasi Kawat Penghantar tak Berisolasi

Luas Penampang Nominal (mm ²)	Cu	AAC	AAAC
16	125 A	110 A	105 A
25	175 A	145 A	135 A
35	200 A	180 A	170 A
50	250 A	225 A	210 A
70	310 A	270 A	155 A
95	390 A	340 A	320 A
150	510 A	455 A	425 A
240	700 A	625 A	585 A
300	800 A	710 A	670 A

Sumber: Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010: 11

Suhu keliling pada 35⁰ C, kecepatan angin 0,6 m/s dan suhu maksimum 80⁰ C

Penghantar telanjang (*BC: Bare Conductor*) merupakan konduktor dengan bahan utama tembaga (Cu) atau alluminium (Al) yang dipilin bulat padat. Pilihan konduktor penghantar telanjang yang memenuhi pada dekade ini adalah AAC (All Alluminium Conductor) atau AAAC (All Alluminium Alloy Conductor). Sebagai akibat tingginya harga tembaga dunia, saat ini belum memungkinkan penggunaan penghantar berbahan tembaga sebagai pilihan yang terbaik.



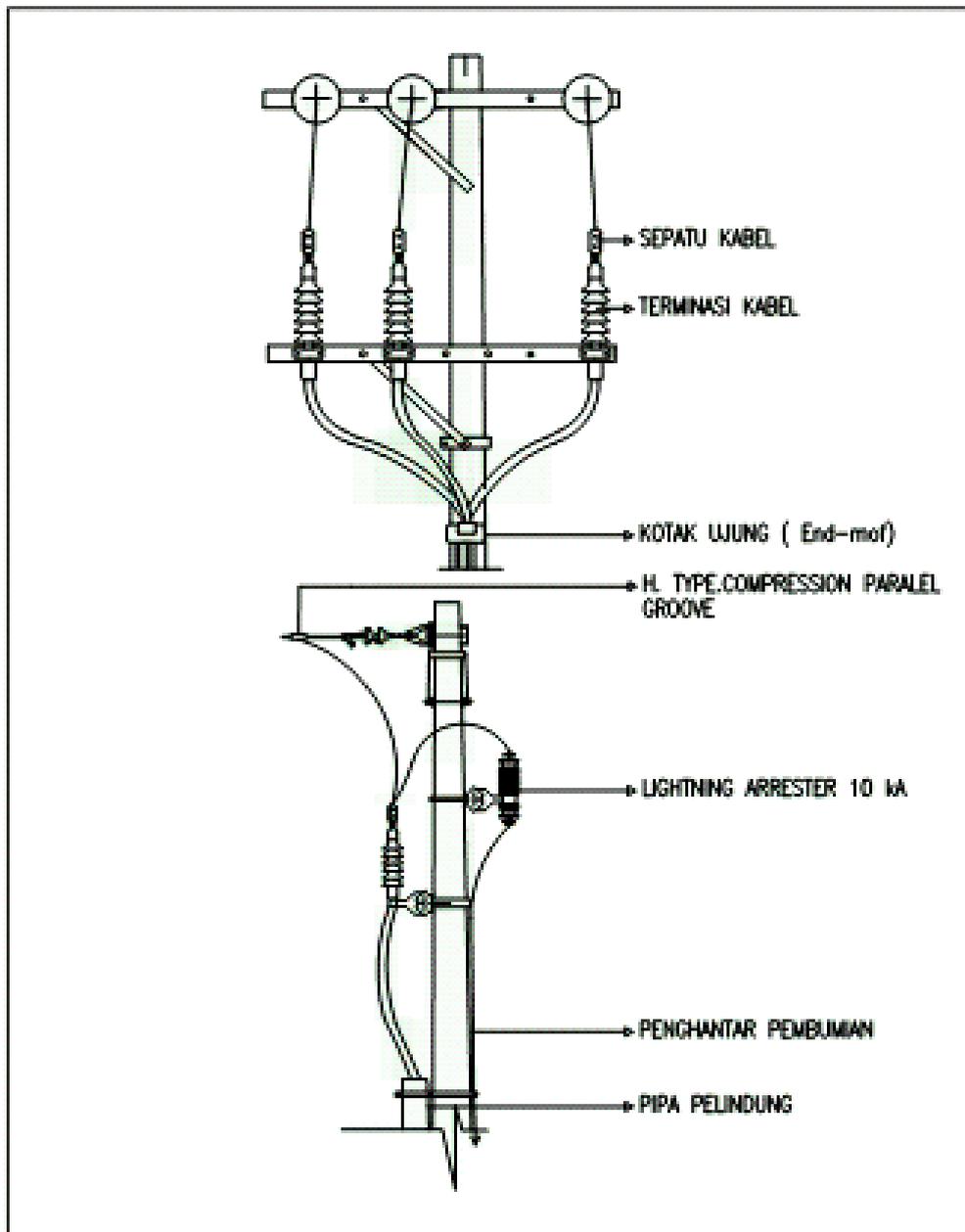
Lampiran 5 Spesifikasi Tiang Beton Bulat untuk SUTM

