

**ANALISA PERFORMANSI METODE *VECTORIZED ALGORITHM*
PADA ANALISA ALIRAN DAYA BERBASIS INJEKSI DAYA DAN
INJEKSI ARUS**

(Skripsi)

Oleh

AHMAD WIRA SATRIAWAN



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

ABSTRAK

ANALISA PERFORMANSI METODE *VECTORIZED ALGORITHM* PADA ALIRAN DAYA BERBASIS INJEKSI DAYA DAN INJEKSI ARUS

Oleh

AHMAD WIRA SATRIAWAN

Tugas akhir ini mengajukan penelitian terhadap performansi dari beberapa metode analisa aliran daya. Analisa aliran daya dilakukan menggunakan metode *vectorized algorithm* (format polar dan rektangular) berbasis injeksi daya dan injeksi arus. Metode iterasi perhitungan aliran daya yang digunakan adalah metode *Newton-Raphson*. Performansi metode analisa aliran daya akan dilihat berdasarkan kecepatan komputasi, jumlah iterasi, dan nilai tegangan hasil perhitungan. Dengan demikian, dapat ditentukan metode yang efektif dalam menyelesaikan permasalahan studi kasus aliran daya pada sistem tenaga listrik. Simulasi perhitungan dilakukan menggunakan metode ini pada beberapa kasus, yaitu IEEE 14 *Bus*, 30 *bus*, 57 *bus*, 118 *bus*, dan IEEE 300 *Bus System Case* serta Penyulang Kangkung 191 *Bus*, Gardu Induk Menggala Mesuji, Lampung. Perbandingan performansi antara metode *vectorized algorithm* pada aliran daya adalah hasil dari tugas akhir ini.

Kata Kunci: aliran daya, vectorized algorithm, Newton-Raphson, format polar, format rektangular, injeksi daya, injeksi arus

ABSTRACT

THE PERFORMANCE ANALYSIS OF VECTORIZED ALGORITHM METHOD IN THE POWER FLOW BASED ON POWER INJECTION AND CURRENT INJECTION

By

AHMAD WIRA SATRIAWAN

This thesis proposes research on the performance of various power flow analysis methods. Power flow analysis is conducted using vectorized algorithm method in polar form and rectangular form based-on power injection and current injection. Power flow calculation iteration method used is the Newton-Raphson method. The performance of this method is evaluated based on computation speed, number of iteration, and the voltage value of calculation result. Therefore, the effectiveness of the method to solve problem of power flow study case on electric power system could be determined. Simulation of this calculation method is conducted on various cases, those are IEEE 14 bus, 30 bus, 57 bus, 118 bus, 300 bus test cases and Kangkung feeder 191 bus from Menggala substation, Lampung. The performance comparison of various vectorized algorithm in the power flow are the results of this thesis.

Keywords: power flow, vectorized algorithm, Newton-Raphson, polar form, rectangular form, power injection, current injection.

**ANALISA PERFORMANSI METODE *VECTORIZED ALGORITHM*
PADA ANALISA ALIRAN DAYA BERBASIS INJEKSI DAYA DAN
INJEKSI ARUS**

Oleh
AHMAD WIRA SATRIAWAN

Skripsi
**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**
Pada
**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

**Judul Proposal Skripsi : ANALISA PERFORMANSI METODE
VECTORIZED ALGORITHM PADA
ANALISA ALIRAN DAYA BERBASIS
INJEKSI DAYA DAN INJEKSI ARUS**

Nama Mahasiswa : Ahmad Wira Satriawan

Nomor Pokok Mahasiswa : 1315031009

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

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

Khairuddin, S.T., M.Sc., Ph.D., Eng.
NIP. 19700719 20002 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

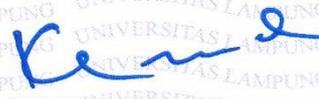
Ketua

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



Sekretaris

: Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D., Eng.



Penguji

bukan Pembimbing

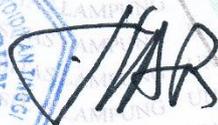
: Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T.



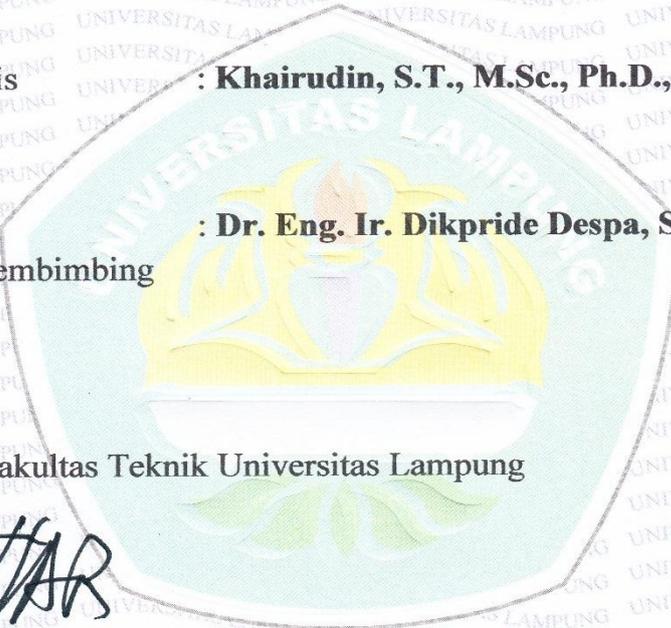
2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19620717 198703 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 September 2017



SURAT PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 09 Oktober 2017




Ahmad Wira Satriawan
NPM 1315031009

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Prabumulih, 20 April 1995. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Erman Dwijaya dan Ibu Miswati.

Riwayat pendidikan penulis yaitu TK YWKA pada tahun 2000 hingga tahun 2001. SDN 18 Muara Enim, pada tahun 2001 hingga tahun 2007, SMPN 1 Unggulan Muara Enim, pada tahun 2007 hingga tahun 2010, SMKN 2 Muara Enim, pada tahun 2010 hingga tahun 2013.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2013 melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah probabilitas dan statistika dan menggambar teknik pada tahun 2016. Penulis juga terdaftar sebagai koordinator asisten Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik sejak tahun 2016 dan menjadi asisten praktikum AST pada tahun 2017. Selain itu, penulis aktif di lembaga kemahasiswaan yang ada di Jurusan Teknik Elektro yaitu sebagai sekretaris departemen sosial dan kewirausahaan selama satu periode kepengurusan yaitu pada tahun 2014-2015 dan pada periode kedua yaitu sebagai kepala divisi pendidikan pada tahun 2015-2016. Pada 1 Agustus – 2 September 2016, penulis melaksanakan kerja praktik (KP) di PT. Bukit Asam Tanjung Enim dengan mengangkat judul “Sistem Kontrol dan Koordinasi Relay Proteksi Panel Distribusi A03 pada MSS Tambang Air Laya PT. Bukit Asam Tanjung Enim ”.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah Puji Syukur Kehadirat Allah SWT.

Atas Izin dan Ridho Nya

Karya ini kupersembahkan untuk

Ayah Tercinta dan Ibu Tercinta

Erman Dwijaya dan Miswati

Saudaraku tersayang

Jaka Ihsan Pratama

M. Iqbal Anugerah

M. Akbar Aditya

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater.



MOTTO

..... Sesungguhnya shalatku, ibadahku, hidupku, dan matiku hanyalah untuk Allah, Tuhan semesta alam.

(Q.S. Al-An-'am(6): 162)

Mukmin yang kuat lebih dicintai oleh Allah Subhanahu wa ta'ala daripada mukmin yang lemah

(H.R. Muslim)

Barang siapa yang menempuh suatu jalan untuk menuntut ilmu, Allah akan memudahkan baginya jalan ke surga

(H.R. Muslim)

Ilmu itu lebih baik daripada harta. Ilmu menjaga engkau dan engkau menjaga harta. Ilmu itu penghukum (hakim) dan hata itu terhukum.

(Ali bin Abi Tholib)

Never give up, we have Allah subhanahu wa ta'ala who will always help us. Just ikhtiar and tawakal, in syaa Allah, you'll find the way

(Anonim)



SANWACANA

Segala Puji bagi Allah SWT atas nikmat kesehatan dan kesempatan serta kemudahan yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Sholawat serta salam selalu penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai suri teladan bagi umat manusia.

Tugas Akhir dengan judul “Analisa Performansi Metode *Vectorized Algorithm* Pada Aliran Daya Berbasis Injeksi Daya dan Injeksi Arus” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayahnya hingga saya dapat menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P. selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Suharno, M.Sc., Phd. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.

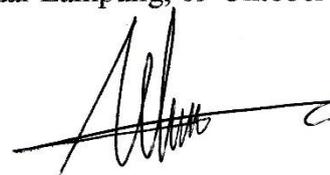
6. Bapak Khairudin, S.T., M.Sc. Ph.D., Eng selaku pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dengan baik dan ramah.
7. Ibu Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
8. Ibu Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, dan bimbingan yang membangun bagi penulis dalam mempersiapkan diri menjadi seorang Sarjana Teknik.
9. Segenap Dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis.
10. Segenap Staff di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal-hal lainnya.
11. Bapak dan Ibu tercinta, bapak Erman Dwijaya dan Ibu Miswati, Kakak, Adik dan keluarga besar dari mamah dan bapak atas kasih sayang, dukungan serta doanya yang selalu diberikan kepada penulis.
12. Segenap Penghuni Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik Pak Rahman, Annisa, Jenni, Fandi, Fitra, Yogi, Ibnu, Ferdian, Kak Surya, dan Kak Aji, Sulton, Ubai, Kak Windu, Gusti, Nabila, Pitia, Wahyu, Ebot, Rafi, Jeshu, Septi, Arief, dan Deddy.
13. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro Universitas Lampung 2013 khususnya Agus, Faif, Hanif, Deri, Marwan, Dimas, Agum, Andi dengkul,

Danu, Fasyin, Yona, Niken, Nurul, Ilham, Satria, serta teman-teman lainnya.

