



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***STATE ESTIMATION PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL PASIF
MENGUNAKAN TEORI HAMILTONIAN CYCLE BERBASIS
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)***

Sabila Bagus Panuntun
NRP 0711144000042

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum B.P., S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***STATE ESTIMATION PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL
PASIF MENGGUNAKAN TEORI HAMILTONIAN CYCLE
BERBASIS GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)***

Sabila Bagus Panuntun
NRP 0711144000042

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum B.P., S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**STATE ESTIMATION IN PASSIVE RADIAL DISTRIBUTION
SYSTEM USING HAMILTONIAN CYCLE THEORY BASED ON
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)**

Sabila Bagus Panuntun
NRP 0711144000042

Supervisors
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum B.P., S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "*State Estimation pada Sistem Distribusi Radial Pasif Menggunakan Teori Hamiltonian Cycle Berbasis Geographic Information System (GIS)*" adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



Sabila Bagus Panuntun
07111440000042

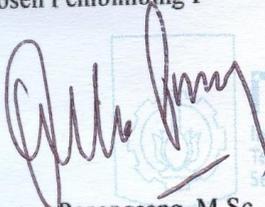
**STATE ESTIMATION PADA SISTEM DISTRIBUSI
RADIAL PASIF MENGGUNAKAN TEORI HAMILTONIAN CYCLE
BERBASIS GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



19/7/2018

Vita Lystianingrum B.P., S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198208292006042001



State Estimation pada Sistem Distribusi Radial Pasif Menggunakan Teori Hamiltonian Cycle Berbasis Geographic Information System (GIS)

Nama Mahasiswa : Sabila Bagus Panuntun
NRP : 0711144000042
Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP : 194907151974121001
Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum B.P. , S.T., M.Sc., Ph.D
NIP : 198208292006042001

Abstrak :

Jumlah penduduk Indonesia setiap tahunnya meningkat. Hal ini berpengaruh pada peningkatan jumlah konsumen listrik. Akibatnya, jaringan pada sistem distribusi akan semakin kompleks. Jaringan yang kompleks membutuhkan sistem *online monitoring* yang valid dan baik agar sistem dapat dipantau kondisi jaringannya. Salah satu komponen penting dalam *online monitoring* adalah sensor pengukuran, dan dibutuhkan sensor dalam jumlah banyak pada setiap bus atau trafo untuk *monitoring* yang valid dan baik. Akan tetapi, biaya pengadaan sensor tidak murah serta mahalnya biaya perawatan menjadi sesuatu yang perlu dipertimbangkan. Untuk mengatasi masalah tersebut, dapat digunakan *state estimation*, sebuah proses perhitungan yang bertujuan untuk mengestimasi nilai variabel yang tidak diketahui pada bus atau trafo dengan cara membandingkan hasil pembacaan pengukuran yang sudah diketahui. Dengan *state estimation*, biaya pengeluaran dapat diminimalisir, karena hanya menggunakan sebagian sensor untuk mendapatkan hasil *load flow* yang sama apabila sensor dipasang di seluruh bus. Maka dari itu pada tugas akhir ini dilakukan *state estimation* pada sistem distribusi menggunakan teori *Hamiltonian Cycle* berbasis *Geographic Information System (GIS)*. Hasil simulasi menunjukkan keberhasilan pada metode ini untuk mengestimasi tegangan dan daya suatu sistem distribusi radial pasif, dan jumlah sensor dapat dikurangi sekitar 39,29% dari total PMU terpasang, jika dipasang di seluruh bus.

Kata Kunci : *State Estimation, Hamiltonian Cycle, Geographical Information System (GIS)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

State Estimation in Passive Radial Distribution System Using Hamiltonian Cycle Theory Based on Geographic Information System (GIS)

Name : Sabila Bagus Panuntun
NRP : 0711144000042
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP : 194907151974121001
Supervisor II : Vita Lystianingrum B.P. , S.T., M.Sc., Ph.D
NIP : 198208292006042001

Abstract:

The constant increase in Indonesian population caused an increase in electricity consumption. Thus, inflicted complexity in distribution system network. Complex network requires a valid and fair online monitoring and analysis system to allow network maintenance. One of the most important component in online monitoring is measurement sensor. It demands quite a lot of sensor for each bus or transformer to yield a valid and fair monitoring. However, high investment and maintenance cost must be taken in to consideration. To resolve the matter, state estimation—a calculation process to estimate unknown variable in bus or transformer using acquired measurement reading result comparison—can be used. Using state estimation, expenses can be minimized, as it demands less sensor to obtain the same load flow result that sensor installed in each bus. Therefore, this research conducts state estimation on distribution system using Hamiltonian Cycle Theory based on Geographic Information System. The simulation result shows success for this method to estimate the power of a passive radial distribution system, and the number of sensor can be reduced up to 39,29% from total installed PMU.

Kata Kunci : *State Estimation, Hamiltonian Cycle, Geographical Information System (GIS)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“State Estimation pada Sistem Distribusi Radial Pasif Menggunakan Teori Hamiltonian Cycle Berbasis Geographic Information System (GIS)”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Kedua orangtua, Ayah, Ibu dan kakak penulis di Kebumen yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat serta doa kepada Penulis.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M. Sc, PhD dan Vita Lystianingrum B.P., S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Adi Soeprijanto, Dr. Rony Seto W., Dr. Dimas Fajar Uman P dan Ibu Dr. Ni Ketut Aryani serta member lab PSSSL yang telah menciptakan dan memberikan dukungan, penjelasan dalam menyelesaikan tugas akhir.
5. Bapak Suyanto dan Mbak Indri yang telah memberikan banyak bimbingan dan arahan dengan diskusi sejak awal pengajuan tugas akhir ini hingga selesainya tugas akhir ini.
6. Sobat Pejuang 118 Aden, Fikri, Konci, Ori, Esa, Rinthon, Mila, dan Amik yang selalu kebersamai dalam perjuangan menuju 118, saling mengingatkan, bekerjasama dan berdiskusi bila terdapat masalah.
7. Mas Mbak alumni asisten PSSSL, Mas Febri dan Mas Indrawan, selaku Ex-pengambil TA GIS, memberikan wejangan dan arahnya, Mas Habibur, Mas Aji, Mas Gilang, Mas Bagus, Mas Tufi, Mbak Dinda, Mbak Fio, dan Mbak Ica yang selalu mengingatkan TA agar selalu dikerjakan, memberikan dukungan, semangat dan doa
8. Nanang, Arba, Baihaqi, Elva, Totek, Fira, Keke, Cece, Saad, Hotang, Trainee angkatan 2015 dan trainee angkatan 2016,

yohan, veryl, jojo, farida, taufik, aldy, hari, vito, bariq yang merupakan sobat perjuangan PSSSL 2017 – 2018

9. Seluruh teman-teman e54, terima kasih atas dukungan dan doa yang diberikan, kekeluargaan, kebersamaan, canda dan tawa akan selalu teringat.
10. Bapak Ibu Dosen dan Karyawan Teknik Elektro ITS yang telah berjasa selama empat tahun membantu penulis selama kuliah dan telah memberikan banyak ilmu serta pengalaman yang bermanfaat.
11. Teman-teman *LBE team dan GIS* yang menjadi partner diskusi dan bimbingan selama penyelesaian tugas akhir ini.
12. Pasukan Poyo Hijau, terkhusus Nissa, Saili, Vero, Bagas, Titus, Nash, yang selalu mendukung dan mendoakan serta berbagi cerita, belajar, recheh bersama sehingga kebersamaan dan kekeluargaan dalam Keditjenan LH BEM ITS tercipta.
13. Sobat recheh Sosmas BEM ITS, Mbak Ipeh, Mas Bayu, Mas Doni, Rizal, Anam, Irma, Witri Diaz, Rere, Fara, Sectio, Raissa, Alfi, Zahid, Bayu, Yufa, Barel dan staff magang yang selalu menyempatkan waktu untuk sejenak berbagi rasa dan cerita, mendukung dan mendoakan. Kebersamaan dengan teman-teman akan terkenang sepanjang masa
14. Teman-teman dari Perhimak ITS, yang telah membantu dan memberi dukungan materil maupun non materil dari awal maba sampai sekarang.
15. Seluruh teman-teman yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberi semangat dan membuat cerita bersama penulis selama ini.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN **1**

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **7**

2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	8
2.2.1 Sistem Radial.....	8
2.2.2 Sistem Loop.....	9
2.2.3 Sistem Jaring-Jaring (NET).....	10
2.2.4 Sistem Spindle	11
2.2 Analisis Aliran Daya.....	12
2.3 Sistem Monitoring Tenaga Listrik.....	12

2.3.1 Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)	13
2.3.2 Peralatan dalam Sistem SCADA.....	14
2.3.3 <i>Phasor Measurement Unit (PMU)</i>	15
2.4 <i>State Estimation</i>	16
2.5 <i>Hamiltonian Cycle State Estimation</i>	17
2.6 Sistem Informasi Geografis	18
BAB III STATE ESTIMATION HAMILTONIAN CYCLE.....	21
3.1 Metode <i>Hamiltonian Cycle State Estimation</i>	21
3.1.1 Data Hubungan Antar Bus dan Penempatan PMU	23
3.1.2 Inisialisasi <i>State</i> dan Arah Aliran.....	24
3.1.4 Pengecekan Setiap Bus.....	25
3.1.3 <i>Hamiltonian Cycle</i>	25
3.2 Sistem Kelistrikan Penyulang Tegalsari 20 KV Surabaya	26
BAB IV SIMULASI DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Data Hubungan Antar Bus dan Penempatan <i>Phasor Measurement Unit (PMU)</i>	33
4.2 Simulasi <i>Hamiltonian Cycle State Estimation</i> Penyulang Tegalsari (Surabaya).....	37
4.3 Pemrograman dan Hasil Simulasi di <i>Geographic Information System (GIS)</i>	45
BAB V PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN.....	61
RIWAYAT HIDUP PENULIS	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Gambaran umum sistem tenaga listrik	7
Gambar 2. 2	Sistem distribusi <i>radial</i> [6]	9
Gambar 2. 3	Sistem distribusi loop	10
Gambar 2. 4	Sistem jaring jaring (NET)	11
Gambar 2. 5	Sistem spindle	11
Gambar 2. 6	Jaringan tenaga listrik skala kecil	17
Gambar 2. 7	<i>Hamiltonian Path</i>	18
Gambar 2. 8	Tampilan sistem informasi geografi	19
Gambar 3. 1	Diagram alir <i>state estimation</i> dan integrasi dengan GIS	21
Gambar 3. 2	Rangkaian skala kecil penempatan PMU	24
Gambar 3. 3	<i>Single line diagram</i> penyulang Tegalsari	27
Gambar 4. 1	Single line diagram beserta penempatan PMU penyulang Tegalsari	36
Gambar 4. 2	<i>Hamiltonian Path</i> Penyulang Tegalsari.....	38
Gambar 4. 3	Tampilan peta penyulang Tegalsari pada GIS	45
Gambar 4. 4	Tampilan memilih <i>substation</i> dan penyulang	46
Gambar 4. 5	Tampilan klik “Connect”	47
Gambar 4. 6	Tampilan penempatan PMU pada GIS	48
Gambar 4. 7	Tampilan setelah <i>state estimation</i> dijalankan	49
Gambar 4. 8	Menampilkan drop tegangan.....	50
Gambar 4. 9	Menampilkan arus yang mengalir pada jaringan	51
Gambar 4. 10	Menampilkan <i>losses kW</i> dan <i>total losses</i>	52
Gambar 4. 11	Tampilan data rating dan historis trafo.....	53
Gambar 4. 12	Tampilan lokasi trafo yang terdapat PMU pada GIS	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Data Panjang Saluran Udara Penyulang Tegalsari	28
Tabel 3. 2	Data Perhitungan Panjang Saluran Udara	29
Tabel 3. 3	Data Beban Penyulang Tegalsari.....	30
Tabel 3. 4	Kode trafo dan tiang pada Penyulang Tegalsari.....	32
Tabel 4. 1	Peletakkan PMU pada penyulang Tegalsari.....	35
Tabel 4. 2	Urutan Perhitungan dari <i>Hamiltonian Path</i>	39
Tabel 4. 3	Hasil simulasi state estimation penyulang Tegalsari dengan memperlihatkan estimasi tegangan.....	41
Tabel 4. 4	Hasil simulasi state estimation penyulang Tegalsari dengan memperlihatkan estimasi daya yang mengalir pada line ...	42
Tabel 4. 5	Hasil simulasi state estimation penyulang Tegalsari dengan memperlihatkan estimasi daya yang mengalir ke beban....	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah penduduk Indonesia diketahui setiap tahunnya akan semakin meningkat. Hal ini berpengaruh pada peningkatan jumlah konsumen listrik. Akibatnya, jaringan pada sistem distribusi akan semakin banyak *substation* dan lebih kompleks.

Suatu jaringan kelistrikan membutuhkan adanya sistem monitoring yang valid dan baik karena pemantauan untuk meningkatkan keandalan operasi sistem tenaga listrik sangat diperlukan. Salah satu komponen sistem monitoring yang sangat berpengaruh dalam valid tidaknya sebuah data adalah sensor pengukuran. Data hasil ukur pada sensor, akan dikirimkan ke SCADA. Akan tetapi biaya investasi pengadaan sensor pengukuran tidak murah serta mahalnya biaya perawatan menjadi sesuatu yang perlu dipertimbangkan [1]. Pada jaringan listrik yang memiliki banyak *substation* akan membutuhkan biaya investasi yang sangat besar untuk sensor yang terpasang pada *substation* atau trafo.

Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan *state estimation* dengan teori *Hamiltonian Cycle*. Sebuah metode yang bertujuan untuk mengestimasi nilai tegangan dan arus pada trafo distribusi yang tidak memiliki sensor dengan cara membandingkan hasil pembacaan nilai dari trafo yang terdapat sensor pengukuran. Penggunaan sebagian sensor pada perhitungan ini dapat meminimalkan biaya pengeluaran, karena secara langsung jumlah sensor yang digunakan dapat dikurangi. Keunggulan dari teori *Hamiltonian Cycle*, yaitu tidak membutuhkan banyak data historis sebelumnya, hanya membutuhkan data pada saat itu juga. Selain itu, metode ini sangat sesuai jika diterapkan untuk sistem yang membutuhkan data real time, karena cepat dalam pengestimasian [2].

Untuk memudahkan pengguna dalam melakukan analisis, *state estimation* ini dirancang sebagai sebuah simulator. Berintegrasi dengan *Geographic Information System (GIS)*, simulator ini dapat menggambarkan kondisi lapangan yang lebih nyata kepada penggunanya [3]. Pengguna dapat melihat dimana lokasi trafo yang terdapat atau yang tidak terdapat alat ukur. Hal ini dapat sebagai

pertimbangan pengguna dalam mempertimbangkan faktor nonteknis pada pengembangan jaringan selanjutnya.

1.2 Permasalahan

Rumusan permasalahan pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana merancang suatu estimator berdasarkan metode *Hamiltonian Cycle* pada sistem distribusi tenaga listrik berbentuk radial pasif.
2. Bagaimana menerapkan suatu estimator berdasarkan metode *Hamiltonian Cycle* untuk penentuan lokasi geografis sensor pengukuran pada sistem distribusi tenaga listrik radial penyulang Tegalsari Kota Surabaya yang berbasis *Geographic Information System* (GIS).

