

**ANALISIS ALIRAN DAYA DENGAN METODE *HOLOMORPHIC EMBEDDING* MENGGUNAKAN EKSPANSI DERET PANGKAT**

**PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**MUHAMMAD FAHMY MADJID**  
**NIM. 115060313111001**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**  
**2016**

**PENGESAHAN  
PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**NAMA : MUHAMMAD FAHMY MADJID**  
**NIM : 115060313111001**  
**PROGRAM : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**  
**STUDI**  
**JUDUL SKRIPSI : ANALISIS ALIRAN DAYA DENGAN  
METODE *HOLOMORPHIC EMBEDDING*  
MENGUNAKAN EKSPANSI DERET  
PANGKAT**

**TELAH DI-REVIEW DAN DISETUJUI OLEH:**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.**  
**NIP 19580609 198703 1 003**

**Ir. Teguh Utomo, M.T.**  
**NIP 19650913 199103 1 003**

# ANALISIS ALIRAN DAYA DENGAN METODE *HOLOMORPHIC EMBEDDING* MENGGUNAKAN EKSPANSI DERET PANGKAT

Muhammad Fahmy Madjid.<sup>1</sup>, Ir. Mahfudz Shidiq, MT.<sup>2</sup>, Ir. Teguh Utomo, MT.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, <sup>2,3</sup>Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya  
Jalan MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia  
E-mail: fahmy.madjid@yahoo.com

## ABSTRAK

Seiring perkembangan waktu, ada banyak solusi yang ditawarkan untuk menyelesaikan analisis aliran daya. Salah satunya adalah penyelesaian analisis aliran daya dengan metode ekspansi deret pangkat yang dikenal dengan metode *Holomorphic Embedding*. Metode *Holomorphic Embedding* adalah metode yang menggunakan suatu fungsi *Holomorphic* dengan menggunakan ekspansi deret pangkat. Untuk mengetahui seberapa efektif metode *Holomorphic Embedding* dengan metode sebelumnya, terkait dengan kompleksitas yang mencakup kecepatan waktu eksekusi, maka perlu dilakukan suatu analisis perbandingan dengan metode sebelumnya. Sebagai metode perbandingan, dipilih metode *Newton-Raphson*, metode yang paling dikenal dan paling banyak digunakan untuk sistem yang besar karena kemampuan konvergensi yang tidak bergantung pada besarnya sistem. Nilai yang dibandingkan adalah tegangan riil dan imajiner di masing-masing bus, rugi daya tiap saluran, error tiap iterasi, dan waktu iterasi di setiap sistem. Dalam penelitian ini, ada 4 sistem yang akan diteliti yaitu sistem transmisi 5 bus, sistem transmisi IEEE 14 bus, sistem distribusi 21 bus, dan sistem transmisi IEEE 30 bus. Dari hasil perhitungan tegangan riil dan imajiner pada masing-masing metode, baik metode *Newton-Raphson* maupun *Holomorphic Embedding*, memiliki hasil yang sama. Begitu juga dengan rugi daya tiap saluran. Untuk error tiap iterasi, bahwa metode *Holomorphic Embedding* memiliki nilai konvergensi yang lebih baik sejak iterasi pertama. Dan ditinjau dari segi waktu iterasi, metode *Holomorphic Embedding* memiliki kecepatan waktu yang lebih baik, sebagai contoh pada sistem transmisi 5 bus, untuk metode *Holomorphic Embedding* adalah 0,0596 detik dan untuk metode *Newton-Raphson* adalah 0,1225 detik.

**Kata kunci** – Metode *Newton-Raphson*, Metode *Holomorphic Embedding*, Tegangan, Rugi Daya Tiap Saluran, Waktu Iterasi, Sistem Transmisi, Sistem Distribusi.