14. Kakak-kakak tingkat dan adik-adik tingkat yang telah memberikan ilmu dan semangat, serta doa yang terbaik buat saya.
15. Teman-teman yang telah memberikan kenangan indah semasa hidup, Adik-adik tingkat, warga dan teman-teman KKN Negeri Kapayungan Pubian Vina, Ruri, Annisa, Mira, Rendi, dan Angger yang telah mendoakan.
16. Teman-teman Fossi FT dan seluruh LDK Unila.
17. Teman-teman Lemkari Karate.
18. Semua pihak yang membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran konstruktif dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 09 Oktober 2017



Ahmad Wira Satriawan

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
LEMBAR PENGESAHAN	v
SURAT PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Tugas Akhir	2
1.3. Perumuan Masalah	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat	3
1.6. Hipotesis	4
1.7. Sistematika Penulisan	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

1.1. Analisa Aliran Daya

1.1.1. Formulasi Umum Aliran Daya	6
1.1.2. Dasar Metode Newton Raphson	10
1.1.3. Metode <i>Sparse Vector</i>	14
1.1.4. Metode <i>Fast-Decoupled</i>	16
1.1.5. Metode Eliminasi Gauss	20

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	24
3.2. Alat dan Bahan.....	25
3.3. Metode Penelitian	25
3.4. Diagram Alir Penelitian	27
3.5 Metode <i>Vectorized Algorithm</i>	28
3.5.1 Metode <i>Vectorized Algorithm</i> Injeksi Daya	28
3.5.2 Metode <i>Vectorized Algorithm</i> Injeksi Arus	31
3.6. Proses Perhitungan Program	33
3.7. Diagram Alir Simulasi Program Metode <i>Vectorized Algorithm</i> Berbasis Injeksi Daya	34
3.8. Diagram Alir Simulasi Program Metode <i>Vectorized Algorithm</i> Berbasis Injeksi Arus	35

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil	36
4.1.1. Konvergensi Hasil Simulasi Perhitungan Aliran Daya ...	42
4.1.2. Perbandingan Hasil Perhitungan Simulasi Aliran Daya ..	49
4.2. Pembahasan	54

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	59
5.2. Saran	60

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A

LAMPIRAN B

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram garis tunggal impedansi sistem tenaga listrik	6
Gambar 2.2 Sifat konvergensi antara metode <i>Fast-Decoupled</i> dan <i>Newton-Raphson</i>	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir	27
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Program Metode <i>Vectorized Algorithm</i> Berbasis Injeksi Daya	35
Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi Program Metode <i>Vectorized Algoritihm</i> Berbasis Injeksi Arus	36
Gambar 4.1. <i>One line diagram</i> IEEE 14 Bus system case	38
Gambar 4.2. <i>One line diagram</i> IEEE 30 Bus system case	39
Gambar 4.3. <i>One line diagram</i> IEEE 57 Bus system case	40
Gambar 4.4. Penjulung Kangkung 191 Bus GI Menggala	41
Gambar 4.5. <i>One line diagram</i> IEEE 300 Bus System Case	42
Gambar 4.6. <i>One line diagram</i> IEEE 118 Bus system case	43
Gambar 4.7. Konvergensi <i>vectorized algorithm</i> terhadap studi aliran daya IEEE 14 Bus	44
Gambar 4.8. Konvergensi <i>vectorized algorithm</i> terhadap studi aliran daya IEEE 30 Bus	45
Gambar 4.9. Konvergensi <i>vectorized algorithm</i> terhadap studi aliran daya IEEE 57 Bus	46

Gambar 4.10. Konvergensi <i>vectorized algorithm</i> terhadap studi aliran daya IEEE 118 <i>Bus</i>	47
Gambar 4.11. Konvergensi <i>vectorized algorithm</i> terhadap studi aliran daya IEEE 300 <i>Bus</i>	47
Gambar 4.12. Konvergensi <i>vectorized algorithm</i> terhadap studi aliran daya penjulung Kangkung GI Menggala 191 <i>Bus</i>	49
Gambar 4.13. Selisih nilai tegangan hasil perhitungan terhadap data tegangan IEEE 14 <i>Bus System Case</i>	50
Gambar 4.14. Selisih nilai tegangan hasil perhitungan terhadap data tegangan IEEE 30 <i>Bus System Case</i>	51
Gambar 4.15. Selisih nilai tegangan hasil perhitungan terhadap data tegangan IEEE 57 <i>Bus System Case</i>	52
Gambar 4.16. Selisih nilai tegangan hasil perhitungan terhadap data tegangan IEEE 118 <i>Bus System Case</i>	52
Gambar 4.17. Selisih nilai tegangan hasil perhitungan terhadap data tegangan IEEE 300 <i>Bus System Case</i>	53
Gambar 4.18. Selisih nilai tegangan hasil perhitungan terhadap data tegangan hasil perhitungan program UnilaPF	54
Gambar 4.19. Susunan matriks <i>jacobian</i> sistem <i>System Case 14 Bus</i>	58

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal aktivitas penelitian tugas akhir	24
Tabel 4.1. Jumlah iterasi dan tingkat konvergen metode <i>vectorized algorithm</i> injeksi daya dalam bentuk Polar dan Rektangular.	43
Tabel 4.2. Jumlah iterasi dan tingkat konvergen metode <i>vectorized algorithm</i> injeksi arus dalam bentuk Polar dan Rektangular	44
Tabel 4.3. Jumlah elemen <i>non-zero</i> matriks <i>jacobian</i> pada sistem <i>System Case 14 Bus</i> pada masing-masing metode	57

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

A.1. Data IEEE14, 30, 57, 118, dan 300 Bus System Case

- Tabel A.1.1. Data awal IEEE 14 *Bus System Case*
- Tabel A.1.2. Data awal IEEE 30 *Bus System Case*
- Tabel A.1.3. Data awal IEEE 57 *Bus System Case*
- Tabel A.1.4. Data awal IEEE 118 *Bus System Case*
- Tabel A.1.5. Data awal IEEE 300 *Bus System Case*

A.2. Data Penyulang Kangkung GI Menggala Lampung 191 Bus

- Tabel A.2.1. Data awal penyulang Kangkung GI Menggala 191 *Bus*

LAMPIRAN B

B.1. Selisih Nilai Tegangan Terhadap Data IEEE Bus System Case

- Tabel B.1.1. Selisih nilai tegangan saat studi aliran daya IEEE 14 *Bus*
- Tabel B.1.2. Selisih nilai tegangan saat studi aliran daya IEEE 30 *Bus*
- Tabel B.1.3. Selisih nilai tegangan saat studi aliran daya IEEE 57 *Bus*
- Tabel B.1.4. Selisih nilai tegangan saat studi aliran daya IEEE 118 *Bus*
- Tabel B.1.5. Selisih nilai tegangan saat studi aliran daya IEEE 300 *Bus*

B.2. Selisih Nilai Tegangan Pada Kasus Penyulang Kangkung GI Menggala Terhadap Data Simulasi UnilaPF

- Tabel B.2.1. Selisih nilai tegangan saat studi aliran daya penyulang Kangkung GI Menggala

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Analisa aliran daya merupakan suatu studi dalam melakukan perhitungan aliran daya pada sistem tenaga listrik. Analisa aliran daya sangat penting dilakukan, terutama dalam menyelidiki permasalahan pada sistem operasi dan perencanaan sistem tenaga listrik. Berdasarkan nilai dari suatu generator dan struktur transmisi jaringan listrik, maka dapat menentukan nilai tegangan, arus, dan aliran daya pada setiap titik percabangan pada jaringan listrik dengan melakukan perhitungan analisa aliran daya [1]. Pada zaman dengan teknologi yang semakin pesat dan pertambahan populasi penduduk, maka kebutuhan listrik akan semakin meningkat, sehingga dibutuhkan pemasangan jaringan listrik yang semakin meluas dan permintaan daya listrik yang semakin besar. Dalam hal ini, analisa aliran daya merupakan salah satu solusi utama dalam menentukan perencanaan sistem tenaga listrik kedepan.

Pada umumnya, analisa aliran daya merupakan suatu metode numerik dalam menyelesaikan permasalahan aliran daya. Perhitungan numerik tersebut dilakukan secara berulang hingga memperoleh nilai *mismatch* yang mendekati nol. Terdapat 3 metode dalam menyelesaikan perhitungan persamaan aliran daya, antara lain metode *Gauss-Seidel*, *Newton Raphson*, dan *Fast Decoupled*. Di antara ketiga metode tersebut, metode *Newton Raphson* sangat baik digunakan untuk penyelesaian persamaan aliran daya [2]. Oleh karena itu penulis melakukan perhitungan analisa aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson*. Metode *Newton Raphson* sebelumnya dilakukan secara konvensional dan kemudian banyak peneliti yang mengembangkan metode tersebut. Pada tugas akhir ini, penulis akan menggunakan metode pengembangan dari *Newton Raphson* dan melihat kinerjanya dalam menyelesaikan persamaan aliran daya. Pada penelitian

sebelumnya [3], persamaan aliran daya yang konvensional dapat diubah ke dalam bentuk *vectorized* untuk membuat persamaan aliran daya menjadi lebih sederhana. Persamaan aliran daya dapat dilakukan menggunakan persamaan injeksi daya dan injeksi arus dengan dua bentuk format perhitungan, yaitu polar dan rektangular. Berdasarkan penelitian mengenai metode injeksi arus [4], metode ini cukup efisien dan tingkat konvergensinya baik. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis akan membahas metode *Vectorized Algorithm* Berbasis Injeksi Daya dan Injeksi Arus dalam format polar maupun rektangular untuk melihat perbedaan performansi pada kedua metode tersebut.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini, yaitu :

1. Mengetahui tingkat konvergensi metode *vectorized algorithm* berbasis injeksi daya dan injeksi arus dalam menyelesaikan studi aliran daya.
2. Membandingkan dan menganalisa performansi antara metode *vectorized algorithm* injeksi daya dengan metode *vectorized algorithm* injeksi arus dalam format polar dan rektangular.
3. Menentukan metode yang efektif dan efisien antara metode *vectorized algorithm* injeksi daya dengan metode *vectorized algorithm* injeksi arus dalam format polar dan rektangular.