Panjang (m)	Tinggi titik Tumpu/batas tanam (m)	Diameter (cm)	Beban Kerja (daN)	Panjang (m)	Tinggi titik Tumpu/batas tanam (m)	Diameter (cm)	Beban Kerja (daN)
9	1,5	15,7	100	13	2,2	19	200
		15,7	200			19	350
		19	350			19	500
		19	500			22	800
		22	800			22	1200
		22	1200			22	1200
11	1,9	19	200	14	2,4	19	200
		19	350			19	350
		19	500			19	500
		22	800			22	800
		22	1200			22	1200
12	2,0	19	200				
		19	350				
		19	500				
		22	800				
		22	1200				

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 8



Lampiran 6 Konstruksi Tiang Awal

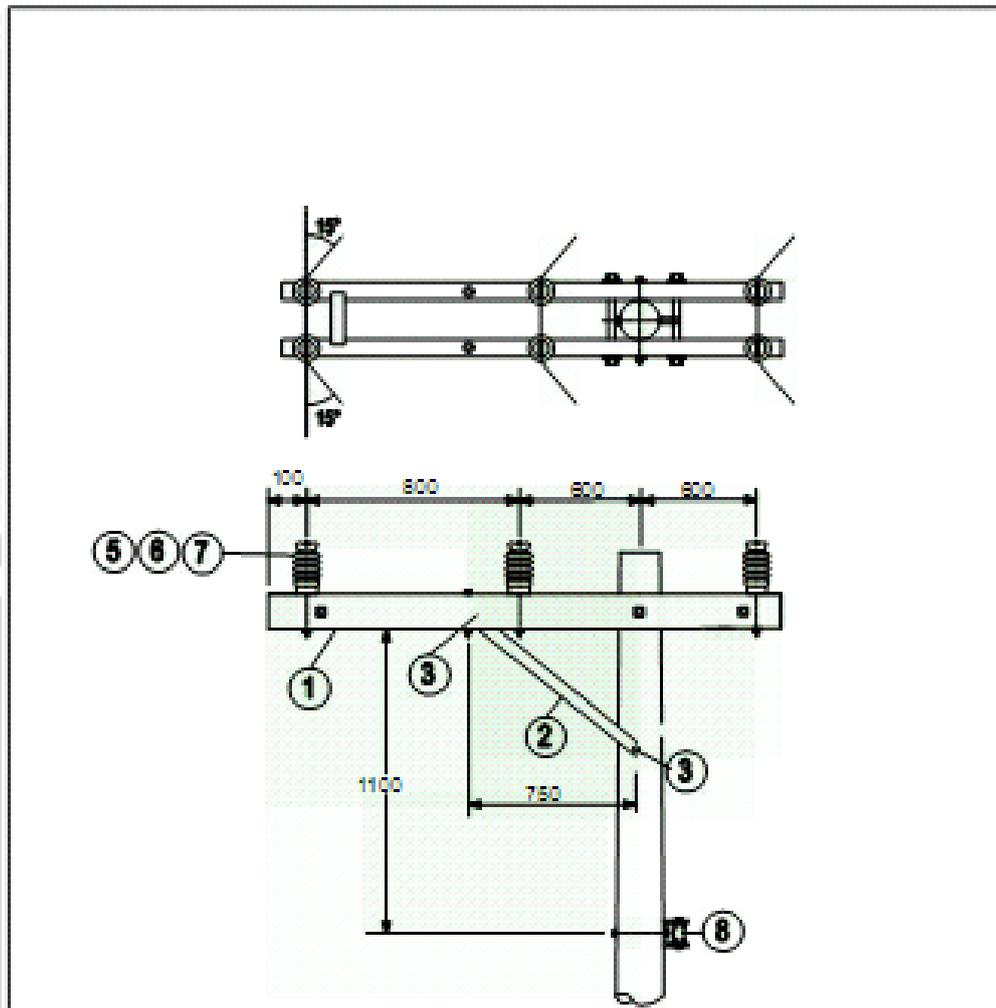


Catatan.: Terminasi (Kotak Ujung) kabel mengikuti perkembangan teknologinya.

	PT. PLN (PERSERO)		FOTO
	MONOGRAM TIANG AWAL (RISER POLE)		
GAMBAR FOTOKOPI DIREKTORAT JENJANG DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI	No. GAMBAR / JUDUL GAMBAR 1 / 25	2010 25