## ABSTRACT

As the time passes, there are many solution offered for solving power flow analysis. One of them is power flow analysis of *Holomorphic Embedding* using power series expansion, known as *Holomorphic Embedding*. *Holomorphic Embedding* load flow method is using a *holomorphic* function with power series expansion. To find out how effective *Holomorphic Embedding* load flow method compared with previous method, related to complexity including speed of execution in programming software, therefore to do compare analyze from previous method. As the compared method, *Newton-Raphson* load flow method have been selected. *Newton-Raphson* method is the most recognized method and most widely used for large electrical system because of convergence performance.that does not depend on the size. The observed values are real and imaginary voltage, power losses on each line, error per iteration, and iteration time. There are 4 systems in this research including 5 bus transmission system, IEEE 14 bus transmission system, 21 bus distribution system, and IEEE 30 bus transmission system. From the result of calculating real and imaginary voltage on each method, either *Newton-Raphson* or *Holomorphic Embedding*, yield the same result. As well as power losses on each line. For error per iteration, *Holomorphic Embedding* has better convergence value since first iteration. And review in terms of iteration time, *Holomorphic Embedding* has better speed of time, for example in 5 bus transmission system, for *Holomorphic Embedding* method yields 0,0596 second, and for *Newton-Raphson* method yields 0,1225 second.

**Keywords** – *Newton-Raphson Method, Holomorphic Embedding Method, Voltage, Power Losses on each Line, Iteration Time, Transmission System, Distribution System.*

## I. PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik, studi aliran daya (*Power-flow study*), atau studi aliran beban (*Load-flow study*), adalah analisis numerik pada aliran daya listrik dalam suatu sistem yang terinterkoneksi. Studi aliran daya merupakan studi yang mengungkapkan kinerja sistem aliran daya ketika sistem bekerja pada keadaan tunak (*steady state*) [11].

Analisis aliran daya memberikan informasi mengenai tegangan setiap bus, arus yang mengalir pada setiap saluran transmisi, dan rugi-rugi transmisi. Analisis aliran daya dilakukan dengan menyelesaikan persamaan aliran daya yang perhitungannya mengalami perulangan (iterasi) [6].

Metode yang umum digunakan sebagai penyelesaian analisis aliran daya diantaranya metode *Gauss-Seidel* dan metode *Newton-Raphson*. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan. Jika metode *Newton-Raphson* dibandingkan dengan metode *Gauss-Seidel*, kecepatan dalam perhitungan aliran daya lebih baik dan akurat dibandingkan metode *Gauss-Seidel*. Namun, kelemahannya adalah memori yang dibutuhkan lebih besar [9].

Proses iterasi pada analisis aliran daya membutuhkan suatu nilai awal, kemudian menghasilkan suatu nilai untuk digunakan pada iterasi selanjutnya hingga mencapai nilai yang konvergen (nilai yang tidak berubah terhadap nilai pada iterasi sebelumnya). Dalam menentukan nilai awal dari suatu iterasi, umumnya diberi nilai sesuai dengan nilai pada bus acuan (*slack bus*). Ini dikarenakan nilai pada bus lain (selain bus acuan) pada suatu iterasi akan konvergen di nilai yang tidak berjauhan dengan bus acuan [12].

Seiring perkembangan waktu, ada banyak solusi yang ditawarkan untuk menyelesaikan analisis aliran daya. Salah satunya adalah penyelesaian analisis aliran daya dengan metode ekspansi deret pangkat yang dikenal dengan metode *Holomorphic Embedding*. Metode *Holomorphic Embedding* adalah metode yang menggunakan suatu fungsi *Holomorphic* dengan menggunakan ekspansi deret pangkat [10].

Metode *Holomorphic Embedding* adalah metode yang dibuat untuk memecahkan masalah konvergensi yang ada pada metode *Newton-Raphson* dimana saat diberi nilai awal tertentu, tidak akan dicapai nilai yang konvergen. Sedangkan metode *Holomorphic Embedding* menyediakan alternatif lain dengan menggunakan variabel tegangan pada persamaan daya seimbang yang diubah menjadi bentuk deret pangkat, sehingga masalah konvergensi pada metode *Newton-Raphson* dapat terselesaikan [10].