1.3. Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tugas akhir ini terkait pada tingkat akurasi dan konvergen dalam analisa aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik. Umumnya, pada metode *Newton Raphson* konvensional, persamaan aliran daya dalam bentuk persamaan injeksi daya dalam format polar maupun rektangular. Dalam bentuk vektorisasi, metode injeksi daya cukup konvergen dalam menyelesaikan studi aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik. Namun, pada studi aliran daya dengan jumlah *bus* yang sangat banyak, metode injeksi daya membutuhkan iterasi yang cukup banyak untuk

mencapai konvergen. Dalam menyelesaikan permasalahan tersebut, persamaan aliran daya dapat diubah ke dalam bentuk persamaan aliran arus atau bisa disebut dengan metode injeksi arus. *Mismatch* pada metode injeksi arus adalah arus *schedule* dikurang dengan arus injeksi, sehingga *mismatch* antara metode injeksi arus dan injeksi daya pasti akan berbeda, begitu juga dengan tingkat konvergensi dari kedua metode tersebut. Untuk mengetahui metode mana yang lebih efektif, maka pada tugas akhir ini, penulis akan membandingkan metode *vectorized* injeksi daya dan injeksi arus dalam format polar dan rektangular terhadap beberapa kasus studi aliran daya.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini, antara lain

1. Tugas akhir ini membahas kinerja dari metode *vectorized algorithm* injeksi daya dan injeksi arus dalam perhitungan analisis aliran daya.
2. Tidak membahas bahasa algoritma pemrograman.
3. Melakukan pengujian kinerja perhitungan program menggunakan data IEEE 14 *Bus*, IEEE 30 *Bus*, IEEE 57 *Bus*, IEEE 118 *Bus*, dan IEEE 300 *bus* [5], serta Penjulung Kangkung GI Menggala 191 *Bus* [6].
4. Membandingkan dan menentukan performansi dari metode perhitungan analisis aliran daya menggunakan metode *vectorized algorithm* berbasis injeksi daya dan injeksi arus dalam format polar dan rektangular.

1.5. Manfaat

Adapun manfaat tugas akhir ini, yaitu

1. Memberikan pemahaman baru kepada penulis tentang metode - metode yang lebih efisien dalam menyelesaikan persamaan aliran daya.
2. Memberikan pengetahuan kepada penulis dalam membuat algoritma pemrograman untuk menyelesaikan persamaan aliran daya.

3. Dapat mengetahui perbandingan performansi antara metode *vectorized algorithm* berbasis injeksi daya dan injeksi arus dalam format polar dan rektangular.
4. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lainnya dalam mengembangkan atau mengaplikasikan penelitian ini.

1.6. Hipotesis

Analisis Performansi *Vectorized Algorithm* Pada Aliran Daya Berbasis Injeksi Daya dan Injeksi Arus merupakan pengembangan dari metode *Newton Raphson* dalam melakukan perhitungan persamaan aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik. Pada kedua metode tersebut, berdasarkan injeksinya, metode injeksi arus memiliki tingkat konvergensi yang baik dan menyelesaikan studi aliran daya lebih cepat [7]. Dapat diasumsikan bahwa, metode *vectorized algorithm* injeksi arus dapat menyelesaikan studi aliran daya lebih cepat dibandingkan metode injeksi daya. Namun, perlu diketahui bahwa metode *Newton Raphson* terbagi menjadi dua format perhitungan, yaitu polar dan rektangular, sehingga masing-masing metode *vectorized algorithm* akan terbagi menjadi dua format perhitungan. Kedua format perhitungan tersebut akan mempengaruhi tingkat konvergen pada masing-masing metode [8]. Oleh karena itu, untuk mengetahui perbandingan konvergensi pada kedua metode *vectorized algorithm*, perlu dilakukan percobaan studi aliran daya dalam beberapa kasus dengan menggunakan format polar dan rektangular. Pada tugas akhir ini, kasus yang digunakan, yaitu IEEE 14 Bus, IEEE 30 bus, IEEE 57 bus, IEEE 118 bus, dan IEEE 300 Bus System Case, serta Penjulung Kangkung GI Menggala 191 Bus. Berdasarkan hasil simulasi dari beberapa kasus tersebut, maka dapat disimpulkan metode yang lebih efektif .

1.7. Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab, yaitu :

1. BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan latar belakang, masalah, tujuan tugas akhir, manfaat tugas akhir, perumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

2. BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan beberapa teori pendukung dan referensi materi tugas akhir yang diambil dari berbagai sumber buku dan penelitian ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

3. BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat, alat dan bahan, metode, dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

4. BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil data simulasi dan pembahasan dari tugas akhir ini.

5. BAB V. KESIMPULAN

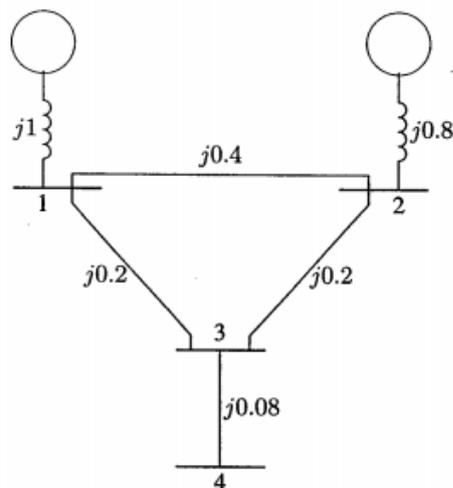
Pada bab ini menjelaskan kesimpulan yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan dari tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisa Aliran Daya

2.1.1 Formulasi Umum Aliran Daya

Persamaan pada suatu sistem dapat diformulasikan secara sistematis dalam beberapa metode. Metode tegangan simpul merupakan metode yang sesuai dan biasa digunakan untuk banyak analisa sistem tenaga. Formulasi untuk admitansi simpul pada saluran dalam bentuk persamaan linear aljabar diikuti dengan arus simpul. Saat arus simpul diketahui, maka persamaan linear untuk menghitung tegangan simpul dapat langsung diselesaikan. Namun, nyatanya pada sistem tenaga, nilai daya pada setiap titik simpul (*bus*) lebih diketahui dari pada arus. Sehingga, bentuk persamaan ini diketahui sebagai persamaan aliran daya dengan bentuk persamaan *non linear* dan harus diselesaikan dengan metode iterasi [9].



Gambar 1.1 Diagram garis tunggal impedansi sistem tenaga listrik [9].

Langkah awal dalam melakukan analisa aliran daya adalah menghitung nilai admitansi pada masing-masing *bus*. Admitansi (Y) merupakan invers dari impedansi pada saluran, sehingga $Y = 1/Z$, dimana Z adalah impedansi saluran. Tegangan dan vektor arus injeksi pada setiap *bus* dapat direpresentasikan seperti persamaan (2.1) di bawah ini.

$$V = Z \cdot I \text{ dan } I = V \cdot Y \quad (2.1)$$

Daya kompleks yang diinjeksikan ke setiap percabangan atau *bus*(simpul) merupakan representasi dari tegangan dan arus konjuget pada masing-masing *bus* tersebut [10], sehingga

$$S = V \cdot I^* \text{ dan } I = S^* / V^* \quad (2.2)$$

Selain itu, hal utama dalam melakukan analisa aliran daya, perlunya klasifikasi jenis *bus* yang ada pada sistem tenaga listrik. Terdapat 3 jenis *bus* pada sistem tenaga listrik, yaitu sebagai berikut [1].

1. *Swing Bus*

Pada analisa aliran daya harus terdapat satu *swing bus* yang merupakan simpul referensi terhadap simpul lainnya . simpul ini dapat berupa generator atau *power grid*. Biasanya pada diagram garis tunggal sistem tenaga listrik, generator dengan kapasitas daya paling besar merupakan *swing bus*. Pada simpul ini, parameter yang diketahui adalah nilai magnitude dan sudut fasa, sedangkan daya aktif dan daya reaktif perlu dihitung.

2. *PV Bus*

Pada simpul ini, parameter yang diketahui adalah daya reaktif dan magnitude tegangan, sedangkan daya reaktif dan sudut fasa perlu dihitung. Pada simpul ini, harus terdapat peralatan yang bisa mengontrol daya reaktif dan magnitude tegangan, oleh karena itu simpul generator cocok sebagai *PV bus*. Selain itu, gardu induk atau gardu distribusi juga dapat dijadikan sebagai *PV bus* jika memiliki kapasitas daya reaktif yang cukup.

3. PQ Bus

Pada simpul ini, parameter yang diketahui adalah daya reaktif dan daya aktif, sedangkan magnitude tegangan dan sudut perlu dihitung. Pada sistem tenaga listrik, simpul beban dapat dijadikan sebagai *PQ bus*.

Perhitungan aliran daya dapat juga sekurang-kurangnya sebagai perhitungan terhadap magnitude tegangan dan sudut fasa pada setiap *bus*, jika daya kompleks pada masing-masing *bus* sudah diketahui. Daya kompleks pada masing-masing *bus* dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan tegangan kompleks. Tegangan kompleks dapat direpresentasikan dalam dua bentuk, yaitu polar dan rektangular.

$$P_i + jQ_i = \bar{V}_i \sum_{j \in I} Y_{ij} V_{ij}, (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.3)$$

$j \in I$ merupakan representasi dari simpul i ke simpul j , termasuk $j=i$. Dalam bentuk polar dan rektangular, V kompleks ditulis seperti pada persamaan (2.4) dan (2.5).

$$\bar{V}_i = V_i e^{j\theta_i} \text{ (Polar)} \quad (2.4)$$

$$\bar{V}_i = e_i + jf_i \text{ (Rectangular)} \quad (2.5)$$

Dimana V_i, θ_i adalah magnitude tegangan dan sudut fasa pada simpul i , sedangkan e_i, jf_i adalah tegangan real dan imajiner pada simpul i . Dengan begitu, elemen dari matriks admitansi dapat ditulis seperti pada persamaan (2.6).

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.6)$$

G_{ij} dan jB_{ij} merupakan nilai *real* dan *imaginer* pada admitansi dari simpul i ke j , Sehingga persamaan aliran daya kompleks adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i e^{j\theta_i} \sum_{j \in I} (G_{ij} - jB_{ij}) V_j e^{-j\theta_j} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.7)$$

Diketahui bahwa,

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (2.8)$$

Sehingga,

$$P_i + jQ_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} - jB_{ij})(\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.9)$$

θ_{ij} pada persamaan (2.9) adalah $\theta_i - \theta_j$ atau selisih sudut fasa antara bus i dan bus j . Dalam bentuk polar, maka persamaan kompleks untuk daya aktif dan daya reaktif dapat ditulis seperti pada persamaan (2.10).

$$\left. \begin{aligned} P_i &= V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i &= V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.10)$$

Dalam bentuk *rectangular*,

$$e_i = V_i \cos \theta_i \quad f_i = V_i \sin \theta_i \quad (2.11)$$

Sehingga persamaan daya aktif dan daya reaktif dalam bentuk *rectangular*,

$$\left. \begin{aligned} P_i &= e_i \sum_{j \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j \in i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i &= f_i \sum_{j \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.12)$$

Kedua persamaan (2.10) dan (2.12) adalah persamaan simultan *non linear* dari tegangan phasor di bus i . Kedua persamaan tersebut biasanya direpresentasikan dalam suatu persamaan aliran daya seperti persamaan (2.13) dan (2.14).

Bentuk *polar*,

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Bentuk *rectangular*,

}

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= P_{is} - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j \in i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - f_i \sum_{j \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0\end{aligned}\quad (2.14)$$

Dimana P_{is} dan Q_{is} adalah daya aktif dan reaktif yang diketahui pada bus i .