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini:

1. Mengetahui nilai daya aktif dan daya reaktif pada sistem distribusi pasif dengan metode *state estimation*
2. Menerapkan metode *state estimation* pada sistem distribusi pasif berbasis *Geographic Information System* (GIS)

1.4 Batasan Masalah

Dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini, terdapat batasan yang diperlukan, diantaranya :

1. Permodelan saluran menggunakan distribusi radial pasif penyulang Tegalsari berdasarkan data dari *Geographic Information System* Smallworld PLN Area Distribusi Jawa Timur.
2. Perangkat lunak menggunakan MATLAB, GNU Emacs 21.2 dan ETAP 12.6
3. Sistem distribusi yang diterapkan adalah sistem beban seimbang
4. Metode *state estimation* yang digunakan adalah *Hamiltonian Cycle*.

5. Sensor pengukuran yang digunakan merupakan sensor yang dapat membaca magnitude arus, sudut arus, magnitude tegangan, sudut tegangan dan daya aktif serta daya reaktif
6. Pembacaan pada alat ukur atau *Phasor Measurement Unit* (PMU) adalah ideal atau tanpa mempertimbangkan *error* pengukuran

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah:

1. Studi Literatur
Dilakukan studi literatur pada penelitian ini, bersumber dari jurnal, artikel ilmiah, dan buku. Studi berfokus dengan mengkaji tentang sistem monitoring tenaga listrik, penentuan lokasi sensor pengukuran, beberapa metode dalam *state estimation* dan *geographical information system* dalam sistem tenaga listrik.
2. Pengumpulan Data
Mengumpulkan data yang dibutuhkan dari sistem distribusi Kota Surabaya penyulang Tegalsari. Data yang dikumpulkan berupa panjang saluran, impedansi kabel, nama trafo, nama tiang, data beban trafo, dan jenis kabel.
3. Permodelan Sistem dan Perancangan Perangkat Lunak
Melakukan permodelan pada sistem distribusi radial pasif, permodelan aliran daya dengan asumsi seluruh bus terdapat sensor pengukuran menggunakan ETAP dan MATLAB, selanjutnya hasil program pada MATLAB divalidasi dengan hasil *load flow* ETAP. Selain itu dilakukan perancangan metode *state estimation* dengan teori *Hamiltonian Cycle* untuk pengestimasi beban menggunakan MATLAB. Kemudian program *state estimation* MATLAB yang telah divalidasi akan diprogram ulang pada software GNU Emacs 21.2 (GIS).
4. Simulasi dan Analisis/validasi
Setelah program *state estimation Hamiltonian Cycle* pada MATLAB selesai, maka dilakukan validasi dengan hasil load flow ETAP. Jika hasil simulasi menggunakan MATLAB telah valid, maka program GNU Emacs 21.2 (GIS) yang telah dirancang akan mensimulasikan sistem distribusi Kota Surabaya, pada penyulang Tegalsari. Sehingga diharapkan diperoleh estimasi yang tepat pada lokasi geografis beban tersebut.

5. Pembuatan Laporan

Laporan hasil penelitian ini, membahas mengenai latar belakang masalah, landasan teori, metode yang digunakan pada penelitian ini, hasil dan ketepatan estimasi yang didapatkan, khususnya pada nilai daya aktif dan reaktif beban pada saluran dan profil tegangan pada sistem, serta kesimpulan dan saran.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang ditetapkan pada penyusunan laporan tugas ini adalah sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan.

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, permasalahan, batasan masalah, metodologi penelitian, sistematika penulisan dan relevansi pengerjaan tugas akhir.

BAB II Tinjauan Pustaka

Teori penunjang dan pembahasan secara singkat yang digunakan untuk menyelesaikan masalah, seperti teori tentang sistem distribusi, analisa aliran daya, sistem monitoring tenaga listrik, *state estimation* dan sistem informasi geografis.

BAB III *State Estimation Hamiltonian Cycle*

Pada tahap ini menjelaskan mengenai penerapan metode *State Estimation Hamiltonian Cycle* dan cara penempatan PMU yang menunjang hasil estimasi, kemudian akan dimodelkan dalam bentuk sistem informasi geografis.

BAB IV Simulasi dan Pembahasan.

Selanjutnya, pada tahap ini memberikan simulasi dan pembahasan mengenai hasil dari penempatan sensor pengukuran dan *state estimation* di GIS pada sistem distribusi Surabaya penyulang Tegalsari.

BAB V Penutup.

Pada tahap akhir ini memberikan penjelasan mengenai kesimpulan dan saran lebih lanjut dari hasil penelitian pada tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Manfaat yang diharapkan adanya tugas akhir ini :

1. Dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem kelistrikan, khususnya pada sistem monitoring online tenaga listrik
2. Meningkatkan pengembangan di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) dan pengaplikasian pada sistem tenaga listrik
3. Dapat digunakan untuk referensi bagi peneliti dan mahasiswa lain yang hendak mengembangkan sistem monitoring tenaga listrik secara *real-time*. Sehingga perkembangan sistem tenaga listrik semakin maju.

Halaman ini sengaja dikosongkan

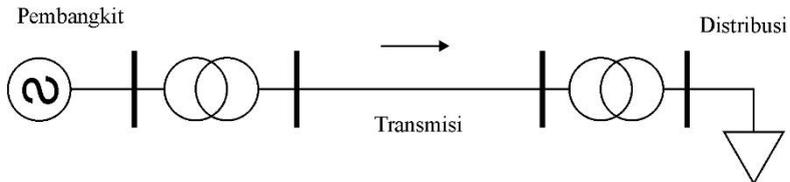
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Saat ini, energi listrik sangatlah penting dan sudah menjadi kebutuhan pokok masyarakat. Energi listrik digunakan untuk menghidupi kebutuhan sehari-hari. Di Indonesia perusahaan yang memegang sistem penyaluran dan pengelolaan energi listrik yaitu Perusahaan Listrik Negara (PLN). PLN menyalurkan energi listrik dari pembangkit menuju beban melalui dua sistem besar, yaitu sistem transmisi dan distribusi. Kualitas sistem penyaluran tersebut dapat dilihat dari kualitas daya diterima pelanggan [4]. Kualitas daya ditentukan dari kapasitas daya yang memenuhi permintaan beban dan besar tegangan yang sesuai dengan standar.

Sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga bagian, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi. Satu dengan yang lain saling terhubung dan bergantung. Berikut adalah penjelasannya:

1. Pembangkit memiliki tugas untuk membangkitkan energi listrik dengan merubah energi awalnya.
2. Sistem transmisi merupakan sistem penyaluran energi listrik dari pembangkit ke gardu induk atau dari gardu induk ke gardu induk, melalui penghantar yang disambungkan antara tiang-tiang dengan level tegangan tinggi.
3. Sistem distribusi adalah sistem penyaluran energi listrik dari gardu induk distribusi ke beban dengan level tegangan rendah. Dapat dikatakan, sistem ini adalah tahap penyaluran daya setelah sistem transmisi.



Gambar 2. 1 Gambaran umum sistem tenaga listrik

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

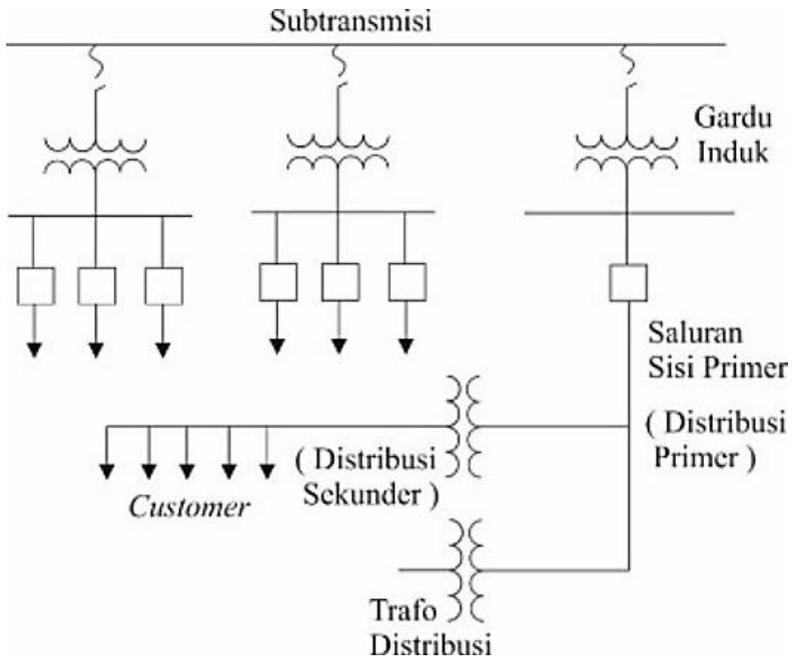
Sistem distribusi merupakan jaringan tegangan menengah dan rendah yang berguna untuk menyalurkan energi listrik ke pelanggan. Di Indonesia, pada umumnya untuk tegangan menengah (distribusi primer) adalah 20 kV, sedangkan tegangan rendah (distribusi sekunder) 380/220 V. Penyaluran sistem menggunakan saluran udara, kabel didalam tanah, maupun kabel udara bergantung pada tingkat keandalan yang diinginkan dan lingkungan. Ada beberapa macam bentuk jaringan sistem distribusi, atau disebut dengan topologi jaringan, yaitu sistem radial, loop, jaring-jaring, dan spindle. Bentuk topologi jaringan tersebut didasarkan pada biaya dan keandalan [5].

2.2.1 Sistem Radial

Sistem distribusi bentuk radial merupakan sistem yang salurannya ditarik dari sumber dan kemudian bercabang-cabang ke beberapa titik dibawahnya. Dikarenakan adanya pencabangan tersebut, arus beban yang mengalir pada setiap saluran memiliki besar yang tidak sama. Hal ini menyebabkan spesifikasi kabel disetiap saluran berbeda. Saluran yang letaknya dekat titik sumber akan menerima arus yang besar, sedangkan yang letaknya jauh atau diujung saluran, akan menerima arus lebih kecil. Sistem ini biasanya memiliki satu saluran yang menghubungkan antara titik sumber dengan beban dan tidak memiliki saluran alternatif lainnya. Sistem yang paling banyak diterapkan dikarenakan konfigurasi salurannya paling mudah dan murah serta modelnya yang bercabang-cabang sesuai dengan kebutuhan pelanggan yang tersebar.

Berikut adalah spesifikasi dari sistem radial:

1. Konfigurasi jaringannya sederhana sehingga biaya investasi relatif murah.
2. Konfigurasi setting koordinasi pengamanannya mudah.
3. Kontinuitas daya sangat rendah dikarenakan titik sumber dan titik beban hanya tersambung dengan satu alternatif saluran sehingga ketika saluran tersebut mengalami gangguan, maka semua beban setelah titik gangguan akan mengalami *blackout*
4. Kualitas dayanya relatif tidak bagus, karena rugi daya pada saluran relatif besar.



Gambar 2. 2 Sistem distribusi *radial* [6]

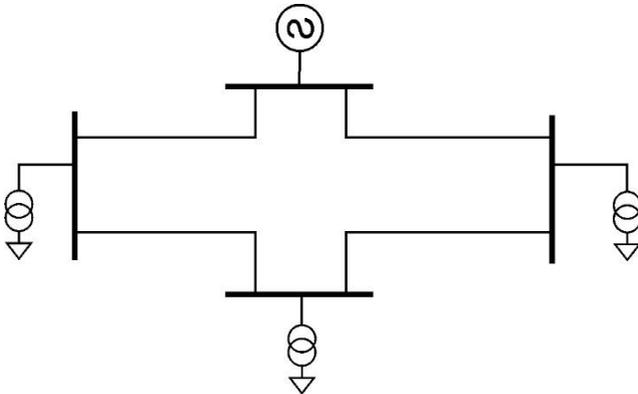
2.2.2 Sistem Loop

Sistem loop memiliki bentuk jaringan ring atau melingkar. Titik beban biasanya memiliki minimal dua alternatif saluran. Hal ini memungkinkan beban mendapatkan suplai daya dari dua arah, sehingga kontinuitas teralirnya daya ke beban lebih terjamin. Selain itu kualitas dayanya menjadi lebih baik, sebab drop tegangan dan rugi daya pada saluran relatif kecil. Oleh karena itu, dapat dikatakan sistem loop memiliki keandalan yang lebih tinggi dari sistem radial [6]. Akan tetapi, sistem ini memiliki investasi yang lebih mahal, karena membutuhkan peralatan pengaman yang lebih canggih, serta perhitungan koordinasi pengaman dengan dua arah suplai yang lebih rumit. Sistem ini sangat cocok untuk diterapkan di daerah dengan kebutuhan daya yang terus-menerus, atau beban yang tidak diperbolehkan mati.

Terdapat dua bentuk pada sistem distribusi loop, yaitu:

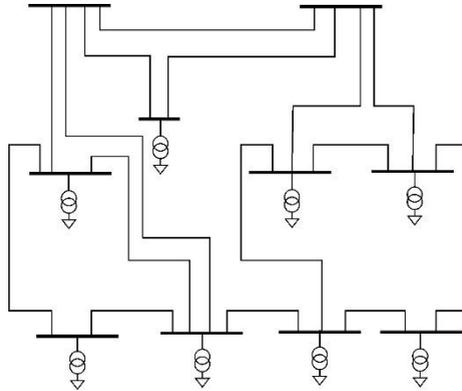
1. Open loop
Saluran dilengkapi dengan normally-open switch, sehingga dalam keadaan normal sistem berbentuk radial. Namun ketika terjadi gangguan switch pada saluran akan close, dan jaringan berubah menjadi loop.
2. Close loop
Saluran dilengkapi dengan normally-close switch, sehingga dalam keadaan normal sistem berbentuk loop. Namun ketika terjadi gangguan switch pada saluran akan open, dan jaringan berubah menjadi radial.

Gambar 2. 3 Sistem distribusi loop



2.2.3 Sistem Jaring-Jaring (NET)

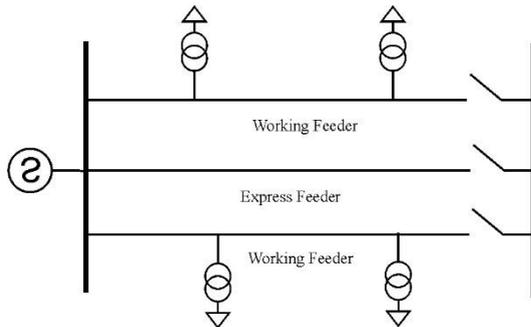
Sistem distribusi NET merupakan gabungan antara radial dan loop, berbentuk seperti jaring-jaring. Penyalur yang menyuplai beban berjumlah lebih banyak, ini artinya sistem ini memiliki banyak alternatif saluran. Sehingga ketika salah satu salurannya gangguan, maka saluran yang lain akan menggantikannya. Hal tersebut membuat kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin. Topologi jaringan ini akan meningkatkan keandalan sistem, menurunkan rugi daya saluran dan drop tegangan, serta menunjang fleksibilitas pertumbuhan beban kedepan. Akan tetapi dibutuhkan biaya investasi yang besar dalam perencanaan sistem kelistrikan yang rumit ini.



Gambar 2. 4 Sistem jaring jaring (NET)

2.2.4 Sistem Spindle

Sistem spindle merupakan hasil modifikasi perubahan topologi jaringan untuk meningkatkan keandalan dan kualitas daya sistem. Pada sistem ini terdapat dua jenis penyulang, yaitu penyulang aktif (*working feeder*) dan penyulang cadangan (*express feeder*). Penyulang yang beroperasi dengan keadaan berbeban adalah *working feeder*, sedangkan penyulang yang dioperasikan tanpa beban yaitu *express feeder*. Beberapa fungsi *express feeder* adalah sebagai cadangan ketika terjadi gangguan, dan dapat memperkecil drop tegangan pada keadaan operasi normal. Penyulang-penyulang ini terhubung dengan gardu hubung yang berfungsi untuk menghubungkan penyulang yang akan tersambung dalam sistem.