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 26

Lampiran 7 Konstruksi Tiang Penumpu Sudut Kecil



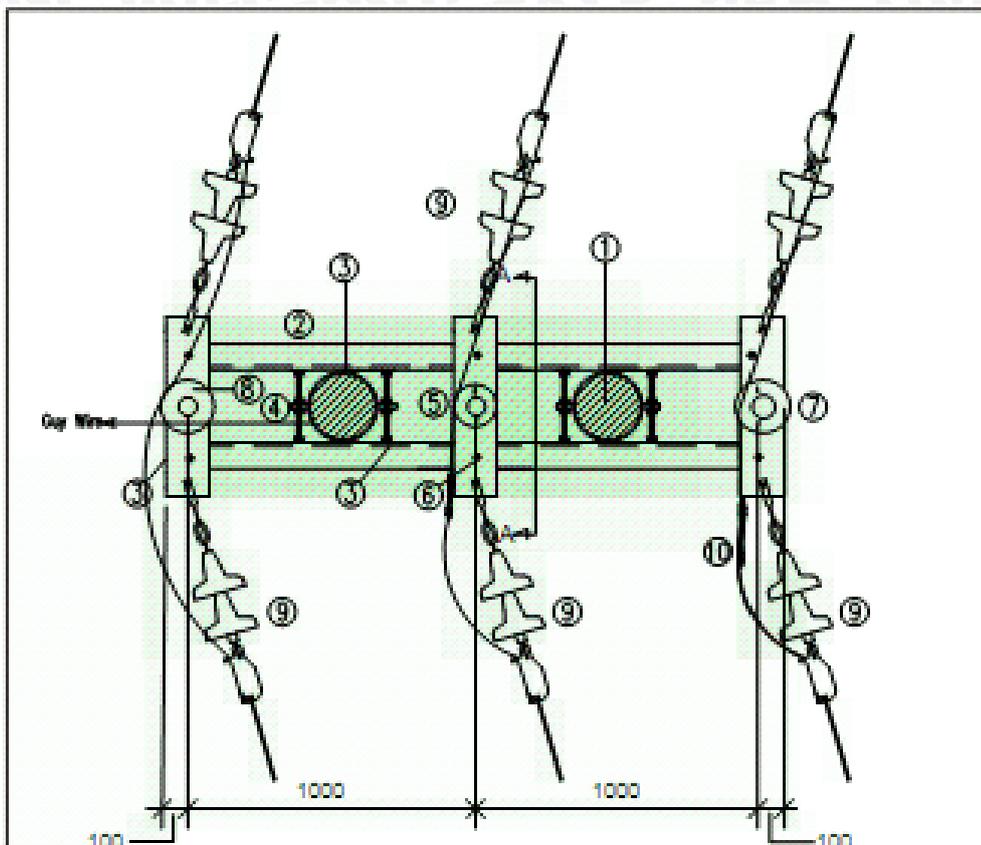
NO	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	SATUAN	JUMLAH
1		Cross Arm UNP 10 x 2200	Bh	2
2		Arm Brace LNP 8 x 80	Bh	2
3		Bolt Nu Double Arm m. 15	Set	2
4		Isolator Tumpu	Bh	2
5		Banding Wire	M	5
6		Preformed Tie	Bh	6
7		Aluminium Tape 4 mm ²	M	-
8		Insulator Anal 52-2	Bh	1

	PT. PLN (PERSERO)		FOTO
	KONSTRUKSI TIANG PENUMPU SUDUT KECIL DENGAN ATAU TANPA PENGHANTAR NETRAL TM/TR		
DISAMBAH PERITIK KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI (K, B, J)	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI		No. DISAMBAH JTM/BLT/1001 EDITION 1 2010 58

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 26



Lampiran 8 Konstruksi Tiang Sudut Dengan Sudut Lintasan 30⁰-80⁰



RUBUK ATAS

Catatan :

Konstruksi dipertimbangkan tiang tunggal dengan kekuatan 3000kN atau 3000kN ditambah toping lengk

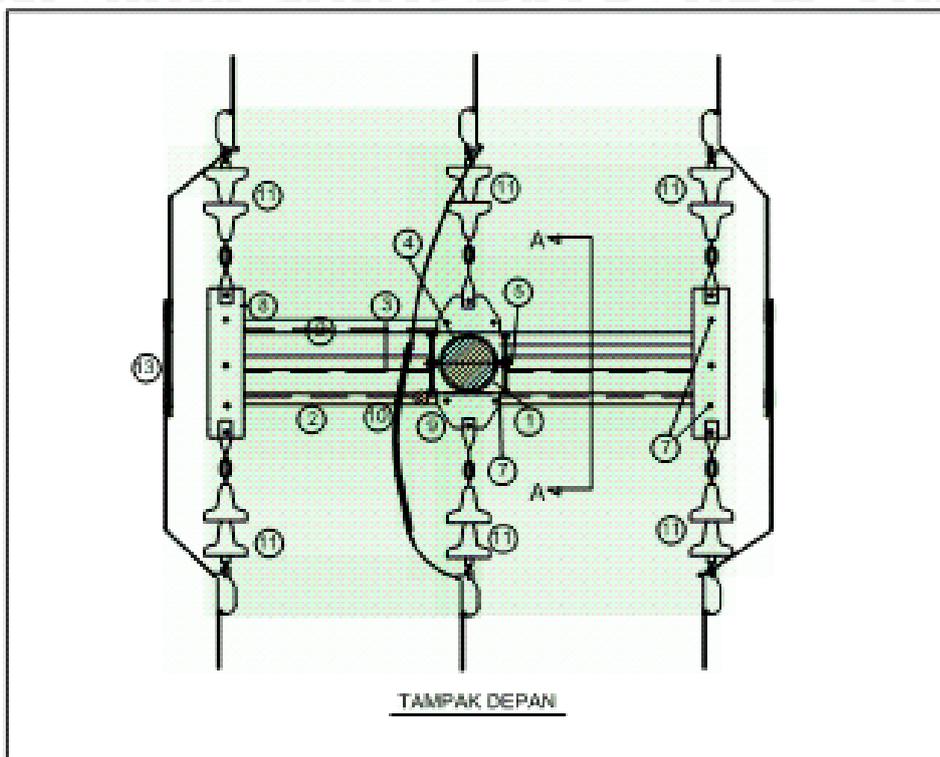
NO	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	SATUAN	KEBUTUHAN
1	80000000...	Tiang beton balok	Batang	2
2	8000040000	Cross arm LUMP 100 x 2000 mm	Buah	2
3	80000401...	Klem bengkal tiang beton balok	Buah	4
4	8000040000	Double ending bolt M12 x 200 mm	Buah	4
5	8000040...	Steel plate	Buah	0
6	8000040040	Mer baut-spring weather M12 x 140mm	Buah	0
7	8000070007	Insulator tanpa type post	Bul	0
8	8000040...	Preformed Ties / Standing Wire	Buah - m	3-0
9	8000070004	Insulator lengk	Bul	0
10	8000001177	Parallel groundan tahanan joint	Buah	0