2.1.2 Metode Newton Raphson

Metode *Newton Raphson* adalah metode yang efisien dalam menyelesaikan persamaan *nonlinear*. Metode ini dapat mengubah proses penyelesaian persamaan *nonlinear* ke bentuk proses persamaan *linear*. Proses linearisasi tersebut merupakan inti dari metode *Newton Raphson* [1].

Pada sub-bab sebelumnya, terdapat dua persamaan aliran daya untuk setiap bus, yaitu (2.13) dan (2.14). jika perhitungan aliran daya menggunakan bentuk *polar* (2.13), maka magnitude tegangan dan sudut fasa pada masing-masing bus adalah variabel yang harus dihitung. Untuk PV bus, magnitude tegangan sudah diketahui dan daya reaktif Q_{is} adalah variabel yang perlu dihitung. Namun, pada kondisi ini persamaan aliran daya reaktif baru dapat digunakan ketika perhitungan vektor magnitude tegangan dan sudut fasa pada PV bus sudah konvergen. Begitu juga pada *Swing Bus*, variabel *magnitude* tegangan dan sudut fasa sudah diketahui, sehingga persamaan aliran daya aktif dan reaktif tidak perlu dilakukan selama proses iterasi sebelum mencapai iterasi yang konvergen ($mismatch \leq 0$). *Mismatch* adalah nilai selisih antara nilai daya atau arus dari hasil perhitungan pada iterasi baru dengan nilai daya atau arus dari hasil perhitungan pada iterasi sebelumnya.

Asumsikan terdapat suatu sistem tenaga listrik dengan jumlah bus sebanyak n dan total PV bus sebanyak r . Anggap *Swing bus* berada pada bus terakhir, misalnya bus n . Artinya, sistem tenaga listrik tersebut mempunyai sebanyak $n-1$ jumlah persamaan daya aktif.

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= P_{1s} - V_1 \sum_{j \in 1} V_j (G_{1j} \cos \theta_{1j} + B_{1j} \sin \theta_{1j}) = 0 \\ \Delta P_2 &= P_{2s} - V_2 \sum_{j \in 1} V_j (G_{2j} \cos \theta_{2j} + B_{2j} \sin \theta_{2j}) = 0 \\ &\vdots \\ \Delta P_{n-1} &= P_{n-1s} - V_{n-1} \sum_{j \in n-1} V_j (G_{n-1j} \cos \theta_{n-1j} + B_{n-1j} \sin \theta_{n-1j}) = 0 \quad (2.15)\end{aligned}$$

Dan jumlah persamaan daya reaktif sebanyak $n - r - 1$.

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= Q_{1s} - V_1 \sum_{j \in i} V_j (G_{1j} \sin \theta_{1j} - B_{1j} \cos \theta_{1j}) = 0 \\ \Delta Q_2 &= Q_{2s} - V_2 \sum_{j \in 2} V_j (G_{2j} \sin \theta_{2j} - B_{2j} \cos \theta_{2j}) = 0 \\ &\vdots \\ \Delta Q_{n-1} &= Q_{n-1s} - V_{n-1} \sum_{j \in n-1} V_j (G_{n-1j} \sin \theta_{n-1j} - B_{n-1j} \cos \theta_{n-1j}) = 0 \quad (2.16)\end{aligned}$$

Pada persamaan (2.16), nilai magnitudo V_i dan sudut fasa θ_i adalah variabel yang perlu dihitung. Pada kondisi ini, jumlah θ_i sebanyak $n - 1$ dan jumlah V_i sebanyak $n - r - 1$. Jadi, ada total $2n - r - 2$ variabel yang belum diketahui dan semua variabel tersebut dapat dihitung sebanyak $2n - r - 2$.

Berdasarkan persamaan (2.15) dan (2.16) jika dibentuk dalam bentuk matriks *jacobian*, maka persamaan matematis yang benar dapat ditulis seperti matriks pada persamaan (2.17).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1,n-1} & \vdots & N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1,n-1} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2,n-1} & \vdots & N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots \\ H_{n-1,1} & H_{n-1,2} & \cdots & H_{n-1,n-1} & \vdots & N_{n-1,1} & N_{n-1,2} & \cdots & N_{n-1,n-1} \\ \vdots & \vdots \\ J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1,n-1} & \vdots & L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1,n-1} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2,n-1} & \vdots & L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots \\ J_{n-1,1} & J_{n-1,2} & \cdots & J_{n-1,n-1} & \vdots & L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \cdots & L_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \Delta V_1/\Delta V_1 \\ \Delta V_2/\Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1}/\Delta V_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Secara harpiah, maka akan diperoleh persamaan dari setiap elemen pada matriks (2.17), yaitu :

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad (j \neq i) \quad (2.18)$$

$$H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = V_i^2 B_{ii} + Q_i, \quad (2.19)$$

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} V_j = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad (j \neq i) \quad (2.20)$$

$$N_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} V_i = -V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (2.21)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad (j \neq i) \quad (2.22)$$

$$J_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (2.23)$$

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} V_j = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad (j \neq i) \quad (2.24)$$

$$L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} V_i = V_i^2 B_{ii} - Q_i \quad (2.25)$$

Matriks pada persamaan (2.17) dapat direpresentasikan dalam bentuk sederhana seperti persamaan (2.26) di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Berbeda jika persamaan aliran daya dihitung dalam bentuk *rectangular*. Nilai *real* dan *imaginer* pada tegangan yang akan dihitung, yaitu $e_1, f_1, e_2, f_2, \dots, e_n, f_n$. Jika sudut fasa tegangan pada *swing bus* diketahui, maka jumlah dari variabel tetap sebanyak $2(n - 1)$, sehingga ada $2(n - 1)$ persamaan yang harus diselesaikan. Pada analisis aliran daya, pada *swing bus* hanya ada satu persamaan matematis, sedangkan pada *bus* lainnya memiliki dua persamaan, sama halnya pada PQ *bus*. P_{is} dan Q_{is} diketahui, maka bentuk persamaan untuk PQ *bus* adalah seperti pada persamaan (2.14)

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j \in i} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - f_i \sum_{j \in i} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

PV *bus*, P_{is} dan V_{is} diketahui sehingga persamaan pada *bus* ini adalah

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j \in i} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \\ \Delta V_i^2 &= V_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Dalam bentuk matriks *jacobian* persamaan aliran daya untuk PQ *bus* dan PV *bus* dapat direpresentasikan seperti matriks pada persamaan (2.29).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta V_i^2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_i} & \dots \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_i} & \dots \\ \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f_i} & \dots \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial f_i} & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_1} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial f_i} & \dots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta e_i \\ \Delta f_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Secara harpiah, jika elemen dari matriks (2.29) diturunkan dengan mengacu pada persamaan (2.26) dan (2.27). Elemen *off-diagonal* dari matriks *jacobian* (2.29) untuk $j \neq i$ dapat ditulis seperti persamaan (2.30) berikut.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = -(G_{ij}e_i + B_{ij}f_i) ; \quad \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial e_j} = -\frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial f_j} = 0 \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = (B_{ij}e_i - G_{ij}f_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Elemen matriks diagonal *jacobian* untuk $j = i$,

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} = -\sum_{j \in i} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - G_{ii}e_i - B_{ii}f_i \quad (2.31)$$

2.1.3 Metode *Sparse Vector*

Metode *sparse vector* hingga pada saat ini banyak digunakan untuk meyelesaikan perhitungan analisa aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan jumlah besar. Pada prinsipnya, *sparse vector* dapat digunakan untuk matriks dengan jumlah elemen penuh maupun jarang [1]. Pada sub bab sebelumnya sudah dibahas tentang matriks *Y bus* dari suatu jaringan sistem tenaga listrik. Jika matriks *Y bus* merupakan matriks *sparse* (jarang), maka persamaan tegangan simpul (*bus*) dapat dilihat pada persamaan (2.32) di bawah ini.

$$YV = I \quad (2.32)$$

Pada umumnya, Y adalah matriks berelemen penuh dengan ordo $n \times n$ yang dapat difaktorisasikan menjadi

$$Y = LVU \quad (2.33)$$

Dimana L dan U adalah matriks segitiga bawah dan segitiga atas dengan kesatuan diagonal, dengan D adalah matriks diagonal. Hal tersebut akan menjadi mudah untuk menyelesaikan perhitungan matriks persamaan tegangan pada masing-masing *bus*. Sebagai contoh, persamaan linear simultan dapat ditulis seperti persamaan (2.34) berikut.

$$LDUV = I \quad (2.34)$$

Rumus (2.34) dapat dipisahkan seperti persamaan (2.35) di bawah ini.

$$LX = I \quad (2.35)$$

$$DW = X \quad (2.36)$$

$$UV = W \quad (2.37)$$

Nilai V akan diperoleh ketika persamaan (2.34) – (2.36) dapat diselesaikan secara berurutan. Jika Y adalah matriks yang simetris, maka matriks U merupakan matriks *transpose* dari matriks L . Jika matriks Y bukan simetris, maka matriks U bukan matriks *transpose* dari matriks L , namun keduanya sama pada struktur *sparse*.