Gambar 2. 5 Sistem spindle

2.2 Analisis Aliran Daya

Sebuah studi dasar yang digunakan untuk menganalisa sebuah sistem tenaga listrik. Aliran daya merupakan penyaluran daya aktif maupun reaktif dari pembangkit ke beban melalui penghantar. Kabel adalah media penghantarnya. Nilai impedansi pada kabel mempengaruhi penyaluran daya, ketika arus melewati kabel akan dihasilkan drop tegangan serta rugi rugi saluran. Selain kabel, peralatan lain seperti trafo akan mengalami hal seperti ini juga. Studi ini diperlukan untuk perencanaan dan perancangan sistem tenaga listrik, serta untuk pengembangan sistem tenaga listrik. Terdapat beberapa metode pada aliran daya yaitu Gauss-Seidel, Newton Raphson, dan Fast Decouple [7].

Adapun tujuan utama dalam analisa ini yaitu:

- 1) Untuk mengetahui nilai daya aktif dan reaktif yang mengalir pada saluran
- 2) Untuk pengecekan dan pengaturan level tegangan
- 3) Untuk mengetahui nilai rugi-rugi dan drop tegangan pada jaringan.

Diperlukan data bus dan saluran untuk mengetahui nilai tegangan pada setiap bus sistem kelistrikan yang akan dianalisis. Data bus berupa nilai daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran. Sedangkan data saluran berupa nilai resistansi dan reaktansi beserta panjang penghantar. Nilai ini sebagai pertimbangan yang digunakan untuk menghitung drop tegangan saluran. Kemudian data-data tersebut akan diolah dan diiterasi sampai didapatkan nilai yang sesuai dengan nilai toleransinya.

2.3 Sistem Monitoring Tenaga Listrik

Sistem distribusi yang kompleks sangat membutuhkan sistem monitoring yang baik, untuk memantau kualitas daya listrik dilapangan. Hal ini yang membuat sensor pengukuran berupa *Phasor Measurement Unit* (PMU) pada sistem monitoring tenaga listrik sangat penting. Akan tetapi, sensor pengukuran tenaga listrik harganya tidak murah, dan biaya perawatannya mahal. Maka dari itu, dibutuhkan biaya yang sangat besar jika setiap bus dan saluran dipasang PMU.

Salah satu jenis monitoring pada sistem tenaga listrik adalah SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition. SCADA

bertujuan untuk mengumpulkan data dari seluruh PMU di lapangan, untuk kemudian dikirim ke sebuah komputer pusat. Pada komputer pusat ini sebagai alat pengatur dan memantau data yang diperoleh sebelumnya.

2.3.1 Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)

SCADA atau Supervisory Control And Data Acquisition merupakan sebuah sistem yang berfungsi untuk mengumpulkan data informasi dari lapangan yang kemudian akan dikirimkan ke komputer pusat. Data-data informasi akan diolah dan diatur pada komputer tersebut atau biasa dinamakan komputer *server* [8]. Adapun fungsi utama dari sebuah sistem SCADA sebagai berikut:

1. Telemetry (TM)
Proses yang digunakan untuk mendapatkan data atau informasi. Pengumpulan data menggunakan kabel, sinyal radio dan peralatan yang memiliki fungsi sama. Data yang dikumpulkan berupa hasil pengukuran dari alat ukur yang terpasang pada peralatan, seperti pengukuran tegangan, arus, daya, dan lain-lain.
2. Telesignal (TS)
Pengawasan dari status peralatan operasional dengan menggunakan teknik telekomunikasi seperti kondisi alarm, posisi switch. SCADA dapat mendeteksi area gangguan, sehingga dapat mempertimbangkan perintah selanjutnya untuk mengatasi gangguan tersebut.
3. Telecontrol (TC)
Proses untuk mengendalikan atau memberikan perintah kepada suatu peralatan dari jarak jauh secara remote pada sistem tenaga listrik
4. Data Communication
Data yang berasal dari pengukuran perlu dijadikan satu pada suatu komputer terpusat. Dikarenakan beberapa sinyal yang dihasilkan sensor dan relai kontrol tidak dapat langsung diterjemahkan oleh protokol komunikasi. Oleh karena itu dibutuhkan *remote terminal unit* (RTU) untuk menjembatani antara sensor dan sistem SCADA.

2.3.2 Peralatan dalam Sistem SCADA

Dalam pengoperasiannya, SCADA dibagi atas beberapa alat penunjangnya. Berikut peralatan tersebut:

1. Sensor atau relay kontrol
Bagian ini terhubung langsung ke peralatan dan akan mengirimkan data ke *Remote Terminal Unit* (RTU)
2. *Remote Terminal Unit* (RTU)
Sebuah unit yang dilengkapi dengan sistem sendiri, seperti sebuah komputer. Peralatan ini berfungsi sebagai pengendali utama sistem agar dapat berjalan seperti yang diinginkan. Biasanya ditempatkan pada tempat-tempat tertentu di lapangan. RTU yang umum digunakan adalah *Distributed Control System* (DCS).
3. Jaringan komunikasi
Peralatan yang berfungsi menghubungkan antara *Remote Terminal Unit* (RTU) dengan Unit Master SCADA (MTU). Komunikasi sistem SCADA bermacam macam, dapat berupa jaringan kabel, jaringan radio, jaringan telepon, dan fiber optik.
4. Unit Master SCADA (*Master Terminal Unit* - MTU)
Komputer yang digunakan untuk mengolah data pusat dari dari sistem SCADA. Pengolahan data berupa monitoring dan kontroling dilakukan dalam bentuk *Human Machine Interface* (HMI) agar mudah bagi operator.

Selain itu SCADA memiliki beberapa konfigurasi agar dapat melakukan monitoring. Berikut konfigurasi pemasangan SCADA diantaranya:

1. Point to point
Konfigurasi paling sederhana yang terdiri dari satu unit *Master Station* dan *Remote Station*.
2. Point to multipoint
Terdiri dari beberapa unit *remote station* tetapi hanya memiliki satu unit *master station*. Masing-masing *remote station* terhubung pada *master station* melalui inteface yang berbeda-beda. Keduanya, *master station* dan *remote station*, dapat mengirimkan dan menerima informasi secara bersamaan.
3. Multipoint-star
Konfigurasi ini terdiri dari beberapa *remote station* yang terhubung ke *master station* melalui yang sama, sehingga hanya

ada satu remote station yang dapat mengirimkan data ke master station secara bersamaan dalam satu waktu. Akan tetapi master station dapat mengirimkan data ke beberapa remote station secara bersamaan dalam satu waktu.

4. Partyline
Konfigurasi yang menghubungkan remote station dengan master station melalui satu bus. Pada pengiriman data, sama seperti multipoint.
5. Loop
Konfigurasi yang paling handal dari yang lainnya. Hal ini dikarenakan setiap remote station berkomunikasi dengan master station melalui dua arah.
6. Konfigurasi Gabungan
Konfigurasi gabungan dari beberapa konfigurasi yang telah disebutkan diatas.

2.3.3 Phasor Measurement Unit (PMU)

Suatu alat yang digunakan untuk monitoring, salah satunya yang diterapkan dalam monitoring jaringan listrik. PMU dapat memonitoring secara *real time* dan saling bersinkronisasi antara PMU satu dengan lainnya [9]. Apabila PMU dipasang pada suatu gardu atau bus, maka dapat mengetahui parameter besar dan sudut tegangan pada bus serta besar dan sudut arus yang mengalir pada saluran.

Penyamaan waktu menggunakan sinyal satelit GPS, sehingga nilai pengukuran antar PMU diukur secara bersamaan dan terus-menerus. PMU memiliki keuntungan yang lain, yaitu seperti mengukur untuk koordinasi sistem proteksi, frekuensi lokal, harmonisa, arus urutan nol dan negatif seperti pengukuran menggunakan power meter pada umumnya.

2.4 State Estimation

State Estimation adalah sebuah metode untuk menentukan sebuah variabel atau nilai yang tidak diketahui dengan berdasar pada hasil pengukuran sistem yang telah diketahui. Data bus dan saluran diperlukan dalam menjalankan metode ini. Terdapat empat fungsi dari *state estimation* yaitu dapat mengetahui kualitas pembacaan suatu alat ukur dengan cara membandingkan hasil estimasi dengan hasil pengukuran, dapat dijadikan acuan kelayakan dalam studi pengembangan *state estimation*, dapat mengestimasi tegangan bus menggunakan pengukuran data yang tersedia, dan dapat menentukan topologi pada suatu sistem [10].

State estimation digunakan karena adanya beberapa permasalahan dalam proses monitoring sistem tenaga listrik. Permasalahan pertama ada pada transducer sensor pengukuran. Apabila device ini digunakan terus menerus nilai *error* pembacaan data semakin lama akan semakin besar. Dengan kata lain umur pemakaian transducer terbatas [11].

Permasalahan kedua terdapat pada mahalnya biaya investasi yang digunakan untuk sebuah sensor pengukuran. Sensor pengukuran umumnya dipasang disetiap bus, agar dapat dilakukan analisis aliran daya. Akan tetapi apabila sebuah sistem distribusi memiliki puluhan bahkan ratusan bus, maka berapa banyak biaya sensor pengukuran yang harus dikeluarkan.

Kedua permasalahan tersebut dapat diatasi dengan *state estimation*, karena dengan metode ini dapat mengurangi *error* pengukuran yang dihasilkan oleh sensor dan mengurangi jumlah penggunaan sensor, itu artinya dapat meminimalkan biaya investasi sensor pengukuran.

State estimation memiliki algoritma tersendiri. *State* pada sebuah jaringan sistem tenaga listrik berupa data arus injeksi bus (J), tegangan bus (V), dan arus percabangan (I).

$$\Omega = \{\omega | \omega \in J \cup V \cup I\} \quad (2.1)$$

$$\Psi = \{\psi | \psi \in \Omega \wedge \omega \text{ is measured}\} \quad (2.2)$$

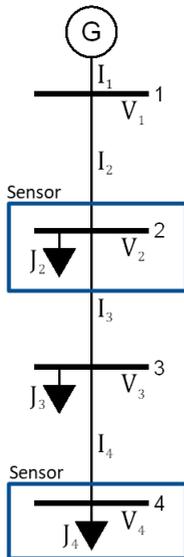
$$X = \{\chi | \chi \in \Omega \wedge \omega \text{ is unknown}\} \quad (2.3)$$

Ketiganya tersebut digabungkan untuk mendapatkan *state* (Ω) seperti pada (2.1). Data yang diukur dengan *Phasor Measurement Unit (PMU)* (2.2) akan digunakan untuk menentukan *state* yang tidak diketahui (2.3). Jadi pada algoritma *state estimation*, untuk mendapatkan nilai X digunakan nilai dari Ψ .

2.5 Hamiltonian Cycle State Estimation

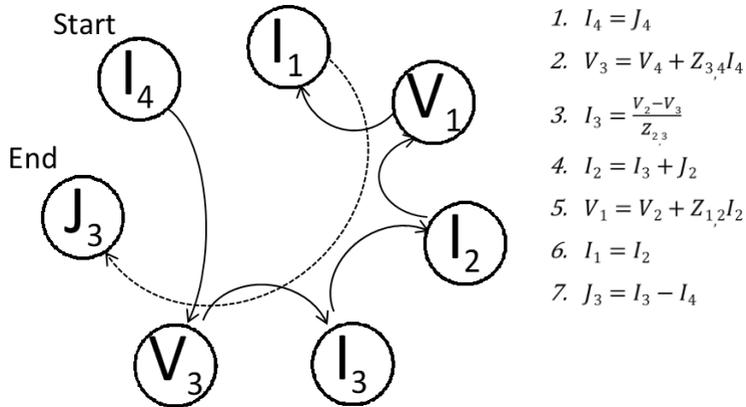
Salah satu metode yang digunakan dalam menjalankan *state estimation*. Metode ini bertujuan untuk mengestimasi nilai, seperti tegangan dan arus, pada bus yang tidak memiliki sensor dengan cara membandingkan hasil pembacaan nilai dari trafo yang terdapat sensor. Prinsip yang digunakan dalam *Hamiltonian Cycle* adalah *travelling salesman*, setiap bus akan dikunjungi satu persatu secara urut. Apabila pada bus tertentu memungkinkan didapat perhitungannya, maka perhitungan akan disimpan dan bus tersebut tidak akan dikunjungi lagi. Proses ini akan terus menerus sampai mendapatkan perhitungan pada semua bus.

Berikut adalah contoh penerapan *Hamiltonian Cycle* pada jaringan tenaga listrik skala kecil:



1. Dari sensor didapat *state*:
 $\Psi = \{V_2, J_2, V_4, J_4\}$
2. *State* yang perlu diestimasi :
 $X = \{I_1, V_1, I_2, I_3, J_3, V_3, I_4\}$
3. Membuat *Hamiltonian Path*

Gambar 2. 6 Jaringan tenaga listrik skala kecil

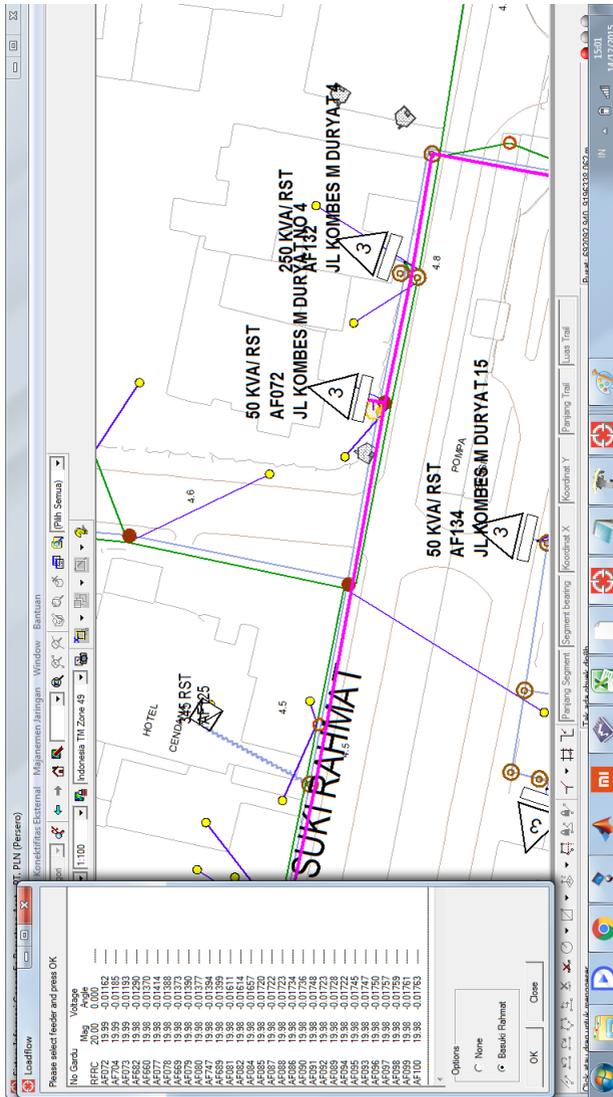


Gambar 2. 7 Hamiltonian Path

Keunggulan dari *Hamiltonian Cycle*, yaitu tidak membutuhkan banyak data historis sebelumnya, hanya membutuhkan data pada saat itu juga. Selain itu, metode ini sangat sesuai jika diterapkan untuk sistem yang membutuhkan data real time, karena cepat dalam pengestimasiannya [2].

2.6 Sistem Informasi Geografis

Geographic information system adalah program monitoring yang dapat menggambarkan kondisi lapangan yang lebih nyata kepada penggunanya. Dalam pengaplikasiannya, program ini diterapkan untuk memprediksi, memonitoring, merancang, dan sebagai alat bantu dalam pengambilan keputusan dari permasalahan suatu objek [3]. Keunggulannya adalah GIS memiliki database berkapasitas besar yang mudah diakses dan digunakan sebagai kebutuhan analisis. Database tersebut menyimpan data inventaris secara detail, seperti spesifikasi, umur peralatan, serta lokasi peralatan berada. Selain itu, simulator ini sangat membantu pengguna dalam mempertimbangkan faktor nonteknis pada pengembangan jaringan kedepannya.