	PT. PLN (PERSERO)		FOTO
	KONSTRUKSI TIANG SUDUT DENGAN SUDUT LINTASAN 30° - 80°		
DISAMBAH PAKET I DISAMBAH I DAN DISAMBAH II, III, IV	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI		No. DISAMBAH LTM BUKU 1000 1 2010 02

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 62



Lampiran 9 Konstruksi Tiang Peregang/Penopang



Keterangan :

•Beban kerja dang sekurang-kurangnya sama dengan beban kerja dang 11 m - 500 daN atau liang 11 m - 350 daN dengan konstruksi 2 guy wire

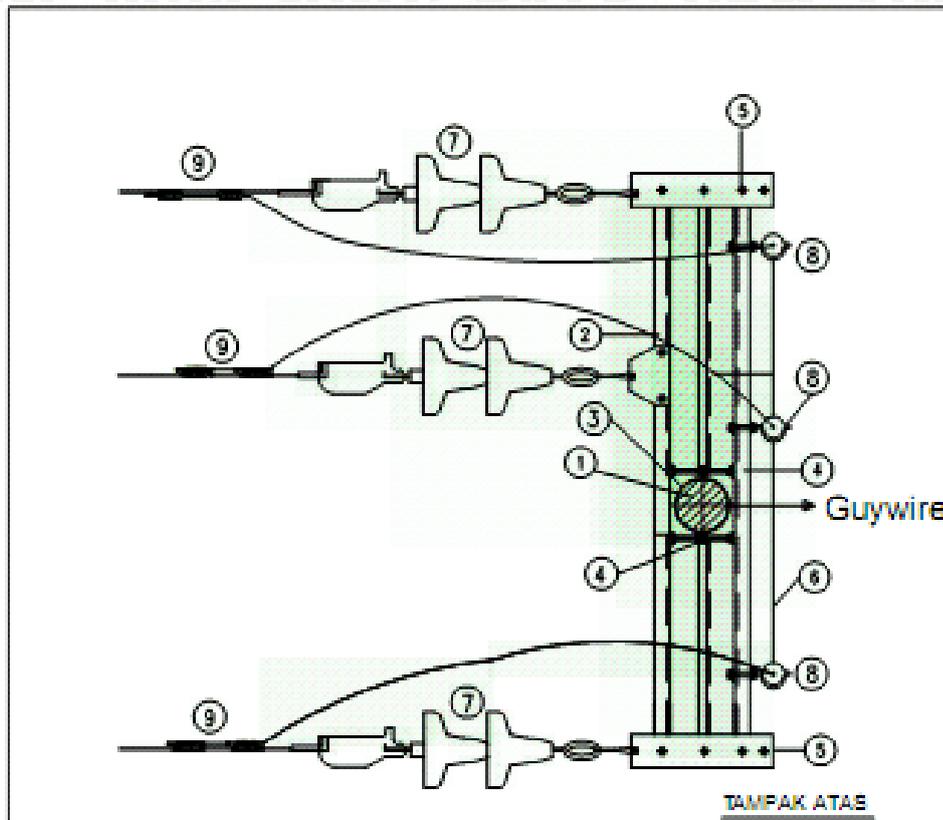
NO	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	SATUAN	JUMLAH
1	00030300...	Tiang Beton Bulat 500 daN	Batang	1
2	0003040328	Cross Arm URIP.10 x 2000 mm	Buah	2
3	0003040324	Arm tie brace 50.50x1270 mm	Buah	2
4	00030401...	Klem beugel 50,5 mm	Buah	4
5	0003040063	Double arming 5/8"x300 mm	Buah	2
6	00030401...	Klem beugel liang beton bulat	Buah	4
7	0003040045...	Mur baut dan ring 5/8"x148 mm	Buah	10
8	0003040...	Steel plat	Buah	4
9	0003040...	Steel plat	Buah	4
10	0003070007	Isolator tumpu type post	Set	1
11	0003070010	Isolator penegang/kepang liang rod	Set	11
12	0003040...	Preformed top ties / Bending wire 8"10	Buah / m	1 / 2 m
13	0003280177	Parallel groove/iron tension plate	Buah	6