Sebagai contoh, persamaan (2.38) merupakan persamaan linear simultan.

$$\begin{aligned} V_1 \quad \quad \quad +V_4 &= 0 \\ \quad \quad V_2 \quad \quad +2V_4 &= 1 \\ \quad \quad \quad V_3 \quad +V_4 &= 0 \\ V_1 +2V_2 +V_3 \quad +V_4 &= 0 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Maka tabel faktor persamaan linear simultan dari persamaan (2.38) adalah

$$\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & -5 \end{array} \quad (2.39)$$

Memisahkan tabel faktor (2.39), diperoleh

$$L = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ 0 & 1 & & \\ 0 & 0 & 1 & \\ 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & -5 \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 2 \\ & & 1 & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Kemudian, menghitung matriks *transpose right-hand spare vector* dari persamaan linear simultan di atas.

$$B = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (2.41)$$

Berdasarkan elemen pada matriks L , kolom k pada matriks L dapat diabaikan. Pada contoh ini, nilai elemen b_1 bernilai nol, maka dapat dilewati proses eliminasi untuk kolom 1 matriks L . Untuk *sparse vector* ini, proses eliminasi dimulai dari kolom 2

matriks L . Menggunakan persamaan (1.37) dibawah, maka matriks *transpose* dari B dapat dihitung.

$$b_i^{(k)} = b_i^{(k-1)} - l_{ik} \times b_k^{(k)}, (i = k + 1, \dots, n) \quad (2.42)$$

Sehingga,

$$B' = [0 \quad 1 \quad 0 \quad -1]^T \quad (2.43)$$

Langkah selanjutnya eliminasi pada kolom 3 matriks L . Nilai b_3' bernilai nol, maka eliminasi untuk kolom ke 3 dapat dilewati. Jadi, proses eliminasi dilanjutkan ke kolom 4 matriks L , sehingga diperoleh

$$B'' = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 1/5]^T \quad (2.44)$$

Ketika semua kolom matriks L sudah dieliminasi, maka selanjutnya adalah menghitung nilai V_i . jika hanya V_3 yang ingin dihitung, maka operasi substitusi dengan baris pertama dan kedua matriks U dapat diabaikan. Jika hanya V_2 yang ingin dihitung, maka operasi substitusi dengan baris pertama matriks U bisa dihindari. Selain itu, operasi substitusi dengan baris ke 3 matriks U juga bisa dihilangkan, menimbang nilai $b_3' = 0$. Oleh karena itu, substitusi untuk menghitung nilai V_2 dapat dilakukan dengan hanya melibatkan elemen baris ke 2 matriks U .

$$V_2 = b_2'' - u_{24} \times b_4'' = 1 - 2 \times \frac{1}{5} = \frac{3}{5} \quad (2.45)$$

Berdasarkan contoh perhitungan (2.38-2.45), maka inti dari metode *sparse vector* adalah mengidentifikasi subset yang aktif dari matriks L dan U .

2.1.4. Metode *Fast-Decoupled*

Dasar dari metode *Fast-Decoupled* merupakan ekspresi dari simpul daya yang sebagai fungsi dari variabel tegangan dalam format polar atau secara terpisah, menyelesaikan persamaan daya aktif dan reaktif (2.9) dengan menggunakan *mismatch* daya aktif untuk menghitung sudut fasa tegangan dan menggunakan *mismatch* daya reaktif untuk menghitung magnitude tegangan.

Pada pembahasan metode *Newton-Raphson*, inti dari aliran daya metode *Newton* adalah menyelesaikan persamaan matriks (2.26) dalam format polar seperti yang ditulis pada persamaan (2.46).

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= H\Delta\theta + N\Delta V/V \\ \Delta Q &= J\Delta\theta + L\Delta V/V \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Berdasarkan beberapa pengalaman dalam perhitungan aliran daya, dapat dinyatakan bahwa nilai komponen N dan J pada matriks (2.26) biasanya bernilai relatif kecil. Oleh karena itu, untuk membuat persamaan menjadi lebih sederhana maka komponen N dan J dapat diabaikan, sehingga

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= H\Delta\theta \\ \Delta Q &= L\Delta V/V \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

Hal terpenting selanjutnya untuk menyederhanakan metode *Newton* adalah memperkirakan bahwa koefisien matriks pada persamaan (2.47) dapat konstan dan simetris. Seperti pada sudut fasa tegangan pada sistem transmisi biasanya tidak akan berbeda terlalu jauh (tidak melebihi $10^\circ \sim 20^\circ$), maka

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_{ij} &\approx 1 \\ G_{ij} \sin \theta_{ij} &\ll B_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

Selanjutnya, admitansi B_{Li} yang terhubung dengan simpul daya reaktif jauh lebih kecil dari pada bilangan imajiner pada simpul admitansi itu sendiri. Contoh pada persamaan (2.49) di bawah ini.

$$B_{Li} = \frac{Q_i}{V_i^2} \ll B_{ii} \quad (2.49)$$

Jika persamaan (2.49) disubstitusikan, maka diperoleh,

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} \quad (2.50)$$

Berdasarkan hubungan antara (2.50) dan (2.49), maka komponen dari koefisien matriks (2.47) dapat direpresentasikan pada persamaan (2.51) di bawah ini.

$$\left. \begin{aligned} H_{ii} &= V_i^2 B_{ii} \\ H_{ij} &= V_i V_j B_{ij} \\ L_{ii} &= V_i^2 B_{ii} \\ L_{ij} &= V_i V_j B_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

Sehingga bentuk matriks pada metode *Fast-Decoupled* akan terbagi menjadi dua dengan daya aktif fokus pada nilai sudut fasat tegangan dan daya reaktif fokus pada nilai magnitude tegangan.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1/V_1 \\ \Delta P_2/V_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n/V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \Delta \theta_1 \\ V_2 \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ V_n \Delta \theta_n \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Dan,

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1/V_1 \\ \Delta Q_2/V_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n/V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

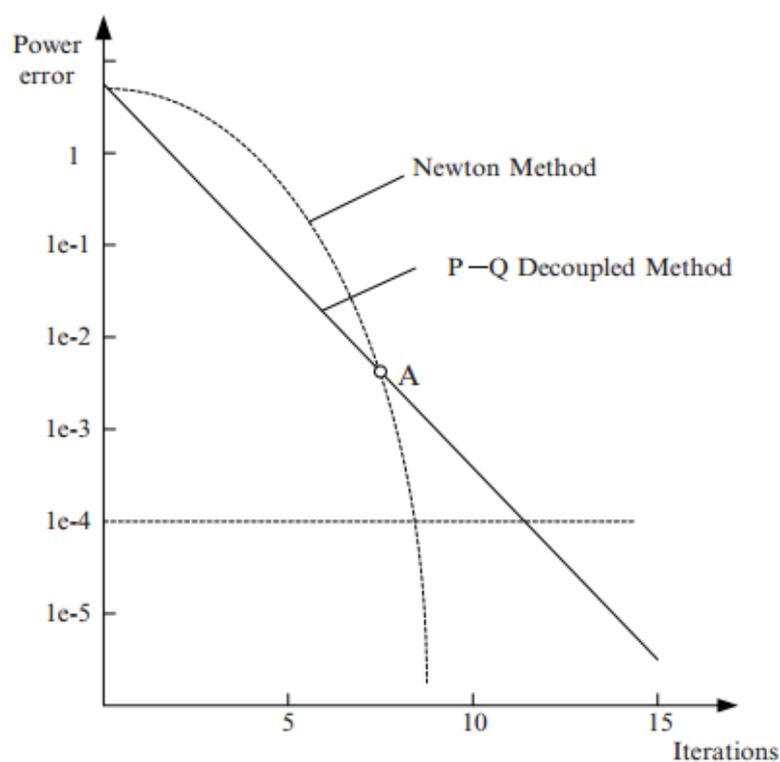
Kedua persamaan matriks (2.52 dan 2.53) merupakan bilangan imajiner dari simpul admitansi pada sistem dan merupakan matriks konstan dan simetris. Dengan mengkombinasikan persamaan *mismatch* aliran daya pada persamaan (2.10), maka persamaan *mismatch* daya untuk metode *Fast-Decoupled* adalah sama dengan metode *Newton-Raphson*.

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

Perbedaan persamaan matriks antara metode *Fast-Decoupled* dan *Newton-Raphson* akan membuat berbeda juga karakteristik konvergensi masing-masing metode. Secara matematis, konstan matriks pada metode *Fast-Decoupled* dalam

menyelesaikan persamaan yang *non-lineari*, konvergensinya mempunyai karakteristik deret geometri. Jika prosedur iterasi dilakukan dalam bentuk koordinat logaritma, maka karakteristik konvergensi hampir mirip seperti garis lurus. Sebaliknya, karena metode *Newton-Raphson* konvergensinya bersifat kuadratik, maka karakteristik konvergensi mirip seperti parabola.

Gambar 2.2 mengilustrasikan karakteristik konvergensi antara metode *Fast-Decoupled* dan metode *Newton-Raphson*. Metode *Newton* konvergensinya lebih lama pada tahap awal, namun saat menuju pada saat sudut tertentu, konvergensinya menjadi lebih cepat. Sedangkan metode *Fast-Decoupled* konvergensinya hampir dengan kecepatan yang sama pada setiap tahap melalui prosedur iterasi.



Gambar 2.2 Sifat konvergensi antara metode *Fast-Decoupled* dan *Newton-Raphson* [1]

Jika dilihat pada titik A, maka jumlah iterasi dari metode *Fast-Decoupled* jauh lebih banyak dibandingkan metode *Newton-Raphson*. Hal tersebut dapat diperkirakan dalam mempertimbangkan bahwa ada hubungan linier antara jumlah iterasi dan presisi yang dibutuhkan saat menggunakan metode *Fast-Decoupled*.

Meskipun jumlah iterasi metode *Fast-Decoupled* lebih banyak, namun total waktu perhitungan pada setiap iterasi pada metode ini, jauh lebih cepat dibandingkan metode *Newton-Raphson*.

2.1.5. Metode Eliminasi Gauss

Metode eliminasi gauss merupakan metode yang paling dikenal untuk menyelesaikan persamaan rangkaian listrik. Penggunaan komputer dalam menghitung aliran daya sistem tenaga, metode iterasi harus dilakukan karena keterbatasan memory pada komputer. Namun, kekurangan yang fatal dari metode iterasi adalah pada tingkat konvergensi. Oleh karena itu, metode eliminasi Gauss telah menggantikan metode iterasi setelah berhasil digunakan pada teknik *sparse*.

Metode eliminasi Gauss dalam menyelesaikan persamaan linier simultan terdiri dari dua langkah, yaitu substitusi maju dan substitusi mundur. Kedua substitusi tersebut dilakukan berdasarkan masing-masing baris dan kolomnya.

Sebuah sistem tenaga yang terdiri dari n persamaan linier dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks $Ax = B$, dimana isi matriks berada pada matriks A dan vektor B bisa terdiri dari bilangan ril atau imajiner. Substitusi maju dilakukan untuk membentuk segitiga atas pada bagian matriks A, sehingga nilai x dapat dihitung menggunakan substitusi mundur terhadap vektor B.