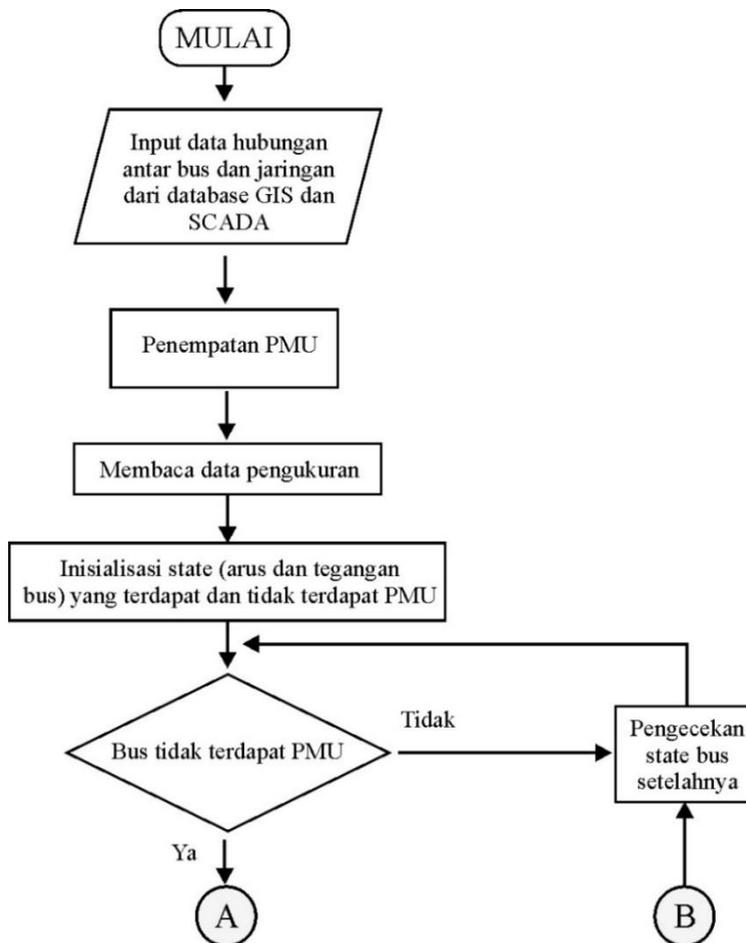
Gambar 2. 8 Tampilan sistem informasi gerografis
(Screenshot software GNU Emac 21.2)

Halaman ini sengaja dikosongkan

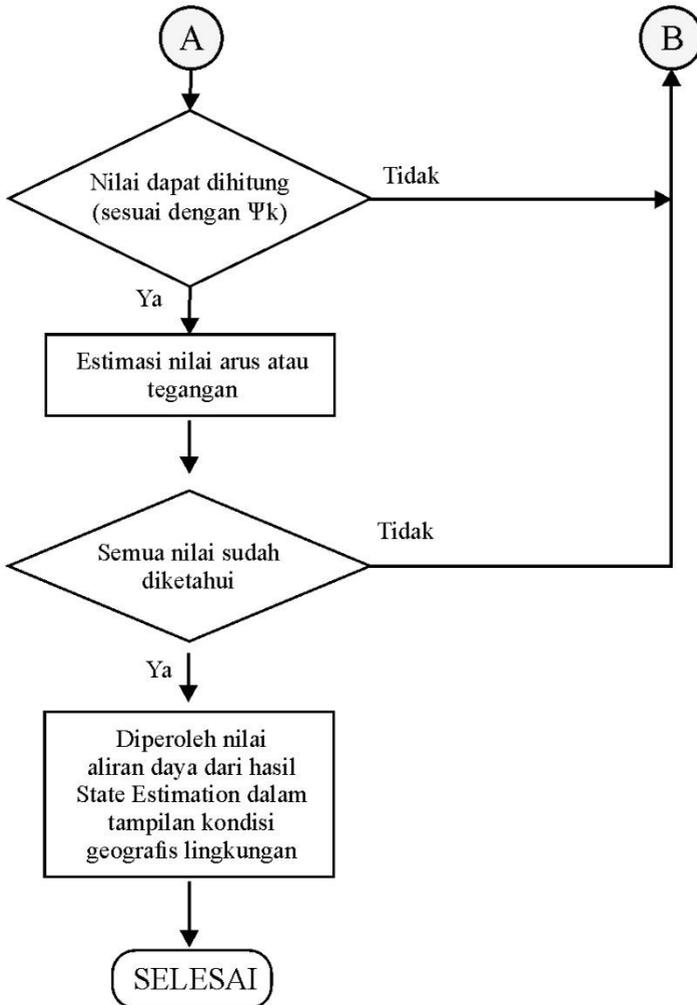
BAB III STATE ESTIMATION HAMILTONIAN CYCLE

3.1 Metode *Hamiltonian Cycle State Estimation*

Berikut diagram alir dalam melakukan *Hamiltonian Cycle State Estimation*, ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram alir *state estimation* dan integrasi dengan GIS



Gambar 3. 1 Diagram alir *state estimation* dan integrasi dengan GIS (lanjutan)

3.1.1 Data Hubungan Antar Bus dan Penempatan PMU

Hal pertama yang diperlukan untuk mengestimasi adalah data hubungan antar bus pada jaringan kelistrikan. Data tersebut menunjukkan koneksi dengan bus sebelum dan sesudah. Dengan adanya hubungan antar bus dapat mempermudah pengecekan *state* yang dilakukan oleh *Hamiltonian Cycle* ini. Bus diagonalnya menunjukkan nomer bus tersebut. Berikut merupakan contoh matriks hubungan bus jaringan skala kecil (Gambar 3.2) :

$$\text{bus connection} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Pada *state estimation*, penempatan suatu PMU sangat berpengaruh dengan hasil estimasi. PMU akan diletakkan pada beberapa bus saja. Untuk mencari penempatan PMU yang sesuai untuk *Hamiltonian Cycle* digunakan pola tertentu sesuai aturan pemasangan. Berikut merupakan aturan pemasangan PMU [12, 13]:

1. Bus utama atau bus paling dekat gardu induk harus selalu terpasang PMU. Hal ini untuk mengetahui tegangan dan daya alir bus gardu induk pada jaringan. (Bus 1)
2. PMU diletakkan pada percabangan bus. Akan tetapi jika bus atas atau bawah bus telah terdapat PMU, maka dapat dihilangkan. (Bus 3)
3. Pada ujung percabangan diletakkan PMU. Jika pada ujung terdapat 2 atau lebih beban maka dipasang disalah satunya. (Bus7, 8, 9)
4. Pada cabang yang panjang, di pertengahannya harus terdapat PMU (Bus 5)

yang belum diketahui. Sedangkan nilai nol memiliki arti nilai yang telah diketahui dari pengukuran Ψ .

Jika matriks C_j telah disesuaikan dengan lokasi PMU, maka dilakukan inisiasi arah aliran pengecekan *hamiltonian*. Arah pengecekan terdiri dari *downward* dan *upward*. Untuk pertama kali arah pengecekan dilakukan dari nomer bus terbesar menuju terkecil (*downward*).

3.1.4 Pengecekan Setiap Bus

Cycle pada *hamiltonian* dimulai dari pengecekan setiap bus dari nomer bus terbesar menuju terkecil. Saat pengecekan pada bus yang memiliki *state* bernilai 1, maka *state* akan diambil dan dilakukan langkah selanjutnya untuk menemukan nilai tersebut. Jika yang dicek adalah *state* yang bernilai 0 maka akan dilewati dan lanjut ke *state* berikutnya.

3.1.3 Hamiltonian Cycle

Model formula matematis pada suatu jaringan listrik distribusi termasuk tidak linear karena dalam aplikasinya, jaringan kelistrikan dimodelkan sebagai rangkaian listrik yang besar dan kompleks. Akan tetapi, jaringan distribusi dapat dilihat sebagai sebuah susunan dari banyak sistem rangkaian listrik yang kecil dan sederhana serta memiliki solusi model matematika linear sesuai hukum Kirchoff arus dan tegangan. Pada tabel lampiran 2. ditunjukkan contoh bagian kecil dari suatu sistem distribusi berupa bentuk single line diagram dan model matematis ($\Psi_k(X_j)$) untuk menyelesaikan *state estimation*. Terdapat dua mode arah aliran, *downward* (arah aliran dari bawah) dan *upward* (arah aliran dari atas).

Pada mode *downward*, digunakan untuk mengetahui suatu *state* di atasnya yang tidak diketahui, dengan arah aliran pengecekan dari bawah ke atas. Sedangkan mode *upward*, untuk mengetahui *state* dibawahnya yang tidak diketahui, dengan arah aliran pengecekan dari atas ke bawah secara berurutan.

$$C_j = \begin{cases} 0, & \text{jika } \Psi_k(X_j) \subset A(j) \cup \Psi \\ 1, & \text{yang lain} \end{cases} \quad (3.2)$$

Jika *state* (X_j) sesuai dengan salah satu model matematika tersebut, maka C_j akan diubah menjadi nol (0). Kemudian *state* yg telah ditemukan akan disimpan di matriks A_j , sebagai tempat kumpulan *state* yang telah ditemukan. *State* tersebut nantinya akan digunakan kembali dalam mempertimbangkan $\Psi_k(X_j)$ dari *state* selanjutnya. Sedangkan jika *state* (X_j) tidak sesuai, maka *state* tersebut dilewati dan akan dilakukan pengecekan ke *state* berikutnya.

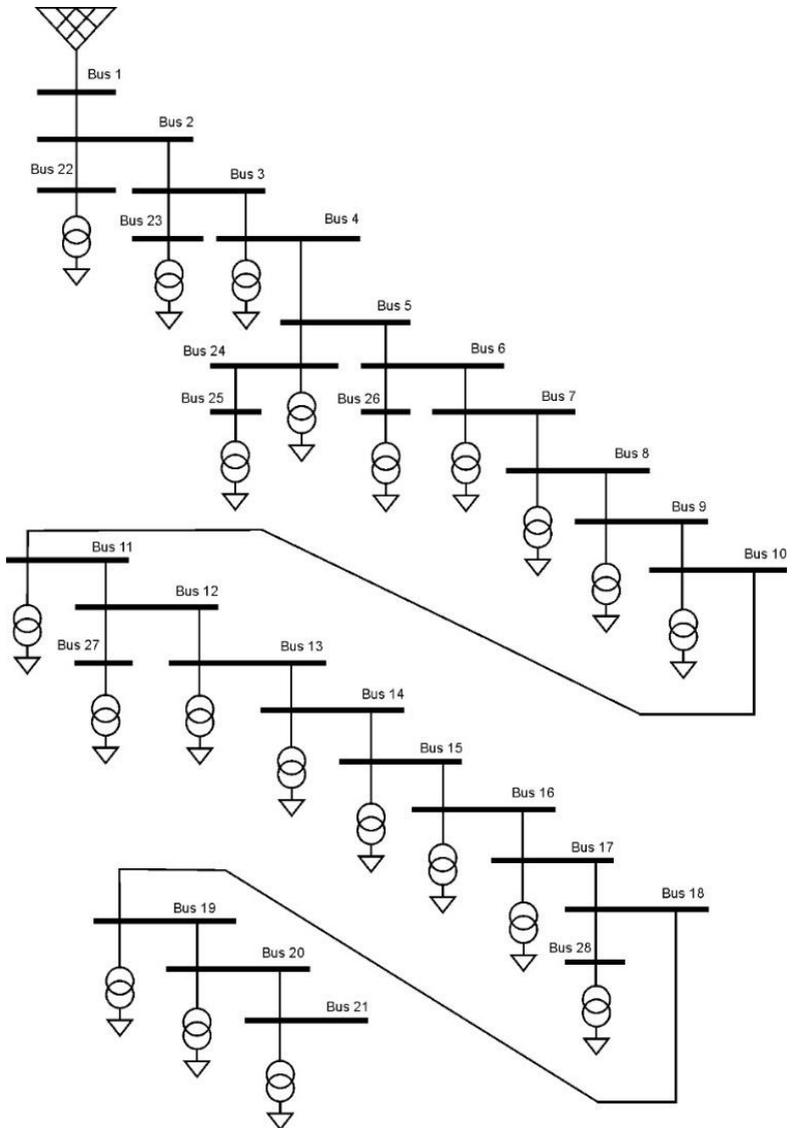
Dengan didapatnya model matematika tersebut maka *unknown state* yang berisi nilai arus dan tegangan dapat ditemukan. Selain itu, proses ini membentuk suatu *cycle step* urutan ditemukannya *state* yang dinamakan *hamiltonian path*.

$$\min F(X) = \sum_{j=1}^{n_x} C_j \quad (3.3)$$

Pada tahap terakhir, dilakukan pengecekan pada objective fuctionnya, apakah telah memenuhi atau belum. $F(X)$ merupakan *objective function* dari *hamiltonian cycle*. Terdapat dua kemungkinan nilai dalam fungsi objektif tersebut, yaitu lebih dari nol dan nol. Bernilai lebih dari nol artinya masih terdapat *state* yang belum diketahui nilainya, maka *state* tersebut dilewati dan pengecekan akan berlanjut ke *state* berikutnya. Sedangkan ketika nilai nya sama dengan nol artinya semua *state* telah ditemukan nilainya dan proses akan berhenti.

3.2 Sistem Kelistrikan Penyulang Tegalsari 20 KV Surabaya

Pada tugas akhir ini digunakan sistem distribusi 20 kV penyulang Tegalsari untuk mensimulasikan *state estimation*. Sistem distribusi ini menggunakan sistem tiga fasa. Namun dalam tugas akhir ini, jaringan dianggap tiga fasa seimbang sehingga diasumsikan satu fasa. Sistem penyulang Tegalsari dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 *Single line diagram* penyulang Tegalsari

Penyulang Tegalsari merupakan salah satu penyulang dari gardu induk Kupang yang mempunyai 28 bus. Data penyulang Tegalsari yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut. Pada tabel dibawah ini merupakan data panjang saluran udara pada penyulang berdasarkan data pada *Geographic Information System (GIS)*.