	PT. PLN (PERSERO)	FOTO
	KONSTRUKSI TIANG PEREGANG	
DEPARTEMEN TRANSMISI DAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI	No. STANDAR / TITIK BANGUNAN ICDR 1 2010 02

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 65



Lampiran 10 Konstruksi Tiang Akhir



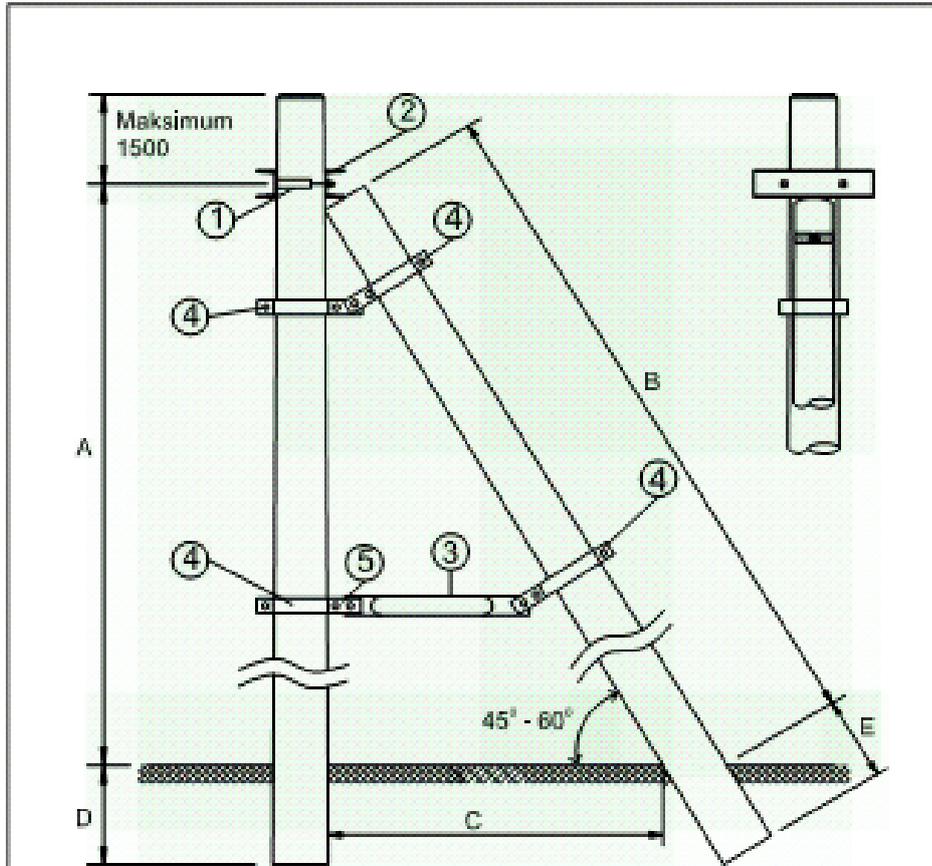
NO	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	SATUAN	KEBUTUHAN
1	00000001	Tiang beton bertulang	Batang	2
2	00000002	Cross arm (LPP) 30 x 300 mm	Buah	2
3	00000003	Klem tangkai tangkai beton bertulang	Buah	4
4	00000004	Double ending (LPP) 30 x 300 mm	Buah	4
5	00000005	Weld plate	Buah	4
6	00000006	HC - 40 mm ²	Buah	6
7	00000007	Isolator (LPP) Long Pad / Elco	Buah	3 x 6
8	0004000002	Arrester 20 kV 10 kA + Pasokan	Set	2
9	0000000177	Pasokan ground system	Buah	6

	PT. PLN (PERSERO)		FOTO
	KONSTRUKSI TIANG AKHIR FASA-3 DENGAN FASILITAS KAWAT TANAH TANPA LIGHTNING ARRESTER		
	DEPARTEMEN PT. PLN DIREKTORAT JENJANG DISTRIBUSI (D.10.10)	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI	

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 70



Lampiran 11 Konstruksi Penopang Tiang (Strut Pole)