Asumsikan bahwa terdapat persamaan linier dan variabel x yang akan dicari nilainya sebanyak n , maka matriks A terbentuk dengan ordo $n \times n$.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Bentuk eliminasi Gauss

$$\left[\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & B_1 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & B_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} & B_n \end{array} \right] \quad (2.53)$$

Hal pertama yang dilakukan adalah membuat segitiga atas matriks A dengan melakukan substitusi maju. Persamaan (2.54) di bawah ini merupakan matriks dengan jumlah ordo 3×3 .

$$\left[\begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & B_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & B_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & B_3 \end{array} \right] \quad (2.54)$$

Berdasarkan matriks (2.54), maka elemen yang harus menjadi nol adalah a_{21} , a_{31} , dan a_{32} , sehingga dapat dilanjutkan dengan substitusi mundur dari baris ketiga ke hingga baris pertama. Untuk meniadakan nilai dari elemen a_{21} , a_{31} , dan a_{32} maka perlu dilakukan substitusi berdasarkan baris dan kolom masing-masing.

$$\begin{aligned} a_{21}^{(1)} &= a_{21} - \left(\frac{a_{21}}{a_{11}} a_{11} \right) = 0 \\ a_{31}^{(1)} &= a_{31} - \left(\frac{a_{31}}{a_{11}} a_{11} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.55)$$

Maka, untuk elemen selanjutnya (a_{22} , a_{23} , dan B_2) dihitung berdasarkan eliminasi a_{21} terhadap baris pertama

$$\begin{aligned} a_{22}^{(1)} &= a_{22} - \left(\frac{a_{21}}{a_{11}} a_{12} \right) \\ a_{23}^{(1)} &= a_{23} - \left(\frac{a_{21}}{a_{11}} a_{13} \right) \\ B_2^{(1)} &= B_2 - \left(\frac{a_{21}}{a_{11}} B_1 \right) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Sedangkan elemen a_{32} , a_{33} , dan B_3 dihitung berdasarkan eliminasi a_{31} terhadap baris pertama seperti pada persamaan (2.57).

$$a_{32}^{(1)} = a_{32} - \left(\frac{a_{31}}{a_{11}} a_{12} \right)$$

$$a_{33}^{(1)} = a_{33} - \left(\frac{a_{21}}{a_{11}} a_{13} \right) \quad (2.57)$$

$$B_3^{(1)} = B_3 - \left(\frac{a_{21}}{a_{11}} B_1 \right)$$

Sehingga bentuk matriks untuk sementara berdasarkan persamaan (2.55 – 2.57) seperti pada persamaan (2.58) di bawah ini.

$$\left[\begin{array}{ccc|c} a_{11}^{(0)} & a_{12}^{(0)} & a_{13}^{(0)} & B_1^{(0)} \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & B_2^{(1)} \\ 0 & a_{32}^{(1)} & a_{33}^{(1)} & B_3^{(1)} \end{array} \right] \quad (2.58)$$

Berikutnya adalah substitusi untuk elemen $a_{32}^{(1)}$ agar terbentuk segitiga atas pada matriks A. Susbtitusi dapat dilihat pada persamaan (2.59) di bawah ini.

$$a_{32}^{(2)} = a_{32}^{(1)} - \left(\frac{a_{32}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \right) a_{22}^{(1)} = 0$$

$$a_{33}^{(2)} = a_{33}^{(1)} - \left(\frac{a_{32}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \right) a_{23}^{(1)} \quad (2.59)$$

$$B_3^{(2)} = B_3^{(1)} - \left(\frac{a_{32}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \right) B_2^{(1)}$$

Sehingga bentuk akhir matriks menjadi,

$$\left[\begin{array}{ccc|c} a_{11}^{(0)} & a_{12}^{(0)} & a_{13}^{(0)} & B_1^{(0)} \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & B_2^{(1)} \\ 0 & 0 & a_{33}^{(2)} & B_3^{(2)} \end{array} \right] \quad (2.60)$$

Dengan demikian, nilai x dapat dihitung dengan menggunakan substitusi mundur berdasarkan matriks (2.60), maka nilai x_1, x_2, x_3 adalah,

$$x_3 = \frac{B_3^{(2)}}{a_{33}^{(2)}}$$

$$x_2 = \frac{B_2^{(1)} - (a_{23}^{(1)} \cdot x_3)}{a_{22}^{(1)}}$$

$$x_1 = \frac{B_1^{(0)} - (a_{12}^{(0)} \cdot x_2) + (a_{13}^{(0)} \cdot x_3)}{a_{11}^{(0)}}$$

Pada sistem tenaga listrik, metode eliminasi Gauss dapat digunakan dalam penyelesaian matriks *jacobian* secara iterasi.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Tugas akhir ini dilaksanakan dari bulan Desember 2016 hingga bulan Juli 2017 yang bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik (STE) Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Pada penelitian tugas akhir, diperlukan alat dan bahan pendukung dalam pelaksanaannya. Berikut alat dan bahan yang digunakan.

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi *intel Celeron* dan kecepatan *processor* 1.5 GHz.
2. *Software* Oracle Solaris Studio format Phyton.
3. IEEE 14 *Bus*, IEEE 30 *Bus*, IEEE 57 *Bus*, IEEE 118 *Bus*, dan IEEE 300 *bus*, serta Penjulung Kangkung GI Menggala 191 *Bus*.

3.3. Metode Penelitian

Adapun metode dan langkah-langkah penelitian pada tugas akhir ini.

1. Studi Literatur

Pada tahap ini, penulis mempelajari dan mengumpulkan literatur mengenai analisis aliran daya dengan menggunakan metode vektorisasi. Literatur tersebut dari beberapa sumber dan referensi ilmiah, seperti buku materi analisa sistem tenaga listrik dan jurnal ilmiah, serta artikel dari *website* yang dapat dipertanggung jawabkan informasinya.

2. Studi Bimbingan

Pada tahap ini, penulis melakukan diskusi secara berkala dalam menyelesaikan persoalan metode vektorisasi analisis aliran daya, sehingga penulis dapat memperoleh pengetahuan lebih dan dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pada tahap ini, penulis melakukan pengumpulan data yang dibutuhkan, kemudian data tersebut di olah pada *software Oracle Solaris Studio* menggunakan bahasa pemrograman python. Data yang dibutuhkan antara lain Data IEEE *case 30 bus*, IEEE *case 57 bus*, Penjulung Kangkung 191 *Bus GI Menggala*, dan IEEE *case 300 bus*.

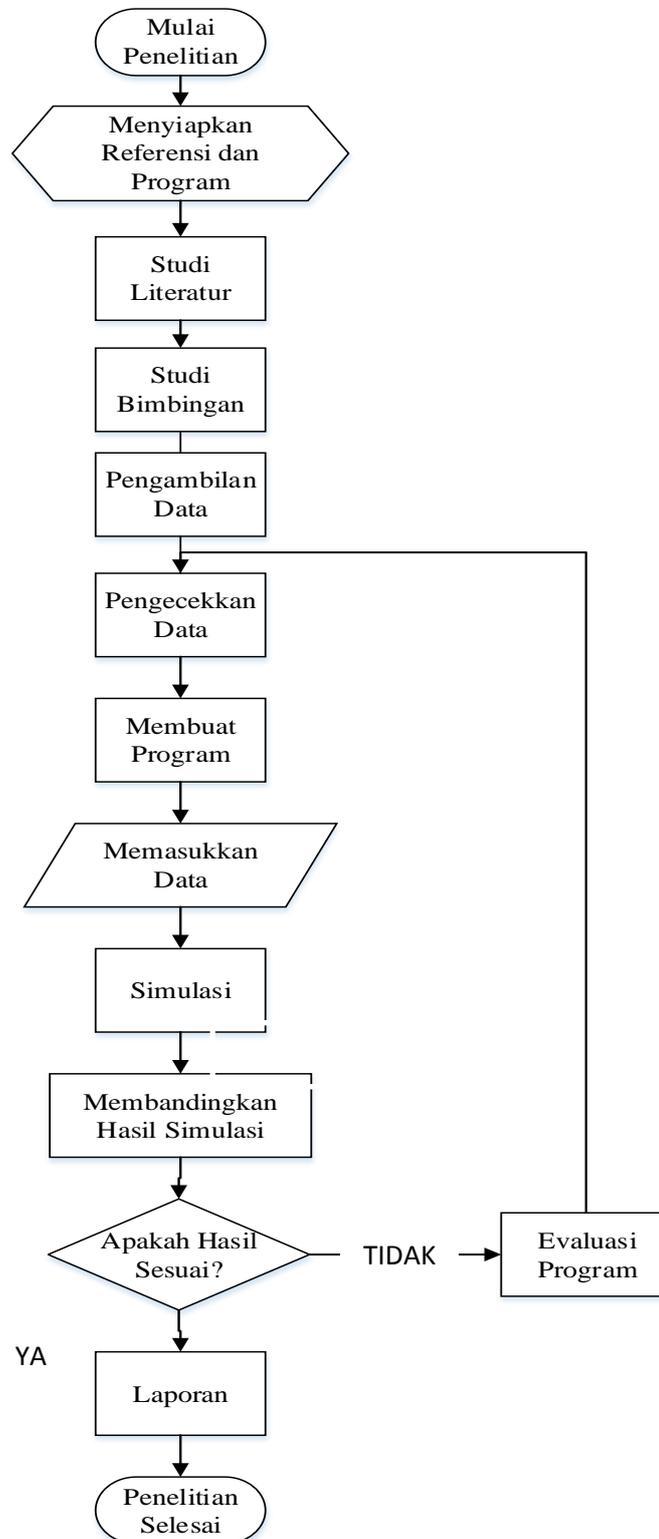
Data akan di olah dengan melakukan perhitungan aliran menggunakan metode *vectorized algorithm* berbasis injeksi daya dan injeksi arus. Setelah data di olah, maka hasilnya, yaitu nilai tegangan pada setiap *bus* akan di bandingkan dengan data IEEE *System Case* dan hasil simulasi UnilaPF khusus penjulung Kangkung GI Menggala

4. Pembuatan Laporan

Pada tahap ini, penulis menuliskan mengenai rencana penelitian dalam bentuk laporan proposal dan hasil dari penelitian dalam bentuk laporan akhir. Laporan ini dapat digunakan sebagai bentuk tanggung jawab penulis terhadap tugas akhir yang telah dilakukan dan digunakan untuk seminar usul dan seminar akhir.