Tabel 3. 1 Data Panjang Saluran Udara Penyulang Tegalsari

Saluran		Panjang (km)
Bus Asal	Bus Tujuan	
1	2	0,08323
2	22	0,00745
2	3	0,12339
3	23	0,01385
3	4	0,00765
4	5	0,03522
5	24	0,01108
24	25	0,02997
5	6	0,05009
6	26	0,014
6	7	0,02419
7	8	0,03922
8	9	0,03858
9	10	0,15351
10	11	0,03148
11	12	0,10522
12	27	0,01738
12	13	0,0343
13	14	0,2976
14	15	0,24282
15	16	0,0221

Tabel 3. 1 Data Panjang Saluran Udara Penyulang Tegalsari(lanjutan)

Saluran		Panjang (km)
Bus Asal	Bus Tujuan	
16	17	0,21672
17	18	0,0344
18	28	0,01628
18	19	0,07931
19	20	0,01342
20	21	0,02136

Dengan diketahui nilai $R = 0,265/\text{km}$ dan $X = 0,13/\text{km}$ maka didapatkan nilai impedansi (ohm) dengan mengalikan nilai R dan X dengan panjang saluran antar bus. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 2 Data Perhitungan Panjang Saluran Udara

Saluran		Impedansi (Ohm)	
Bus Asal	Bus Tujuan	R	X
1	2	0,02206	0,01082
2	22	0,00197	0,00097
2	3	0,0327	0,01604
3	23	0,00367	0,0018
3	4	0,00203	0,00099
4	5	0,00933	0,00458
5	24	0,00294	0,0014
24	25	0,00794	0,0039
5	6	0,01327	0,00651
6	26	0,00371	0,00182
6	7	0,00641	0,00315
7	8	0,01039	0,0051
8	9	0,01022	0,00501

Tabel 3. 2 Data Perhitungan Panjang Saluran Udara(lanjutan)

Saluran		Impedansi (Ohm)	
Bus Asal	Bus Tujuan	R	X
9	10	0,04068	0,01996
10	11	0,00834	0,00409
11	12	0,02788	0,01368
12	27	0,00461	0,00226
12	13	0,0091	0,00446
13	14	0,07886	0,03869
14	15	0,06435	0,03157
15	16	0,00586	0,00287
16	17	0,05743	0,02817
17	18	0,00912	0,00447
18	28	0,00431	0,00212
18	19	0,02102	0,01031
19	20	0,00356	0,00174
20	21	0,00566	0,00278

Kemudian data beban berupa daya aktif dan reaktif untuk penyulang Tegalsari ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 3 Data Beban Penyulang Tegalsari

No Bus	P (kW)	Q (kVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	136	84
5	0	0
6	0	0
7	42	26
8	170	105

Tabel 3. 3 Data Beban Penyulang Tegalsari(lanjutan)

No Bus	P (kW)	Q (kVAR)
9	85	53
10	85	53
11	136	84
12	0	0
13	64	40
14	136	84
15	106	66
16	21	13
17	170	105
18	0	0
19	42	26
20	213	132
21	27	17
22	213	132
23	213	132
24	136	84
25	127	79
26	42	26
27	136	84
28	170	105

Dalam *Geographic Information System (GIS)*, setiap bus digambarkan sebagai trafo atau tiang yang memiliki kode. Berikut merupakan kode trafo dan tiang di tiap busnya.

Tabel 3. 4 Kode Trafo dan Tiang Pada Penyulang Tegalsari

No Bus	Kode Trafo atau Tiang
1	GI
2	25597677
3	25597660
4	AF164
5	25597635
6	25597631
7	AF657
8	AF143
9	AF730
10	AF144
11	AF718
12	25593661
13	AF145
14	AF148
15	AF149
16	AF150
17	AF153
18	AF154
19	AF156
20	AF157
21	AF158
22	AF137
23	AF138
24	AF139
25	AF140
26	AF142
27	AF668
28	AF154

BAB IV SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Simulasi *State Estimation* dilakukan dengan cara menjalankan program *Hamiltonian Cycle State Estimation* dengan data bus dan saluran dari penyulang Tegalsari di jaringan distribusi 20 kV Surabaya. Hasil dari simulasi berupa data magnitude tegangan bus serta sudut, arus, dan daya yang mengalir dari setiap cabangnya. Pemodelan pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak MATLAB dan *Smallworld General Electric* (GIS), yang selanjutnya divalidasi dengan analisis aliran daya *Network Topology* menggunakan perangkat lunak MATLAB.

4.1 Data Hubungan Antar Bus dan Penempatan *Phasor Measurement Unit* (PMU)

Ketika awal, pengambilan data dilakukan dengan kondisi semua bus terpasang PMU. Kemudian PMU akan dihilangkan satu-persatu sesuai dengan aturan diatas hingga didapatkan jumlah PMU yang minimum pada suatu penyulang. Kemudian data-data tersebut divalidasi dengan data hasil aliran daya program MATLAB untuk mengetahui nilai *error*-nya.

Berikut data inisialisasi PMU dengan kondisi semua bus terpasang PMU dari penyulang Tegalsari dengan 28 bus:

$$a_{pmu} = [1]$$

Kemudian dilakukan running program penempatan PMU sesuai penjelasan di subbab 3.1.1 dan didapatkan hasil sebagai berikut:

$$a_{pmu} = [1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1]$$

Hasil dari penentuan PMU tersebut akan digunakan untuk membantu dalam menentukan estimasi dengan cara matriks tersebut diolah dengan matriks hubungan antar bus. Maka dibuatlah juga matriks hubungan antar bus penyulang Tegalsari.

Berikut merupakan matriks hubungan antar bus penyulang Tegalsari 28 bus:

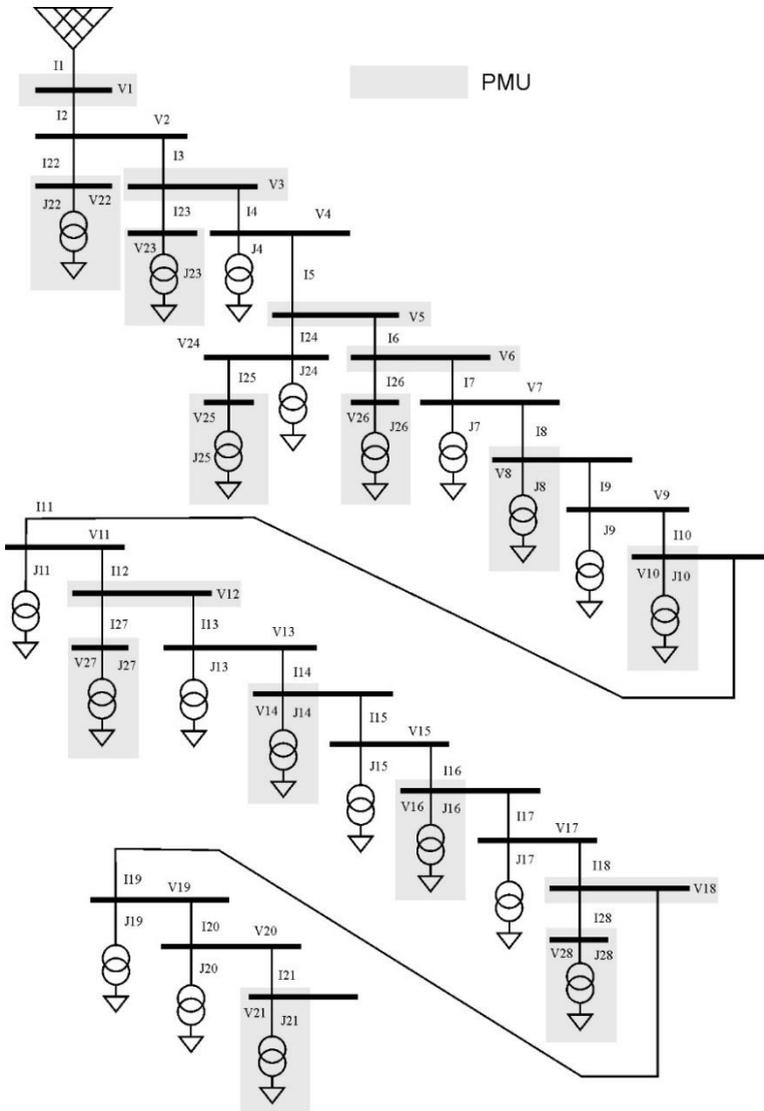
$$\text{busC} = \begin{bmatrix}
 11000000000000000000000000000000 \\
 11100000000000000000000001000000 \\
 0111000000000000000000000100000 \\
 00111000000000000000000000000000 \\
 00011100000000000000000000010000 \\
 00001110000000000000000000000100 \\
 00000111000000000000000000000000 \\
 00000011100000000000000000000000 \\
 00000001110000000000000000000000 \\
 00000000111000000000000000000000 \\
 00000000011100000000000000000000 \\
 0000000000111000000000000000010 \\
 0000000000011100000000000000000 \\
 0000000000001110000000000000000 \\
 0000000000000111000000000000000 \\
 0000000000000011100000000000000 \\
 0000000000000001110000000000000 \\
 0000000000000000111000000000000 \\
 0000000000000000011100000000000 \\
 0000000000000000001110000000000 \\
 0000000000000000000111000000000 \\
 01000000000000000000000001000000 \\
 0010000000000000000000000100000 \\
 00001000000000000000000000011000 \\
 00000000000000000000000000011000 \\
 00000100000000000000000000000100 \\
 0000000000001000000000000000010 \\
 0000000000000000000000000100000001
 \end{bmatrix}$$

Hasil peletakan PMU pada bus dan trafo/ tiang (pada peta GIS) sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Peletakkan PMU Pada Penyulang Tegalsari

No Bus	Trafo/ No Tiang	PMU
1	GI	YES
2	25597677	NO
3	25597660	YES
4	AF164	NO
5	25597635	YES
6	25597631	YES
7	AF657	NO
8	AF143	YES
9	AF730	NO
10	AF144	YES
11	AF718	NO
12	25593661	YES
13	AF145	NO
14	AF148	YES
15	AF149	NO
16	AF150	YES
17	AF153	NO
18	AF154	YES
19	AF156	NO
20	AF157	NO
21	AF158	YES
22	AF137	YES
23	AF138	YES
24	AF139	NO
25	AF140	YES
26	AF142	YES
27	AF668	YES
28	AF154	YES

Berikut merupakan single line diagram dan hasil peletakan minimal PMU mempertimbangkan aturan peletakan PMU. Penandaan kotak warna abu-abu menandakan bus terdapat PMU. (Gambar 4.1)

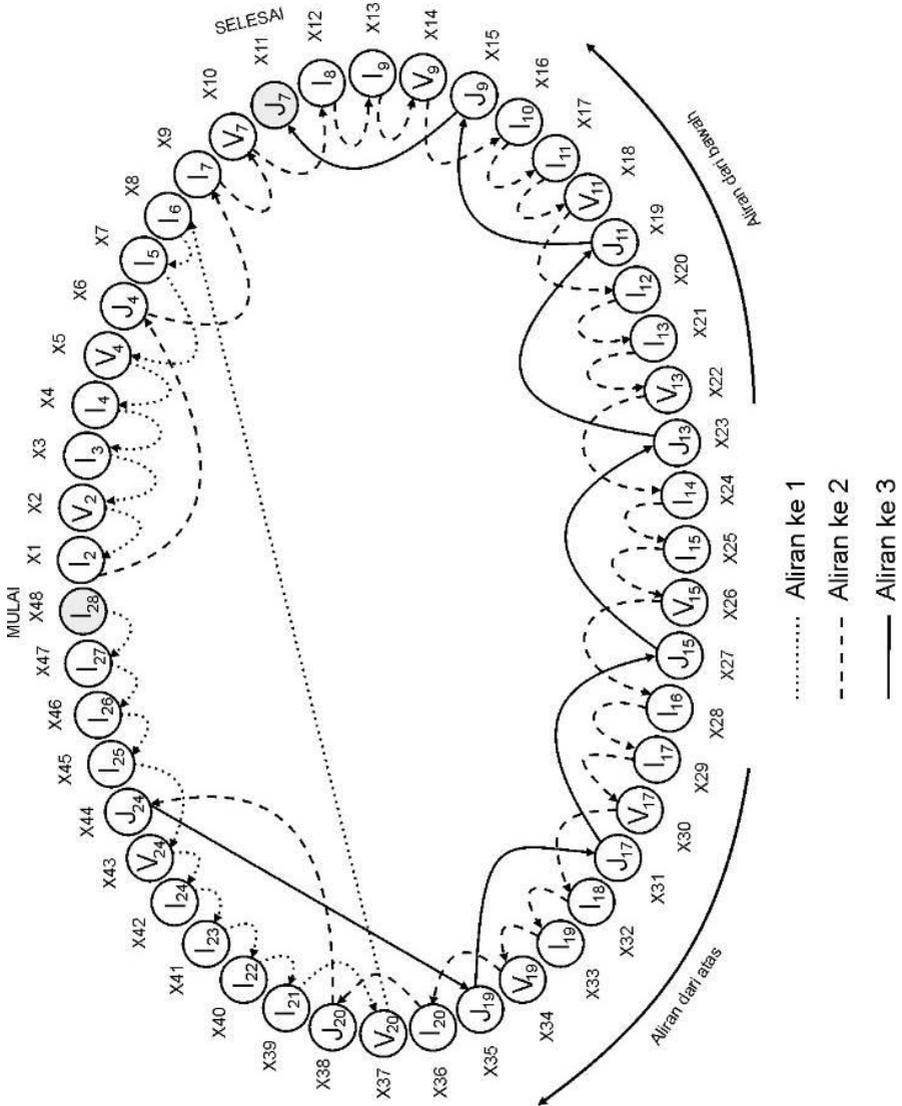


Gambar 4. 1 Single line diagram beserta penempatan PMU penyulang Tegalsari

Setelah dilakukan program penempatan, PMU yang terpasang berjumlah 17 PMU dari yang semula 28 PMU. Dengan 17 PMU besaran dan sudut tegangan, arus dan sudut, daya aktif, dan reaktif pada tiap beban maupun line dapat diketahui. Metode ini dapat mereduksi 11 PMU atau sekitar 39,29% dari jumlah sensor total. Setelah PMU tersebut terpasang dapat dilakukan *State Estimation* dengan metode *Hamiltonian Cycle*.

4.2 Simulasi *Hamiltonian Cycle State Estimation* Penyulang Tegalsari (Surabaya)

Hamiltonian cycle memiliki ciri khas yaitu memiliki *hamiltonian path*. Ciri khas tersebut merupakan pembuatan urutan penghitungan busnya. Perhitungan dilakukan menggunakan data pengukuran dari 17 PMU yang sudah diketahui. Didapatkan nilai yang diketahui dari 17 PMU sebagai berikut, $\Psi = \{ \dot{I}_1, \dot{V}_1, \dot{V}_3, \dot{V}_5, \dot{V}_6, \dot{V}_8, \dot{J}_8, \dot{V}_{10}, \dot{J}_{10}, \dot{V}_{12}, \dot{V}_{14}, \dot{J}_{14}, \dot{V}_{16}, \dot{J}_{16}, \dot{V}_{18}, \dot{V}_{21}, \dot{J}_{21}, \dot{V}_{22}, \dot{J}_{22}, \dot{V}_{23}, \dot{J}_{23}, \dot{V}_{25}, \dot{J}_{25}, \dot{V}_{26}, \dot{J}_{26}, \dot{V}_{27}, \dot{J}_{27}, \dot{V}_{28}, \dot{J}_{28} \}$. Kemudian akan dilakukan pengecekan pada setiap *state* bus yang tidak terdapat PMU. Jika terdapat kemungkinan didapatkan persamaan matematis pada *state* bus tersebut, maka persamaan matematis akan disimpan. Selain itu urutan mendapatkan persamaan juga disimpan agar mendapatkan *hamiltonian path*. Akan tetapi jika persamaan matematis tidak ditemukan, maka *state* akan ditandai sebagai *state* yang telah dicek tetapi persamaan matematis yang belum ditemukan dan pengecekan akan berlanjut ke *state* selanjutnya. *State* yang ditandai tersebut nantinya akan dilakukan pengecekan kembali, apakah terdapat kemungkinan persamaan matematis dapat ditemukan. Proses pengecekan dilakukan dari bawah ke atas (*downward*), jika telah sampai di bus paling atas maka diganti dari atas ke bawah (*upward*), berlaku sebaliknya. Proses akan berlangsung sampai semua nilai *state* ditemukan. dan akan didapat urutan *hamiltonian path*. Urutan ini berdasarkan dari yang paling mudah dan memungkinkan didapatkan hasil dari tiap busnya. Dengan prinsip ini akan didapatkan persamaan matematis tiap busnya. Persamaan tersebut digunakan untuk mengestimasi nilai daya pada *state estimation*.