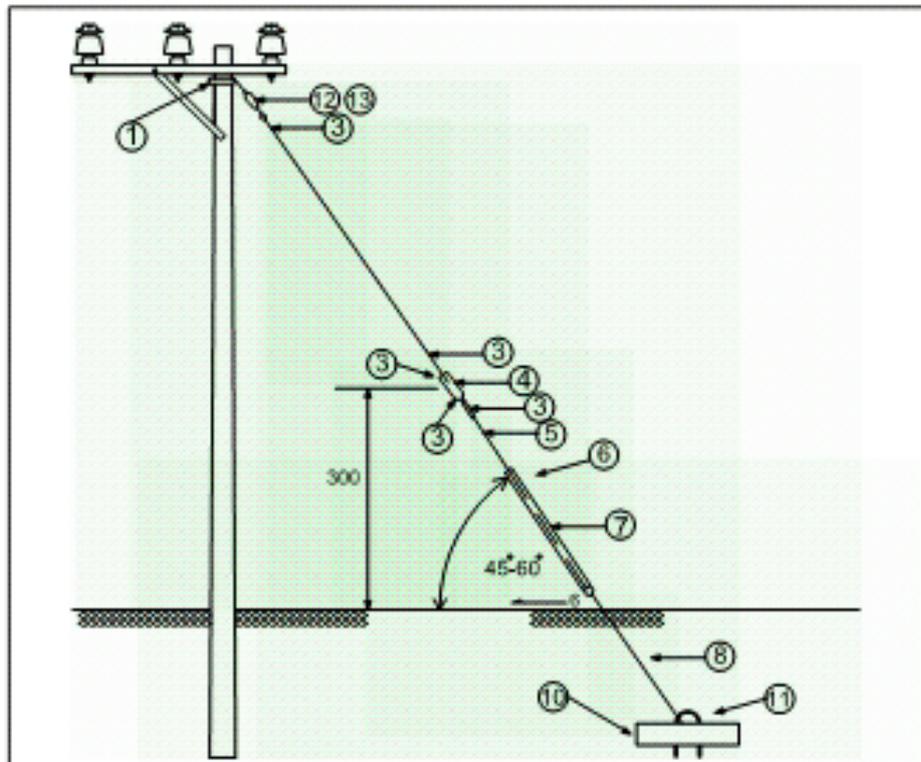


NO	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	SATUAN	JUMLAH			
1		Single Arm Band & Nut M16 + Washer	Set	1			
2		Strut Arm UNP. 8 x 300	Pcs	1			
3		Strut Tie 1200 xid 1500	Pcs	1			
4		Double Pole Band + Bolt & Nut M 16 X 50	Set	4			
5		Bolt & Nut M 16 X 140 + 16 X50	Set	11			
NO	TYPE TIANG BESI		SATUAN DALAM METER				
	UTAMA	STRUT POLE	A	B	C	D	E
1	13	11	8,4	10	6,42	1,53	1
2	11	9	7,7	8,4	3,3	1,53	0,5
3	9	9	6,75	8	4,2	1,5	1
4	7	7	5,3	8,5	3,7	1,18	0,5

	PT PLN (PERSERO) KONSTRUKSI PENOPANG TIANG (STRUT POLE)		ROTO
	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI	NO. 1	

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 73

Lampiran 12 Konstruksi Topang Tarik/ Guy Wire



Keterangan : • Konstruksi topang tarik (Guy Wire) jika komponen no 3 di pakal, tidak perlu memakai komponen no. 6

NO	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	SATUAN	JUMLAH	
				TM	TR
1		Guy Wire Band + Bol & Nut M16 X 50	Set	1	1
2		Terminating Thimble	Pcs	1	-
3		Preformed Gri 22/35/70	Pcs	4	2
4		Guy Insulator	Pcs	1	-
5		Galv Steel Stranded Wire 22/35/70 Sqmm	Mtr	X	X
6		Wire Clep	Pcs	1	1
7		Pipa Pelindung 3/4"-2Mtr	Pcs	1	1
		-	Pcs	-	-
8		Guy Rod 2.5 / 1.8 Mtr	Pcs	1	1
9		U Bolt & Nut M16	Pcs	1	1
10		Anchor Block 400 X 400 mm/Espending Anchor	Pcs	1	1
		Turn Buckle 5/8"	Pcs	-	1
12		Turn Buckle 3/4"	Pcs	1	-

	PT. PLN (PERSERO) KONSTRUKSI TOPANG TARIK / GUY WIRE PADA TIANG BETON BULAT		FOTO
	STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN DISTRIBUSI	No. GAMBAR / JUDUL GAMBAR	

Sumber: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010: 73

Lampiran 13 Tarif Dasar Listrik

NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		PRA BAYAR (Rp/kWh)
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) DAN BIAYA kVArh (Rp/kVArh)	
1.	I-1/TR	450 VA	26.000	Blok I : 0 s.d. 30 kWh : 160 Blok II : di atas 30 kWh : 395	485
2.	I-1/TR	900 VA	31.500	Blok I : 0 s.d. 72 kWh : 315 Blok II : di atas 72 kWh : 405	600
3.	I-1/TR	1.300 VA	*)	930	930
4.	I-1/TR	2.200 VA	*)	960	960
5.	I-1/TR	3.500 VA s.d. 14 kVA	*)	1.112	1.112
6.	I-2/TR	di atas 14 kVA s.d. 200 kVA	**)	Blok WBP = $K \times 972$ Blok LWBP = 972 kVArh = 1.057****)	-
7.	I-3/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = $K \times 803$ Blok LWBP = 803 kVArh = 864 ****)	-
8.	I-4/TT	30.000 kVA ke atas	***)	Blok WBP dan LWBP = 723 kVArh = 723 ****)	-

Catatan :

*) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 $RM1 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian.}$

***) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 $RM2 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian LWBP.}$

****) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 $RM3 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian WBP dan LWBP.}$
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.

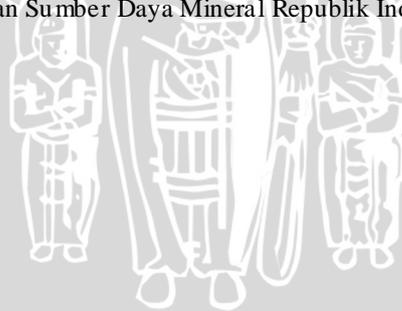
*****) Biaya kelebihan pemakaian daya reaktif (kVArh) dikenakan dalam hal faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,85 (delapan puluh lima per seratus).