3.4. Diagram Alir Penelitian

Pada tugas akhir ini, adapun tahap-tahap yang dilakukan. Tahap-tahap tersebut dapat dilihat pada gambar diagram alir (3.1) di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

3.5. Metode *Vectorized Algorithm* Pada Aliran Daya

3.5.1 Metode *Vectorized Algorithm* Injeksi Daya

Pada umumnya, persamaan aliran daya terdiri dari persamaan kompleks ril dan imajiner di setiap bus [3].

$$\left. \begin{aligned} S_{inj} &= \bar{V} \cdot \bar{I}^* \\ S_{inj} &= \bar{V} \cdot Y^* \bar{v}^* \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Perlu diketahui bahwa, \bar{V} merupakan bilangan kompleks, yaitu :

$$\left. \begin{aligned} \bar{V} &= |V|e^{j\theta} \\ \bar{V} &= (e + jf) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Dan untuk konjuget dari \bar{V} adalah,

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}^* &= |V|e^{-j\theta} \\ \bar{V}^* &= (e - jf) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Nilai *mismatch* pada metode ini diperoleh dari persamaan (3.4) di bawah ini.

$$\Delta S^t = S_{sch} - S_{inj} \quad (3.4)$$

Dimana, t adalah iterasi ke $(0, 1, \dots, t)$ untuk *mismatch* daya dan S_{sch} merupakan daya yang sudah teridentifikasi pada bus tertentu. Dalam mode *vectorized*, ΔP dan ΔQ direpresentasikan sebagai ΔS_{real} dan ΔS_{imag} [3]

Persamaan aliran daya pada metode ini merupakan persamaan yang *non-linear*, sehingga perlu dilinearkan terlebih dahulu menggunakan metode *Newton Raphson*, sebelum disubstitusikan pada persamaan matriks. Dalam bentuk polar, daya injeksi

pada persamaan (3.1) akan diturunkan terhadap magnitud tegangan $|V|$ dan sudut fasa tegangan θ . Sedangkan dalam bentuk rektangular, persamaan (3.1) diturunkan terhadap e dan f . Pada sub bab sebelumnya, persamaan aliran daya aktif dan reaktif (2.10) sangat kompleks, sehingga terlalu banyak variabel yang perlu dihitung dan hasil turunannya (2.18-2.25) juga masih sangat kompleks. Sedangkan pada metode *vectorized* injeksi daya, persamaan daya injeksi (2.2) dapat diturunkan langsung terhadap $|V|$ dan θ , maka dapat langsung diperoleh turunan persamaan daya aktif dan daya reaktif yang lebih sederhana.

Derivatif parsial S_{inj} dapat diformulasikan seperti persamaan (3.5) dan (3.6) [11].

$$\frac{dS_{inj}}{d|V|} = \bar{I}^* \cdot \frac{\bar{V}}{|V|} + \bar{V} \cdot Y^* \frac{\bar{V}^*}{|V|} \quad (3.5)$$

$$\frac{dS_{inj}}{d\theta} = j(\bar{I}^* \cdot \bar{V} - \bar{V} \cdot Y^* \bar{V}^*) \quad (3.6)$$

Sedangkan dalam bentuk rektangular, derivatif parsial S_{inj} adalah

$$\frac{dS_{inj}}{de} = \bar{I}^* + \bar{V} \cdot Y^* \quad (3.7)$$

$$\frac{dS_{inj}}{df} = j\bar{I}^* - j\bar{V} \cdot Y^* \quad (3.8)$$

Secara harpiah, persamaan (3.5-3.6) dapat dipisahkan menjadi bilangan ril dan imajiner agar dapat dibentuk menjadi matriks *jacobian* seperti matriks (2.26).

Sehingga diperoleh,

$$H = \frac{dS_{inj}}{d\theta} \text{ real} \quad (3.9)$$

$$N = \frac{dS_{inj}}{d|V|} \text{ real} \quad (3.10)$$

$$J = \frac{dS_{inj}}{d\theta} \text{ imag} \quad (3.11)$$

$$L = \frac{dS_{inj}}{d|V|} \text{ imag} \quad (3.12)$$

Berdasarkan matriks (2.17), maka penyusunan matriks pada metode ini yaitu :

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{real,1} \\ \Delta S_{real,i} \\ \vdots \\ \Delta S_{imag,1} \\ \Delta S_{imag,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{1,n} & \vdots & N_{11} & N_{1,n} \\ H_{21} & H_{2,n} & \vdots & N_{21} & N_{2,n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{1,n} & \vdots & L_{11} & L_{1,n} \\ J_{21} & J_{2,n} & \vdots & L_{21} & L_{2,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_i \\ \vdots \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Jika perhitungan aliran daya menggunakan format rektanguler, maka isi elemen jacobian adalah

$$H = \frac{dS_{inj}}{de} real \quad (3.14)$$

$$N = \frac{dS_{inj}}{df} real \quad (3.15)$$

$$J = \frac{dS_{inj}}{de} imag \quad (3.16)$$

$$L = \frac{dS_{inj}}{df} imag \quad (3.17)$$

Sehingga bentuk matriks *jacobian*,

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{real,1} \\ \Delta S_{real,i} \\ \vdots \\ \Delta S_{imag,1} \\ \Delta S_{imag,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{1,n} & \vdots & N_{11} & N_{1,n} \\ H_{21} & H_{2,n} & \vdots & N_{21} & N_{2,n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{1,n} & \vdots & L_{11} & L_{1,n} \\ J_{21} & J_{2,n} & \vdots & L_{21} & L_{2,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_i \\ \vdots \\ \Delta f_1 \\ \Delta f_i \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Pada PV bus, ΔS_{imag} direpresentasikan sebagai ΔV^2 sehingga elemen J dan L ,

$$J = 2e_{ii} \quad (3.19)$$

$$L = 2f_{ii} \quad (3.20)$$

Dan matriks jacobian jika terdapat PV bus akan menjadi seperti persamaan (3.21),

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{real,1} \\ \Delta S_{real,i} \\ \vdots \\ \Delta S_{imag,1} \\ \Delta V^2_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{1,n} & \vdots & N_{11} & N_{1,n} \\ H_{21} & H_{2,n} & \vdots & N_{21} & N_{2,n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{1,n} & \vdots & L_{11} & L_{1,n} \\ J_{21} & J_{2,n} & \vdots & L_{21} & L_{2,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_i \\ \vdots \\ \Delta f_1 \\ \Delta f_i \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3.5.2. Metode *Vectorized Algorithm* Injeksi Arus

Secara konvensional, pada perhitungan aliran daya, seluruh *bus* dimodelkan sebagai PQ *bus*, kecuali *swing bus* sebagai *bus* sumber [12]. Pada metode injeksi arus, persamaan *mismatch* aliran daya pada PQ *bus* dapat diformulasikan sebagai *mismatch* injeksi arus seperti persamaan (3.22) di bawah ini [4].

$$\Delta I = \frac{S_{sch}^*}{V^*} - Y \cdot \bar{V} \quad (3.22)$$

Pada metode ini, dalam bentuk polar, persamaan (2.57) diturunkan terhadap magnitud tegangan $|V|$ dan sudut fasa tegangan θ . Sehingga diperoleh,

$$\frac{d\Delta I}{d\theta} = (\overline{S_{sch}^*} \cdot j\overline{V^*}) \cdot (\overline{V^{*2}})^{-1} - Y \cdot j\bar{V} \quad (3.25)$$

$$\frac{d\Delta I}{d|V|} = \left(\overline{S_{sch}^*} \cdot \frac{\overline{V^*}}{|V|} \right) \cdot (\overline{V^{*2}})^{-1} - Y \cdot \frac{\bar{V}}{|V|} \quad (3.26)$$

Sedangkan dalam bentuk rektanguler, ΔI diturunkan terhadap e dan f , sehingga

$$\frac{d\Delta I}{de} = (\overline{S_{sch}^*}) \cdot (\overline{V^{*2}})^{-1} - Y \quad (3.25)$$

$$\frac{d\Delta I}{df} = j(\overline{S_{sch}^*}) \cdot (\overline{V^{*2}})^{-1} - jY \quad (3.26)$$

Pada persamaan (3.20-3.21), terdiri dari bilangan ril dan imajiner seperti pada metode injeksi daya, sehingga elemen dari matrik *jacobian* untuk metode injeksi arus dalam format polar, yaitu

$$H = \frac{d\Delta I}{d\theta} \text{real} \quad (3.27)$$

$$N = \frac{d\Delta I}{d|V|} \text{real} \quad (3.28)$$

$$J = \frac{d\Delta I}{d\theta} \text{imag} \quad (3.29)$$

$$L = \frac{d\Delta I}{d|V|} \text{imag} \quad (3.30)$$

Penyusunan matriks pada metode ini sama seperti metode injeksi daya (3.13), yaitu :

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{real,1} \\ \Delta I_{real,i} \\ \vdots \\ \Delta I_{imag,1} \\ \Delta I_{imag,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{1,n} & \vdots & N_{11} & N_{1,n} \\ H_{21} & H_{2,n} & \vdots & N_{21} & N_{2,n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{1,n} & \vdots & L_{11} & L_{1,n} \\ J_{21} & J_{2,n} & \vdots & L_{21} & L_{2,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_i \\ \vdots \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Jika menggunakan format rektangular, maka isi elemen matriks jacobian adalah

$$H = \frac{d\Delta I}{de} \text{real} \quad (3.32)$$

$$N = \frac{d\Delta I}{df} \text{real} \quad (3.33)$$

$$J = \frac{d\Delta I}{de} \text{imag} \quad (3.34)$$

$$L = \frac{d\Delta I}{df} \text{imag} \quad (3.35)$$

Sehingga bentuk matriksnya,

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{real,1} \\ \Delta I_{real,i} \\ \vdots \\ \Delta I_{imag,1} \\ \Delta I_{imag,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{1,n} & \vdots & N_{11} & N_{1,n} \\ H_{21} & H_{2,n} & \vdots & N_{21} & N_{2,n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{1,n} & \vdots & L_{11} & L_{1,n} \\ J_{21} & J_{2,n} & \vdots & L_{21} & L_{2,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_i \\ \vdots \\ \Delta f_1 \\ \Delta f_i \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Perlu diingat bahwa, jika terdapat komponen PV bus pada sistem, maka ΔI_{imag} direpresentasikan sebagai ΔV^2 , sehingga elemen J dan L pada metode injeksi daya adalah

$$J = 2e_{ii} \quad (3.37)$$

$$L = 2f_{ii} \quad (3.38)$$

Maka, matriks *jacobian*,

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{real,1} \\ \Delta I_{real,i} \\ \vdots \\ \Delta I_{imag,i} \\ \Delta V^2_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{1,n} & \vdots & N_{11} & N_{1,n} \\ H_{21} & H_{2,n} & \vdots & N_{21} & N_{2,n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{1,n} & \vdots & L_{11} & L_{1,n} \\ J_{21} & J_{2,n} & \vdots & L_{21} & L_{2,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_i \\ \vdots \\ \Delta f_1 \\ \Delta f_i \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.6. Proses Perhitungan Aliran Daya

Adapun proses perhitungan aliran daya pada program.

1. Mengubah format data ke dalam bentuk fungsi agar dapat dibaca oleh program.
2. Menghitung dan membuat Matriks Admitansi (Y_{bus}) dari data yang dimasukkan.