Gambar 4. 2 Hamiltonian Path Penyulang Tegalsari

Tabel 4. 2 Urutan Perhitungan dari *Hamiltonian Path*

s_j	X_j	$f(\Psi_k(X_j))$
1	$[I_{28}]$	$[I_{28}] = [J_{28}]$
2	$[I_{27}]$	$[I_{27}] = [J_{27}]$
3	$[I_{26}]$	$[I_{26}] = [J_{26}]$
4	$[I_{25}]$	$[I_{25}] = [J_{25}]$
5	$[\dot{V}_{24}]$	$[\dot{V}_{24}] = [\dot{V}_{25}] + [\bar{Z}_{24,25}][I_{25}]\sqrt{3}$
6	$[I_{24}]$	$[I_{24}] = ([\bar{Z}_{23,24}]^{-1}([\dot{V}_{23}] - [\dot{V}_{24}]))/\sqrt{3}$
7	$[I_{23}]$	$[I_{23}] = [J_{23}]$
8	$[I_{22}]$	$[I_{22}] = [J_{22}]$
9	$[I_{21}]$	$[I_{21}] = [J_{21}]$
10	$[\dot{V}_{20}]$	$[\dot{V}_{20}] = [\dot{V}_{21}] + [\bar{Z}_{20,21}][I_{21}]\sqrt{3}$
11	$[I_6]$	$[I_6] = ([\bar{Z}_{5,6}]^{-1}([\dot{V}_5] - [\dot{V}_6]))/\sqrt{3}$
12	$[I_5]$	$[I_5] = [I_6] + [I_{24}]$
13	$[\dot{V}_4]$	$[\dot{V}_4] = [\dot{V}_5] + [\bar{Z}_{4,5}][I_5]\sqrt{3}$
14	$[I_4]$	$[I_4] = ([\bar{Z}_{3,4}]^{-1}([\dot{V}_3] - [\dot{V}_4]))/\sqrt{3}$
15	$[I_3]$	$[I_3] = [I_4] + [I_{23}]$
16	$[\dot{V}_2]$	$[\dot{V}_2] = [\dot{V}_3] + [\bar{Z}_{2,3}][I_3]\sqrt{3}$
17	$[I_2]$	$[I_2] = [I_1]$
18	$[J_4]$	$[J_4] = [I_4] - [I_5]$
19	$[I_7]$	$[I_7] = [I_6] - [I_{26}]$
20	$[\dot{V}_7]$	$[\dot{V}_7] = [\dot{V}_6] - [\bar{Z}_{6,7}][I_7]\sqrt{3}$
21	$[I_8]$	$[I_8] = ([\bar{Z}_{7,8}]^{-1}([\dot{V}_7] - [\dot{V}_8]))/\sqrt{3}$
22	$[I_9]$	$[I_9] = [I_8] - [J_8]$
23	$[\dot{V}_9]$	$[\dot{V}_9] = [\dot{V}_8] - [\bar{Z}_{8,9}][I_9]\sqrt{3}$
24	$[I_{10}]$	$[I_{10}] = ([\bar{Z}_{9,10}]^{-1}([\dot{V}_9] - [\dot{V}_{10}]))/\sqrt{3}$
25	$[I_{11}]$	$[I_{11}] = [I_{10}] - [J_{10}]$
26	$[\dot{V}_{11}]$	$[\dot{V}_{11}] = [\dot{V}_{10}] - [\bar{Z}_{10,11}][I_{11}]\sqrt{3}$

Tabel 4. 2 Urutan Perhitungan dari *Hamiltonian Path* (lanjutan)/

s_j	X_j	$f(\Psi_k(X_j))$
27	$[\dot{I}_{12}]$	$[\dot{I}_{12}] = ([\bar{Z}_{11,12}]^{-1}([\dot{V}_{11}] - [\dot{V}_{12}]))/\sqrt{3}$
28	$[\dot{I}_{13}]$	$[\dot{I}_{13}] = [\dot{I}_{12}] - [\dot{I}_{27}]$
29	$[\dot{V}_{13}]$	$[\dot{V}_{13}] = [\dot{V}_{12}] - [\bar{Z}_{12,13}][\dot{I}_{13}]\sqrt{3}$
30	$[\dot{I}_{14}]$	$[\dot{I}_{14}] = ([\bar{Z}_{13,14}]^{-1}([\dot{V}_{13}] - [\dot{V}_{14}]))/\sqrt{3}$
31	$[\dot{I}_{15}]$	$[\dot{I}_{15}] = [\dot{I}_{14}] - [\dot{I}_{14}]$
32	$[\dot{V}_{15}]$	$[\dot{V}_{15}] = [\dot{V}_{14}] - [\bar{Z}_{14,15}][\dot{I}_{15}]\sqrt{3}$
33	$[\dot{I}_{16}]$	$[\dot{I}_{16}] = ([\bar{Z}_{15,16}]^{-1}([\dot{V}_{15}] - [\dot{V}_{16}]))/\sqrt{3}$
34	$[\dot{I}_{17}]$	$[\dot{I}_{17}] = [\dot{I}_{16}] - [\dot{I}_{16}]$
35	$[\dot{V}_{17}]$	$[\dot{V}_{17}] = [\dot{V}_{16}] - [\bar{Z}_{16,17}][\dot{I}_{17}]\sqrt{3}$
36	$[\dot{I}_{18}]$	$[\dot{I}_{18}] = ([\bar{Z}_{17,18}]^{-1}([\dot{V}_{17}] - [\dot{V}_{18}]))/\sqrt{3}$
37	$[\dot{I}_{19}]$	$[\dot{I}_{19}] = [\dot{I}_{18}] - [\dot{I}_{28}]$
38	$[\dot{V}_{19}]$	$[\dot{V}_{19}] = [\dot{V}_{18}] - [\bar{Z}_{18,19}][\dot{I}_{19}]\sqrt{3}$
39	$[\dot{I}_{20}]$	$[\dot{I}_{20}] = ([\bar{Z}_{19,20}]^{-1}([\dot{V}_{19}] - [\dot{V}_{20}]))/\sqrt{3}$
40	$[\dot{J}_{20}]$	$[\dot{J}_{20}] = [\dot{I}_{20}] - [\dot{I}_{21}]$
41	$[\dot{J}_{24}]$	$[\dot{J}_{24}] = [\dot{I}_{24}] - [\dot{I}_{25}]$
42	$[\dot{J}_{19}]$	$[\dot{J}_{19}] = [\dot{I}_{19}] - [\dot{I}_{20}]$
43	$[\dot{J}_{17}]$	$[\dot{J}_{17}] = [\dot{I}_{17}] - [\dot{I}_{18}]$
44	$[\dot{J}_{15}]$	$[\dot{J}_{15}] = [\dot{I}_{15}] - [\dot{I}_{16}]$
45	$[\dot{J}_{13}]$	$[\dot{J}_{13}] = [\dot{I}_{13}] - [\dot{I}_{14}]$
46	$[\dot{J}_{11}]$	$[\dot{J}_{11}] = [\dot{I}_{11}] - [\dot{I}_{12}]$
47	$[\dot{J}_9]$	$[\dot{J}_9] = [\dot{I}_9] - [\dot{I}_{10}]$
48	$[\dot{J}_7]$	$[\dot{J}_7] = [\dot{I}_7] - [\dot{I}_8]$

Setelah didapatkan persamaan dari *hamiltonian path* maka *state estimation* dapat dijalankan.

Hasil simulasi *state estimation* dengan metode *hamiltonian cycle* dapat dilihat pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, dan Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Hasil Simulasi *State Estimation* Penyulang Tegalsari dengan Memperllihatkan Estimasi Tegangan

No Bus	Tegangan			Sudut		
	Estimasi (kV)	Load Flow (kV)	Error (%)	Estimasi (°)	Load Flow (°)	Error (%)
1	20,0000	20,0000	0,0000	0	0	0,00
2	19,9964	19,9964	0,0000	0,001	0,001	0,00
3	19,9916	19,9916	0,0000	0,0024	0,0024	0,00
4	19,9914	19,9914	0,0000	0,0025	0,0025	0,00
5	19,9902	19,9902	0,0000	0,0028	0,0028	0,00
6	19,9888	19,9888	0,0000	0,0032	0,0032	0,00
7	19,9881	19,9881	0,0000	0,0034	0,0034	0,00
8	19,9870	19,9870	0,0000	0,0037	0,0037	0,00
9	19,9861	19,9861	0,0000	0,0039	0,0039	0,00
10	19,9826	19,9826	0,0000	0,0049	0,0049	0,00
11	19,9820	19,9820	0,0000	0,0051	0,0051	0,00
12	19,9800	19,9800	0,0000	0,0057	0,0057	0,00
13	19,9794	19,9794	0,0000	0,0058	0,0058	0,00
14	19,9749	19,9749	0,0000	0,0071	0,0071	0,00
15	19,9717	19,9717	0,0000	0,008	0,008	0,00
16	19,9715	19,9715	0,0000	0,0081	0,0081	0,00
17	19,9691	19,9691	0,0000	0,0087	0,0087	0,00
18	19,9689	19,9689	0,0000	0,0088	0,0088	0,00
19	19,9685	19,9685	0,0000	0,0089	0,0089	0,00
20	19,9684	19,9684	0,0000	0,0089	0,0089	0,00
21	19,9684	19,9684	0,0000	0,0089	0,0089	0,00
22	19,9964	19,9964	0,0000	0,001	0,001	0,00
23	19,9916	19,9916	0,0000	0,0024	0,0024	0,00

Tabel 4. 3 Hasil Simulasi *State Estimation* Penyulang Tegalsari dengan Memperlihatkan Estimasi Tegangan

No Bus	Tegangan			Sudut		
	Estimasi (kV)	Load Flow (kV)	Error (%)	Estimasi (°)	Load Flow (°)	Error (%)
24	19,9901	19,9901	0,0000	0,0028	0,0028	0,00
25	19,9901	19,9901	0,0000	0,0028	0,0028	0,00
26	19,9888	19,9888	0,0000	0,0032	0,0032	0,00
27	19,9800	19,9800	0,0000	0,0057	0,0057	0,00
28	19,9688	19,9688	0,0000	0,0088	0,0088	0,00

Tabel 4. 4 Hasil Simulasi *State Estimation* Penyulang Tegalsari dengan Memperlihatkan Estimasi Daya yang Mengalir Pada Line

No bus		Daya Aktif			Daya Reaktif		
From	To	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)
GI	1	2474,10	2474,10	0,00	1532,38	1532,38	0,00
1	2	2473,53	2473,63	0,00	1532,16	1532,15	0,00
2	3	2259,95	2260,05	0,00	1399,88	1399,87	0,00
3	4	2046,92	2047,02	0,00	1267,87	1267,85	0,00
4	5	1910,93	1910,90	0,00	1183,50	1183,51	0,00
5	6	1647,78	1647,78	0,00	1020,14	1020,14	0,00
6	7	1605,22	1605,22	0,00	993,77	993,78	0,00
7	8	1562,62	1562,63	0,00	967,40	967,39	0,00
8	9	1392,56	1392,57	0,00	862,36	862,36	0,00
9	10	1307,33	1307,33	0,00	809,56	809,56	0,00
10	11	1222,28	1222,28	0,00	756,86	756,86	0,00
11	12	1086,17	1086,17	0,00	672,52	672,52	0,00
12	13	950,14	950,14	0,00	588,22	588,22	0,00

Tabel 4. 4 Hasil Simulasi *State Estimation* Penyulang Tegalsari dengan Memperlihatkan Estimasi Daya yang Mengalir Pada Line(lanjutan)

No bus		Daya Aktif			Daya Reaktif		
From	To	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)
13	14	886,17	886,17	0,00	548,61	548,61	0,00
14	15	750,05	750,05	0,00	464,26	464,26	0,00
15	16	644,05	644,04	0,00	398,43	398,41	0,01
16	17	622,72	622,71	0,00	385,22	385,20	0,01
17	18	452,63	452,71	0,02	280,06	280,20	0,05
18	19	282,62	282,70	0,03	175,06	175,20	0,08
19	20	240,65	240,20	0,19	149,65	148,86	0,53
20	21	27,20	27,20	0,00	16,86	16,86	0,00
2	22	213,00	213,00	0,00	132,00	132,00	0,00
3	23	213,00	213,00	0,00	132,00	132,00	0,00
5	24	263,02	263,00	0,01	163,30	163,30	0,00
24	25	127,00	127,00	0,00	79,02	79,02	0,00
6	26	42,50	42,50	0,00	26,34	26,34	0,00
12	27	136,00	136,00	0,00	84,29	84,28	0,00
18	28	170,00	170,00	0,00	105,00	105,00	0,00

Tabel 4. 5 Hasil Simulasi *State Estimation* Penyulang Tegalsari dengan Memperlihatkan Estimasi Daya yang Mengalir ke Beban

No Bus Beban	Daya Aktif			Daya Reaktif		
	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)
4	135,88	136,00	0,09	84,30	84,00	0,36
7	42,51	42,00	1,22	26,33	26,00	1,29
8	170,00	170,00	0,00	105,00	105,00	0,00

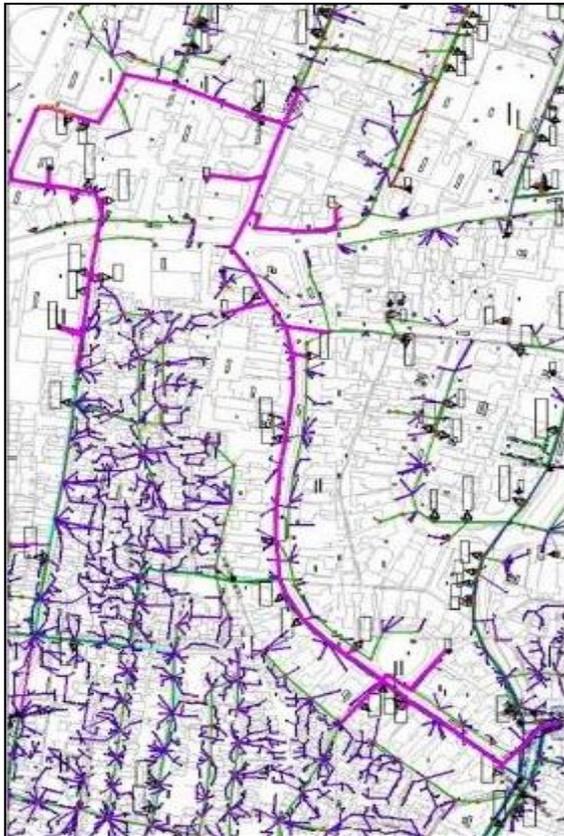
Tabel 4. 5 Hasil Simulasi *State Estimation* Penyulang Tegalsari dengan Memperlihatkan Estimasi Daya yang Mengalir ke Beban

No Bus Beban	Daya Aktif			Daya Reaktif		
	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)	Estimasi (kW)	Load Flow (kW)	Error (%)
9	84,99	85,00	0,01	52,68	53,00	0,60
10	85,00	85,00	0,00	52,68	53,00	0,61
11	136,00	136,00	0,00	84,28	84,00	0,33
13	63,75	64,00	0,39	39,51	40,00	1,22
14	136,00	136,00	0,00	84,29	84,00	0,34
15	105,99	106,00	0,01	65,82	66,00	0,27
16	21,25	21,00	1,20	13,17	13,00	1,31
17	170,09	170,00	0,05	105,16	105,00	0,15
19	41,97	42,00	0,07	25,41	26,00	2,27
20	213,45	213,00	0,21	132,79	132,00	0,60
21	27,20	27,00	0,74	16,86	17,00	0,84
22	213,00	213,00	0,00	132,00	132,00	0,00
23	213,00	213,00	0,00	132,00	132,00	0,00
24	136,02	136,00	0,02	84,28	84,00	0,34
25	127,00	127,00	0,00	79,02	79,00	0,02
26	42,50	42,00	1,19	26,34	26,00	1,30
27	136,00	136,00	0,00	84,29	84,00	0,34
28	170,00	170,00	0,00	105,00	105,00	0,00

Berdasarkan data hasil running simulasi *state estimation* dengan metode *hamiltonian cycle* dari penyulang Tegalsari didapatkan data magnitude dan sudut tegangan yang sesuai atau mendekati 0%. Sedangkan data daya aktif maupun reaktif memiliki *error* yang kecil. *Error* paling besar untuk daya aktif dan reaktif yang mengalir pada line yaitu 0,19% dan 0,53%. Untuk yang mengalir ke beban yaitu 1,22% dan 2,27%. Proses program *state estimation* ini rata rata berlangsung dalam 0.172108 detik.