K : Faktor perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem kelistrikan setempat ($1,4 \leq K \leq 2$), ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara.

WBP : Waktu Beban Puncak.

LWBP : Luar Waktu Beban Puncak.

Sumber: Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2012



Lampiran 14 Source Code Perencanaan dengan Successive Backward

```
%Perencanaan Jalur Jaringan Listrik Alternatif ke-1
```

```
%impedansi perkm
```

```
zperkm=0.9217+0.3790i;
```

```
% panjang jaringan
```

```
r1= 3.077;
```

```
r2= 3.62;
```

```
r3= 2.61;
```

```
r4= 1.008;
```

```
r5= 1.65;
```

```
r6= 1.37;
```

```
r7= 4.5;
```

```
r8= 4.1;
```

```
L=[r1;r2;r3;r4;r5;r6;r7;r8];
```

```
% daya beban
```

```
S1= 112+61.834i;
```

```
S2= 187+100.598i;
```

```
S3= 112+61.834i;
```

```
S4= 111+69.21i;
```

```
S5= 160.475+92.059i;
```

```
Smatrik=[-S1;-S2;-S3;-S3;-S4;-S5];
```

```
S=Smatrik(2:5,:);
```

```
% matrik impedansi
```

```
z1= r1*zperkm;
```

```
z2= r2*zperkm;
```

```
z3= r3*zperkm;
```

```
z4= r4*zperkm;
```

```
z5= r5*zperkm;
```

```
z6= r6*zperkm;
```

```
z7= r7*zperkm;
```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



```

z8= r8*zperkm;
Z=[z1;z2;z3;z4;z5;z6;z7;z8];
Aprimitif=[
1 -1 0 0 0
1 0 -1 0 0
0 1 -1 0 0
0 0 1 -1 0
0 0 1 0 -1
0 0 0 1 -1
0 1 0 0 -1
1 0 0 -1 0];
A=Aprimitif(:,2:5);
Y=diag(inv(diag(Z)));
Ybus=A'*diag(Y)*A;
Zbus=inv(Ybus);
% sudut vector (teta)
teta=abs(Zbus*S);
% Hitung daya yang mengalir( Branch Flow)
fluk=A*teta;
BL=inv(diag(Z));
PL=(BL*fluk);
% Hitung indeks keefektifan (E)
kuadratL=diag(L)*L;
E=diag(abs(PL))*diag(inv(diag(kuadratL)));
%%%%%%%%%% HAPUS CABANG 3 (NODE 2-3) %%%%%%%%%%%
H3=(1.5524 + 0.6383i)+(1.3586 + 0.5586i)-2*(0.8398 + 0.3453i);
B3=-1/(z3+H3);
% Modifikasi teta karena hapus cabang 3
e3T=[1 -1 0 0];
teta3=abs(teta+(B3*Zbus*transpose(e3T)*e3T*teta));
% tes diskoneksi

```



D3=H3-z3;

% Mencari Branch Flow baru karena hapus cabang 3

fluk3=A*teta3;

BL3=diag([0.3016 - 0.1240i;0.2564 - 0.1054i;-(0.3556 - 0.1462i);0.9207 - 0.3786i;0.5624 - 0.2313i;0.6774 - 0.2785i;0.2062 - 0.0848i;0.2264 - 0.0931i]);

PL3=BL3*fluk3;

% Modifikasi Zbus karena penghapusan cabang 3

Zbus3=Zbus+(B3*Zbus*transpose(e3T)*e3T*Zbus);

% Mencari indeks keefektifan karena penghapusan cabang

E3=diag(abs(PL3))*diag(inv(diag(kuadratL)));

%%%%%% HAPUS CABANG 7 (NODE 2-5) %%%%%%%%%%

H7=(1.4128 + 0.5809i)+(1.7404 + 0.7156i)-2*(0.9566 + 0.3933i);

B7=-1/(z7+H7);

% Modifikasi teta karena hapus cabang 7

e7T=[1 0 0 -1];

teta7=abs(teta3+(B7*Zbus3*transpose(e7T)*e7T*teta3));

% tes diskoneksi

D7=H7-z7;

% Mencari Branch Flow baru karena hapus cabang 7

fluk7=A*teta7;

BL7=diag([0.3016 - 0.1240i;0.2564 - 0.1054i;-(0.3556 - 0.1462i);0.9207 - 0.3786i;0.5624 - 0.2313i;0.6774 - 0.2785i;-(0.2062 - 0.0848i);0.2264 - 0.0931i]);

PL7=BL7*fluk7;

% Modifikasi Zbus karena penghapusan cabang 7

Zbus7=Zbus3+(B7*Zbus3*transpose(e7T)*e7T*Zbus3);

% Mencari indeks keefektifan karena penghapusan cabang

E7=diag(abs(PL7))*diag(inv(diag(kuadratL)));

%%%%%% HAPUS CABANG 8 (NODE 1-4) %%%%%%%%%%

H8=1.4332 + 0.5893i ;

B8=-1/(z8+H8);