Nilai matriks Y_{bus} dihitung dari data impedansi saluran menggunakan rumus $Y=1/Z$. Admitansi diklasifikasikan sebagai Y_{ij} , dimana i adalah *bus* yang terhubung ke *bus* j , sehingga bentuk dari matriks admitansi dapat ditulis seperti pada persamaan (3.40) di bawah ini.

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

3. Menentukan nilai awal untuk magnitudo tegangan ($|V|^0$) dan sudut fasa (θ^0).
Nilai magnitudo tegangan dan sudut fasa pada *swing bus* dan *PQ bus* pada awalnya dianggap sebagai 1 p.u (per unit).
4. Menentukan nilai iterasi $n = 0$
5. Menghitung *mismatch* $\Delta S_{real,i}, \Delta S_{imag,i}$ (berbasis injeksi daya) atau $\Delta I_{real,i}, \Delta I_{imag,i}$ (berbasis injeksi arus) menggunakan persamaan (3.4) dan (3.22), kemudian membentuk matriks *jacobian*. Bentuk matriks *jacobian* berbasis injeksi dapat dilihat di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{real} \\ \Delta S_{imag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Dimana representasi dari elemen H , N , J , dan L dapat dilihat pada persamaan (3.9) – (3.12). Sedangkan bentuk matriks *jacobian* berbasis injeksi arus dapat dilihat di bawah ini.

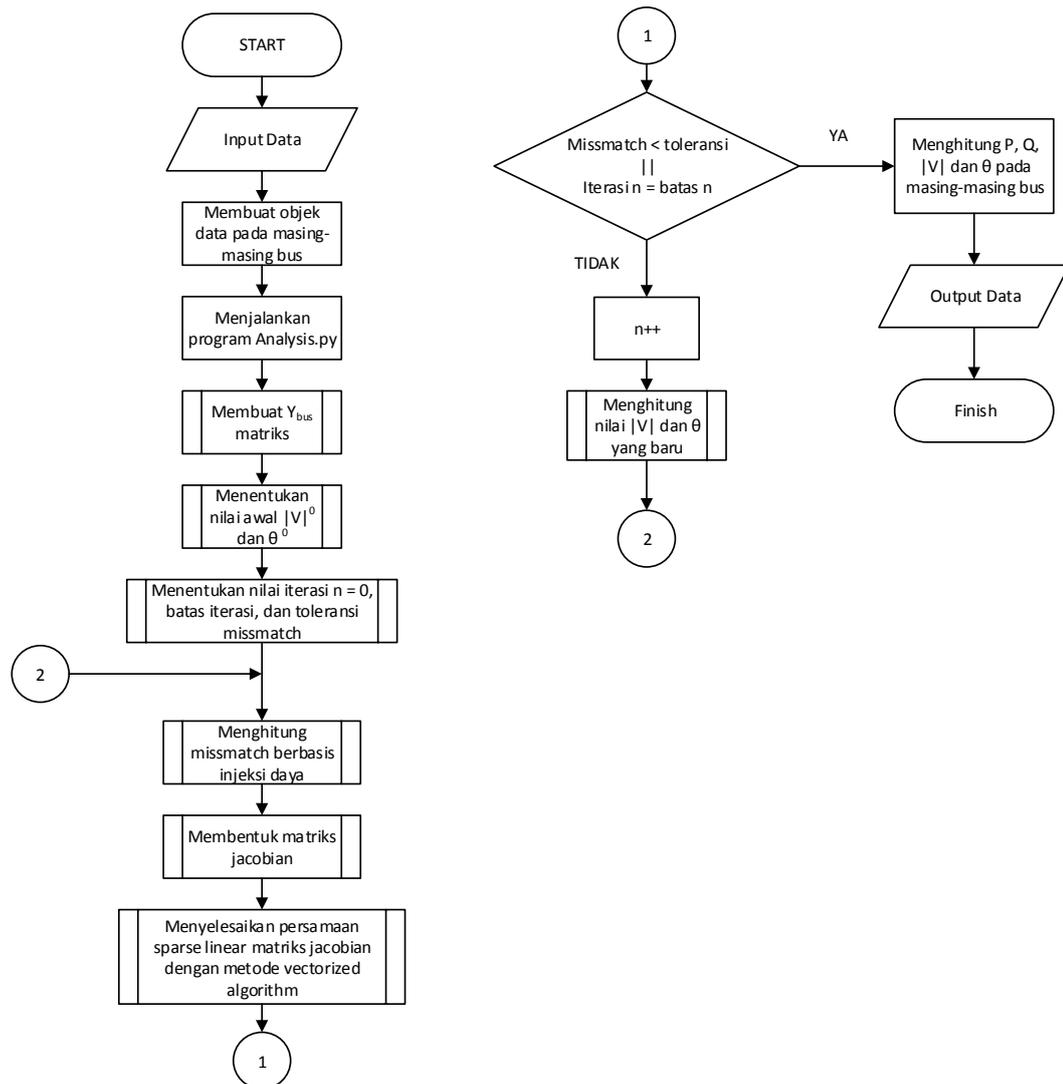
$$\begin{bmatrix} \Delta I_{real} \\ \Delta I_{imag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Dimana representasi dari elemen H , N , J , dan L dapat dilihat pada persamaan (3.27) – (3.30).

6. Kemudian, penyelesaian matriks *jacobian* tersebut menggunakan metode *vectorized algorithm* agar memperoleh hasil *mismatch* yang cepat konvergen.
7. Setelah diperoleh nilai *mismatch*, program akan mencocokkan nilai *mismatch* yang diperoleh pada iterasi n dengan nilai *mismatch* yang ditoleransi. Jika nilai *mismatch* masih di atas toleransi, maka dilanjutkan ke iterasi $n + 1$ (mengulang kembali ke langkah 5).
8. Jika nilai *mismatch* sudah di bawah toleransi, maka dapat dihitung nilai magnitude tegangan, sudut fasa, daya aktif, daya reaktif pada masing – masing *bus*. Persamaan (1.10) untuk menghitung P dan Q pada masing-masing *bus* dalam bentuk *polar*. Nilai magnitude tegangan dan sudut fasa diperoleh dari penyelesaian matrik *jacobian*.
9. Hasil perhitungan, akan ditampilkan dalam bentuk tabel, sehingga terlihat lebih rapi dan mudah untuk dibaca.

3.7. Diagram Alir Simulasi Program Metode *Vectorized Algorithm* Berbasis Injeksi Daya

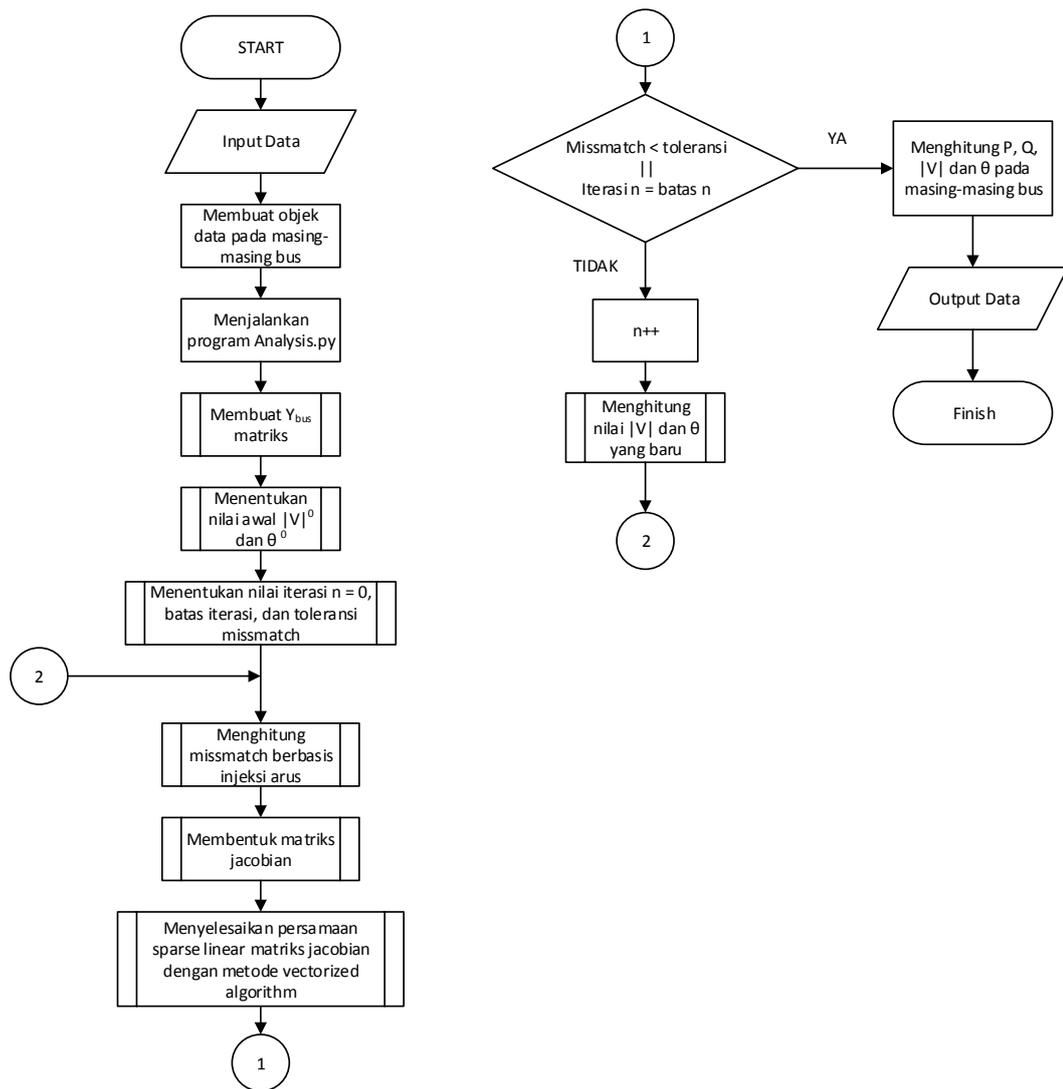
Pada perhitungan aliran daya menggunakan metode *vectorized algorithm* berbasis injeksi daya, adapun langkah-langkah perhitungan yang dilakukan seperti pada gambar diagram alir 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Program Metode *Vectorized Algorithm* Berbasis Injeksi Daya

3.8. Diagram Alir Simulasi Program Metode *Vectorized Algorithm* Berbasis Injeksi Arus

Pada perhitungan aliran daya menggunakan metode *vectorized algorithm* berbasis injeksi arus, adapun langkah-langkah perhitungan yang dilakukan seperti pada gambar diagram alir 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi Program Metode *Vectorized Algorithm* Berbasis Injeksi Arus