4.3 Pemrograman dann Hasil Simulasi di *Geographic Information System (GIS)*

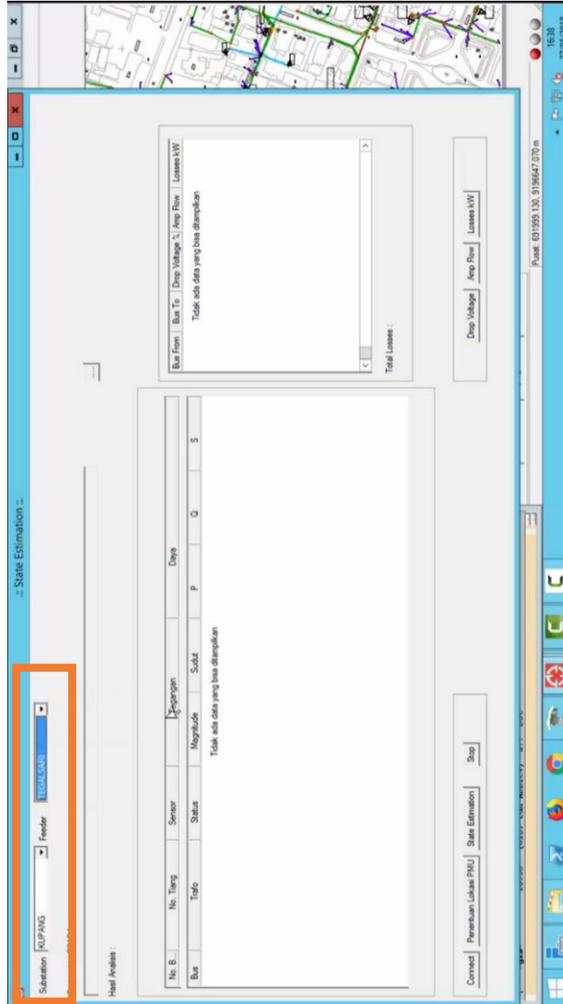
Pada subbab sebelumnya telah dipaparkan hasil simulasi dari estimator *Hamiltonian Cycle* yang telah dibuat dengan software MATLAB. Selanjutnya, diintegrasikan dengan GIS. *Geographic Information System (GIS)* berfungsi untuk memonitoring dengan visual berbentuk peta. Ditunjukkan penyulang Tegalsari dengan garis berwarna ungu. Garis warna hijau merupakan jaringan tegangan rendahnya, sedangkan garis biru, jaringan yang menghubungkan ke beban-beban.



Gambar 4. 3 Tampilan peta penyulang Tegalsari pada GIS

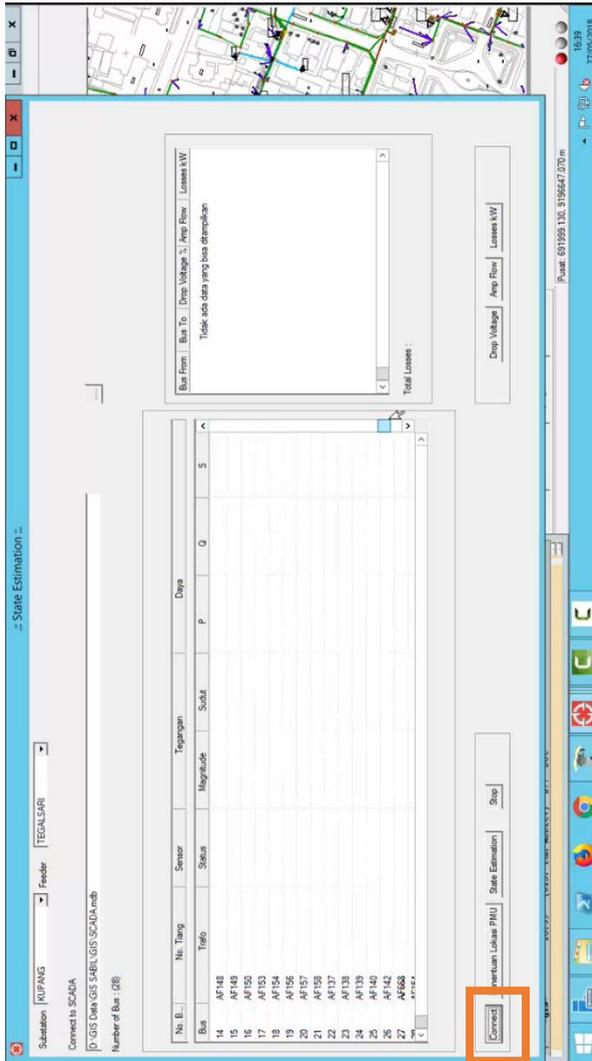
Dalam hal ini parameter yang dimonitoring adalah daya yang mengalir ke beban hasil dari *state estimation*.

Berikut langkah langkah dalam menjalankan estimator *Hamiltonian Cycle* pada GIS. Pilih *substation* dan penyulang yang akan diestimasi.



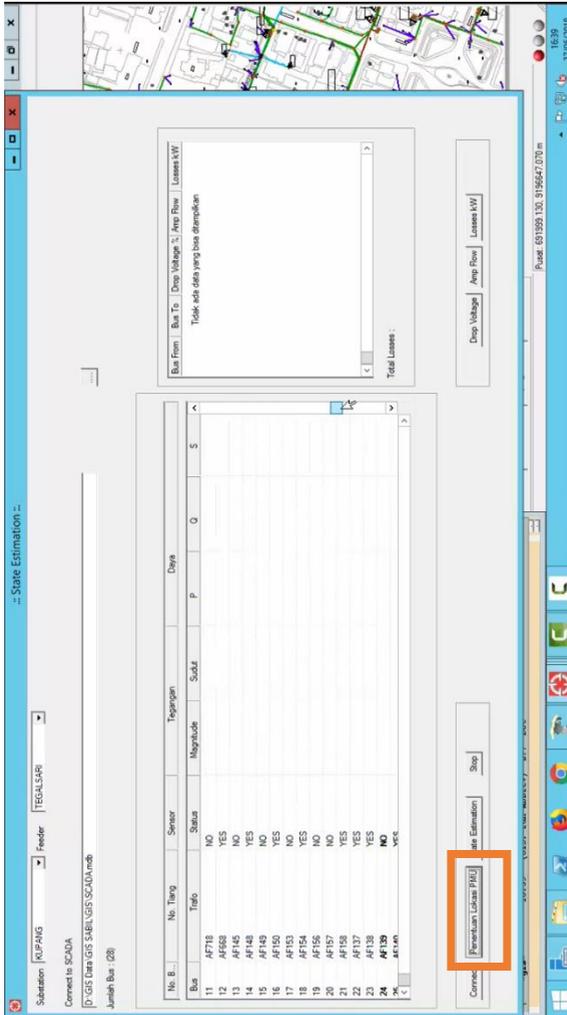
Gambar 4. 4 Tampilan memilih *substation* dan penyulang

Kemudian klik “Connect” untuk mengkoneksikan estimator dengan peta geografis, akan muncul nomer bus beserta kode tiang dan trafo pada setiap bus tersebut.



Gambar 4. 5 Tampilan klik “Connect”

Sebelum melakukan estimasi, dilakukan terlebih dahulu penempatan PMU, maka dapat dilakukan dengan mengklik “Penentuan Lokasi PMU”. Tampilan penempatan PMU ditunjukkan dengan YES pada trafo atau nomor tiang, sedangkan yang tidak terdapat PMU maka NO (Gambar 4.1).



Gambar 4. 6 Tampilan penempatan PMU pada GIS

Untuk memulai estimasi dengan cara klik “State Estimation”. Data hasil yang tertampil pada tabel adalah magnitude dan sudut tegangan bus, daya aktif dan reaktif.

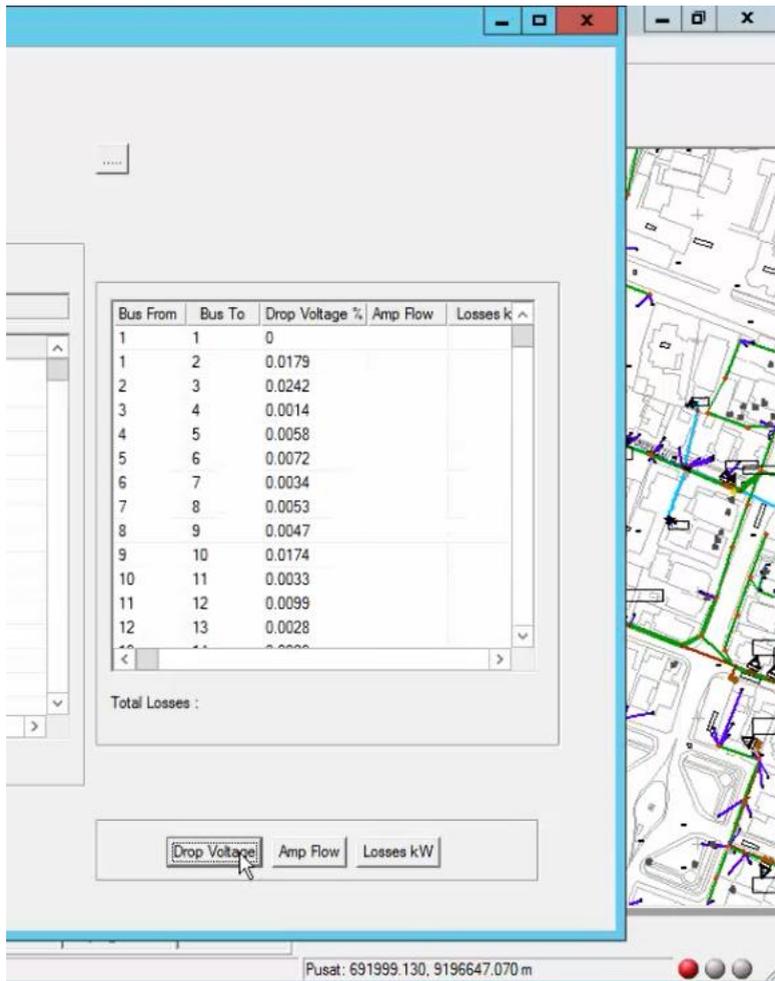
The screenshot displays the 'State Estimation' results in a software application. The main window shows a table with the following data:

No. B.	No. Tang.	Sensor	Tegangan	Daya	Q	S
Bus	Ideto	Status	Magnitude	P	Q	S
15	AF149	NO	15.57172	105.59	65.82	124.76
16	AF150	YES	19.57147	21.25	13.17	25.00
17	AF153	NO	19.96914	170.09	105.16	199.97
18	AF154	YES	19.96887	0.00	0.00	0.00
19	AF156	NO	19.96849	41.97	25.41	49.06
20	AF157	NO	19.96842	0.0089	213.45	21.79
21	AF158	NO	19.96842	0.0089	213.45	21.79
22	AF137	YES	19.96841	0.0103	213.00	250.58
23	AF138	YES	19.99157	0.0204	213.00	250.59
24	AF139	NO	19.99014	0.0209	136.02	84.28
25	AF140	YES	19.99007	0.0209	127.00	79.02
26	AF142	YES	19.98875	0.0322	42.50	26.24
27	AF168	YES	19.97995	0.0097	136.00	84.29
28	AF154	YES	19.96882	0.0088	170.00	105.00

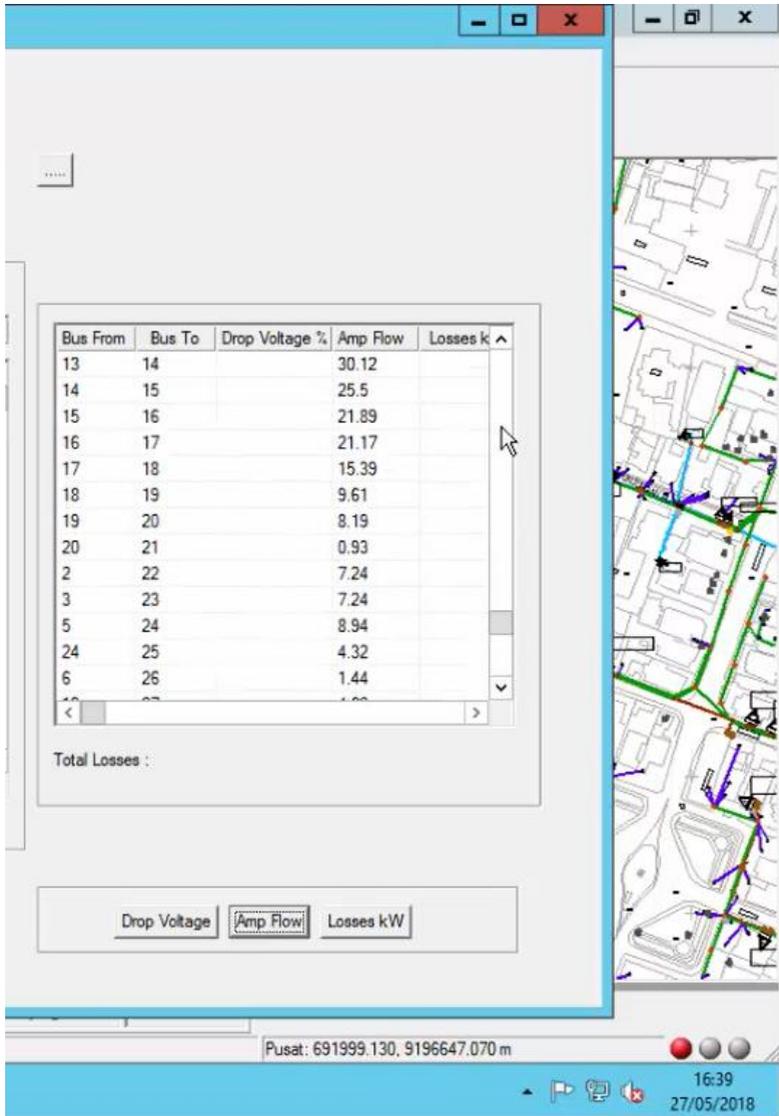
Below the table, there are buttons for 'Perencanaan Lokasi PI', 'State Estimation', and 'Stop'. The 'State Estimation' button is highlighted with a red box. To the right of the table, there are additional controls for 'Drop Voltage', 'Amp Flow', and 'Losses kW'. At the top right, there is a map showing the geographical layout of the system.