% Modifikasi teta karena hapus cabang 8

e8T=[0 0 -1 0];

```

teta8=abs(teta7+(B8*Zbus7*transpose(e8T)*e8T*teta7));
% tes diskoneksi
D8=H8-z8;
% Mencari Branch Flow baru karena hapus cabang 8
fluk8=A*teta8;
BL8=diag([0.3016 - 0.1240i;0.2564 - 0.1054i;-(0.3556 - 0.1462i);0.9207 - 0.3786i;0.5624 -
0.2313i;0.6774 - 0.2785i;-(0.2062 - 0.0848i);-(0.2264 - 0.0931i)];
PL8=BL8*fluk8;
% Modifikasi Zbus karena penghapusan cabang 8
Zbus8=Zbus7+(B8*Zbus7*transpose(e8T)*e8T*Zbus7);
% Mencari indeks keefektifan karena penghapusan cabang
E8=diag(abs(PL8))*diag(inv(diag(kuadratL)));
%%%%%%%%% HAPUS CABANG 5 (NODE 3-5) %%%%%%%%%%%
H5=(1.0638 + 0.4374i)+(1.3671 + 0.5621i)-2*(0.8714 + 0.3583i);
B5=-1/(z5+H5);
% Modifikasi teta karena hapus cabang 5
e5T=[0 0 1 -1];
teta5=abs(teta8+(B5*Zbus8*transpose(e5T)*e5T*teta8));
% tes diskoneksi
D5=H5-z5;
% Mencari Branch Flow baru karena hapus cabang 5
fluk5=A*teta5;
BL5=diag([0.3016 - 0.1240i;0.2564 - 0.1054i;-(0.3556 - 0.1462i);0.9207 - 0.3786i;-(0.5624 -
0.2313i);0.6774 - 0.2785i;-(0.2062 - 0.0848i);-(0.2264 - 0.0931i)];
PL5=BL5*fluk5;
% Modifikasi Zbus karena penghapusan cabang 5
Zbus5=Zbus8+(B5*Zbus8*transpose(e5T)*e5T*Zbus8);
% Mencari indeks keefektifan karena penghapusan cabang 5
E5=diag(abs(PL5))*diag(inv(diag(kuadratL)));

```

Lampiran 15 Source Code Analisis Jaringan

```

% Besaran dasar
zperkm=0.9217+0.3790i;
Ebase=20000;
Sbase=100000;
Zbase=Ebase^2/Sbase;
% Panjang antar bus
r1=1.65;
r2=1.358;
r3=2.041;
r4=0.991;
r5=1.363;
% Impedansi Z
z1= r1*zperkm;
z2= r2*zperkm;
z3= r3*zperkm;
z4= r4*zperkm;
z5= r5*zperkm;
Z=[z1;z2;z3;z4;z5];
Z=Z/Zbase;
% Admitansi Y
Y=diag(inv(diag(Z)));
% Matrik Ybus%
A= [1 -1 0 0 0
    0 1 -1 0 0
    0 1 0 -1 0
    0 0 1 -1 0
    0 0 0 1 -1
    ];
Ybus=A'*diag(Y)*A;

```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



```

% Impedansi Zbus
Zbus=inv(Ybus(2:6,2:6));
% Estimasi tegangan awal untuk tiap Bus
E =[1;1;1;1;1;1];
Ebus =E(2:6,:);
% Matrik S berdasarkan data beban %
S1=0;
S2=(-112-61.834i)*10^3;
S3=(-187-100.598i)*10^3;
S4=(-112-61.834i)*10^3;
S5=(-111-69.21i)*10^3;
S6=(-160.475-92.059i)*10^3;
Sbus=[S1;S2;S3;S4;S5;S6];
Sbus=Sbus/Sbase;
% perhitungan iterasi %
epsilon=0.0001;
x=1;
iter=0;
disp('          ANALISIS ALIRAN DAYA ALTERNATIF KE-1,2 dan 3  ')
disp('          NILAI TEGANGAN HASIL ITERASI                ')
disp('          E2      |      E3      |      E4      |      E5      |      E6      ')
while x>=epsilon
iter= iter+1;
Ibus=inv(diag(conj(Ebus)))*conj(Sbus(2:6,:));
Ebusnew=[1;1;1;1;1]+Zbus*Ibus;
Ibus=inv(diag(conj(Ebusnew)))*conj(Sbus(2:6,:));
% mencari nilai error %
x=(abs(Ebus-Ebusnew));
Ebus=Ebusnew;
fprintf ('%i', iter), disp([ Ebus(1,1), Ebus(2,1), Ebus(3,1), Ebus(4,1), Ebus(5,1)]*Ebase)
end

```

```
%tegangn semua bus
E=( [Ebus(1,1), Ebus(2,1), Ebus(3,1), Ebus(4,1), Ebus(5,1)]*Ebase);
Ebus= inv(conj(diag(E)));
besar_E= abs(E)
angle_E= angle(E);
sudut_E= (180*angle(E))/3.14;
% mencari rugi rugi
Isal=(A(1:5,2:6))*Ibus;
Isalkuadrat=diag(Isal)*Isal;
Prugi=(Zbus*Isalkuadrat)*Sbase
```