Gambar 4. 7 Tampilan setelah *state estimation* dijalankan

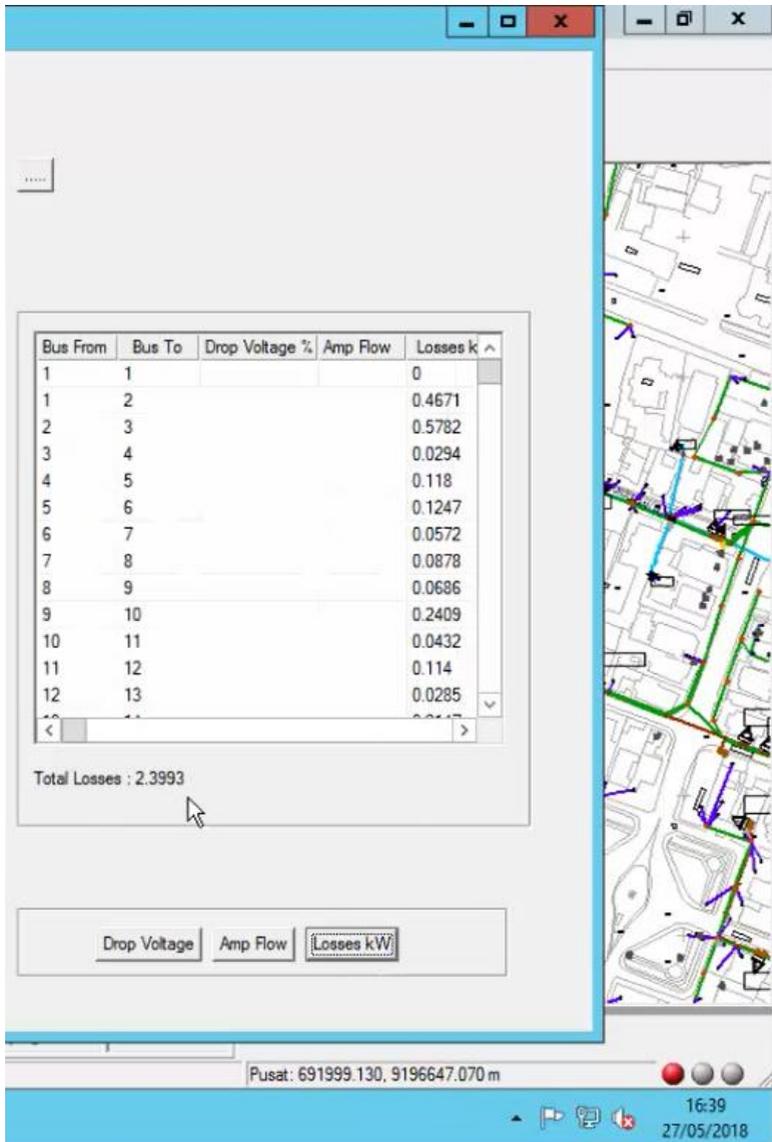
Dengan hasil tersebut, didapatkan juga nilai drop tegangan, arus dan *losses* tiap jaringan dengan cara klik tombol kanan bawah sesuai yang diinginkan.



Gambar 4. 8 Menampilkan drop tegangan



Gambar 4. 9 Menampilkan arus yang mengalir pada jaringan



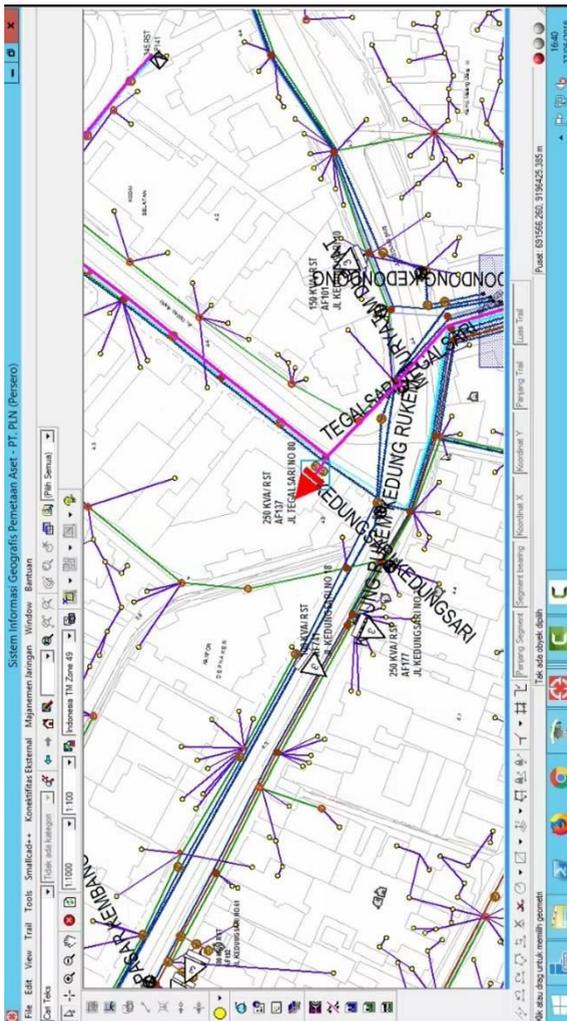
Gambar 4. 10 Menampilkan *losses kW* dan *total losses*

Selain itu data rating dan historis trafo dapat dilihat dalam GIS tersebut, dengan cara klik dua kali pada bus yang diinginkan.



Gambar 4. 11 Tampilan data rating dan historis trafo

Untuk mengetahui lokasi terpasangnya PMU pada bus dengan cara klik dua kali pada bus yang dipilih, maka akan ditampilkan lokasi bus yang terdapat PMU dengan warna merah kotak biru.



Gambar 4. 12 Tampilan lokasi trafo yang terdapat PMU pada GIS

Dengan demikian, dapat dilakukan monitoring pada sistem distribusi secara visual. Lokasi trafo yang terdapat PMU dapat sebagai pertimbangan non teknis dari analisis berikutnya. Hasil analisis tersebut dapat digunakan untuk mempertimbangkan pengembangan sistem selanjutnya dan untuk memperbaiki jaringan kelistrikan jika terdapat gangguan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. *State estimation* dengan metode *Hamiltonian Cycle* menghasilkan estimasi tegangan dengan *error* yang mendekati 0%. Sedangkan hasil estimasi daya aktif dan reaktif memiliki *error* yang kecil. *Error* paling besar untuk daya aktif dan reaktif yang mengalir pada line yaitu 0,19% dan 0,53%. Untuk yang mengalir ke beban yaitu 1,22% dan 2,27%.
2. Dengan *Geographic Information System (GIS)* mampu menampilkan lokasi peletakan sensor pengukuran pada gardu atau bus dan daya aktif serta reaktif hasil estimasi
3. Sensor pengukuran dapat dikurangi sebesar 39,29% dari total PMU yang terpasang, atau 11 dari 28 PMU.

5.2 Saran

Berikut saran yang diberikan untuk perbaikan dan pengembangan topik pada tugas akhir ini :

1. Untuk penelitian selanjutnya metode ini dapat diterapkan pada sistem distribusi aktif dan topologi network yang berbeda.
2. Diharapkan perhitungan *error* pada sensor pengukuran dapat dipertimbangkan agar mendekati *real case* di lapangan.

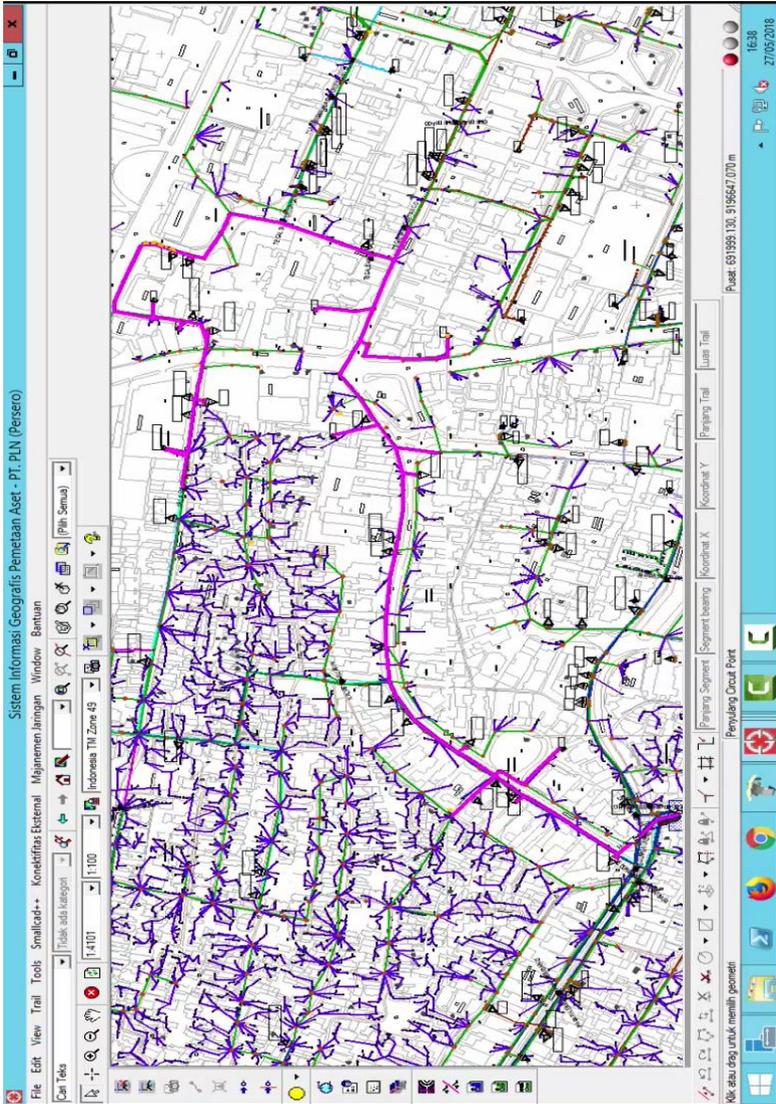
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. Setyarso, O. Penangsang, and R. S. Wibowo, "Penentuan Daya Reaktif Untuk Perbaikan Kualitas Daya Berdasarkan Voltage State Estimation Pada Jaringan Distribusi Radial 20 KV Di Surabaya," *J. Tek. ITS*, vol. 2, no. 2, pp. B153–B158, 2013.
- [2] J. B. Leite and J. R. S. Mantovani, "Distribution system state estimation using the Hamiltonian cycle theory," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 366–375, 2016.
- [3] L. Liu, C. Sun, Q. Zhou, L. Gu, and Q. Deng, "A novel electrical equipment on-line monitoring system based on geographic information system," in *Electrical Insulating Materials, 2001.(ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium on*, 2001, pp. 205–208.
- [4] O. Penangsang, *Analisis Aliran Daya*. ITS Press, Surabaya, 2006.
- [5] F. Wildan Arif (terakhir), "Pengembangan Software Analisis Aliran Daya Berbasis Geographical Information System GIS pada Jaringan Distribusi Radial Menggunakan Metode Zbr," Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, 2015.
- [6] A. Soeprijanto, *Desain Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*. Surabaya: ITS Press, 2012.
- [7] H. Saadat, *Power system analysis*. McGraw-Hill, 1999.
- [8] Setiyo Wibowo, Dimas dan Taufik Yuliadi, Arif, *pengembangan modul praktikum sistem monitoring mikro scada tahap II*. Surabaya: Jurusan teknik elektro fakultas teknologi industri institut teknologi sepuluh nopember, 2013.
- [9] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*, vol. 1. Springer, 2017.
- [10] K. K. Sekaran, "Power system state estimation," Memorial University of Newfoundland, 2008.
- [11] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Shebl, *Power Generation, Operation, and Control*. Wiley, 2013.

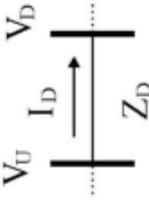
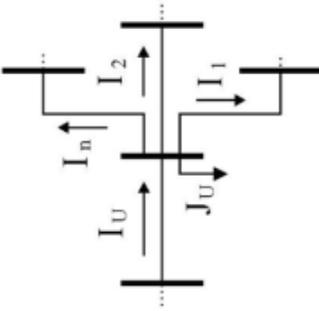
- [12] Wira Candra Nur Pratama, Ontoseno Penangsang, Rony Seto Wibowo, "Penentuan Lokasi Pengukuran untuk State Estimation pada Jaringan Distribusi Menggunakan Teknik Dekomposisi," Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, 2014.
- [13] S. Billakanti and C. Venkaiah, "An effective binary integer linear programmed approach for optimal placement of PMUs in power systems," in *Smart Electric Grid (ISEG), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 1–8.
- [14] N. R. Shivakumar and A. Jain, "A Review of Power System Dynamic State Estimation Techniques," *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 2008

LAMPIRAN



Lampiran 1. Gambar GIS Penyulang Tegalsari

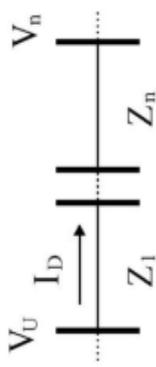
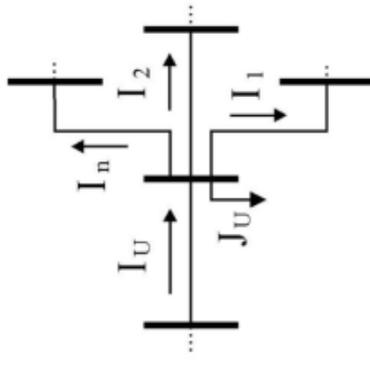
Lampiran 2. Tabel Model Matematis Penyelesaian *Hamiltonian State estimation*

Mode	Model jaringan	State yang diperlukan	Model perhitungan	Persamaan
Down ward		$\Psi_1(\dot{V}_0) = \{\dot{V}_0, i_0\}$	$\begin{aligned} [\dot{V}_0] &= [\dot{V}_0] + [Z_{00}][i_0]\sqrt{3} \\ &= f(\Psi_1(\dot{V}_0)) \end{aligned}$	(1)
		$\Psi_2(i_0) = \left\{ i_0, \bigcup_{i=1}^n i_i \right\}$	$\begin{aligned} [i_0] &= [i_0] + \sum_{i=1}^n [i_i] \\ &= f(\Psi_2(i_0)) \end{aligned}$	(2)

Lampiran 2. Tabel Model Matematis Penyelesaian *Hamiltonian State estimation* (lanjutan)

Mode	Model jaringan	State yang diperlukan	Model perhitungan	Persamaan
Upward		$\Psi_3(i_0) = \{i_0, j_0, \bigcup_{i=1}^m i_i\}$	$[i_0] = [i_0] - [j_0] - \sum_{i=1}^m [i_i]$ $= f(\Psi_3(i_0))$	(3)
		$\Psi_4(\hat{v}_0) = \{\hat{v}_0, j_0\}$	$[\hat{v}_0] = [\hat{v}_0] - [Z_0][j_0]\sqrt{3}$ $= f(\Psi_4(\hat{v}_0))$	(4)

Lampiran 2. Tabel Model Matematis Penyelesaian *Hamiltonian State estimation* (lanjutan)

Mode	Model jaringan	State yang diperlukan	Model perhitungan	Persamaan
Upward / Downward		$\Psi_5(i_b) = \{V_U, V_n\}$	$[i_b] = \left(\sum_{i=1}^n [Z_i] \right)^{-1} ([\dot{V}_U] - [\dot{V}_n]) \sqrt{3}$ $= f(\Psi_5(i_b))$	(5)
		$\Psi_6(j_b) = \left\{ I_U, \bigcup_{i=1}^n I_i \right\}$	$[j_b] = i_b - \sum_{i=1}^n [i_i] = f(\Psi_6(j_b))$	(6)

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama lengkap Sabila Bagus Panuntun. Dilahirkan di Kebumen pada tanggal 28 Agustus 1995 oleh pasangan Ibu Siti Partiyatun dan Bapak Muktasim. Riwayat pendidikan pertama di SDIT Al-Madinah, Kebumen sampai dengan 2008 kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengahnya di SMPN 1 Kebumen sampai dengan 2011 dan melanjutkan pendidikan menengah atasnya di SMAN 1 Kebumen hingga lulus pada tahun 2014. Sejak tahun 2014 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Elektro, Fakultas Teknologi

Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, program studi Teknik Sistem Tenaga. Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif di keorganisasian ITS yang meliputi SOSMAS BEM ITS, Karya Salemba ITS dan aktif sebagai asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik (PSSL). Penulis aktif dalam kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat.

Halaman ini sengaja dikosongkan