Adanya metode *Holomorphic Embedding* ini memberikan suatu solusi baru mengenai pemecahan masalah-masalah pada penyelesaian analisis aliran daya. Maka dari itu, perlunya untuk mengetahui keunggulan dalam segi kompleksitas dan efektivitas pada metode *Holomorphic Embedding* dibandingkan metode analisis

aliran daya sebelumnya, yakni yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Newton-Raphson*.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Konsep Perhitungan Aliran Daya

Studi aliran daya adalah perhitungan tegangan, arus, dan daya yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu sistem tenaga listrik pada keadaan pengoperasian *steady state*, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang. Di dalam sistem tenaga listrik, daya mengalir dari pembangkit-pembangkit daya menuju ke beban melalui sistem transmisi. Dalam proses ini, banyak hal yang perlu mendapat perhatian antara lain keadaan tegangan setiap bus, aliran daya MW dan MVAR dalam setiap saluran dan lain-lain.

Sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem jaringan yang membawa tenaga listrik. Oleh karena itu, setiap bus terdapat daya aktif (P), daya reaktif (Q), besar tegangan (E), dan sudut fasa tegangan ( $\theta$ ). Variabel-variabel ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebanan. Dalam persamaan aliran daya, terdapat dua data yang diketahui dari variabel tersebut, sedangkan dua data lainnya dihitung. Bus gardu induk dalam sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi 3 tipe bus, yaitu [7].

#### a. Bus beban (bus PQ)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah daya aktif P dan daya reaktif Q, sedangkan besaran yang dihitung adalah tegangan E dan sudut fasa tegangan  $\theta$ .

#### b. Bus generator (bus PV)

Komponen yang diketahui dalam hal ini adalah besar tegangan E dan daya aktif P, sedangkan besaran yang dihitung adalah sudut fasa tegangan  $\theta$  dan daya reaktif Q.

#### c. Bus berayun (swing bus atau slack bus)

Komponen yang diketahui dalam hal ini adalah besar tegangan E dan sudut fasa tegangan  $\theta$ , sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif P dan daya reaktif Q. Umumnya dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun. Bus berayun berfungsi untuk menyuplai kekurangan daya aktif P dan daya reaktif Q pada sistem tenaga listrik.

### B. Persamaan Sistem Aliran Daya

Sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus, melainkan terdiri dari beberapa bus yang diinterkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang diinjeksikan oleh generator kepada salah satu bus, bukan hanya dapat diserap oleh beban yang terletak di bus tersebut, melainkan dapat juga diserap oleh beban di bus yang lain. Kelebihan daya pada bus akan dikirimkan melalui saluran transmisi ke bus-bus lain yang kekurangannya daya.

Persamaan untuk sistem tenaga listrik dapat dinyatakan dalam bentuk admitansi sebagai berikut [2].

$$I_{bus} = Y_{bus} \times E_{bus} \quad (1)$$

dimana

- $I_{BUS}$  : Matriks arus pada setiap bus
- $Y_{BUS}$  : Matriks admitansi
- $E_{BUS}$  : Matriks tegangan pada setiap bus

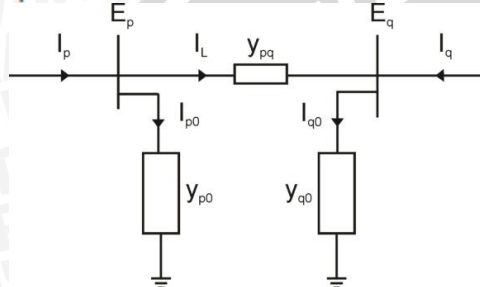
Untuk mengetahui nilai tegangan setiap bus, harus dilakukan iterasi sesuai dengan metode yang digunakan. Nilai iterasi akan berhenti jika selisih nilai daya baru dengan nilai daya sebelumnya kurang dari nilai *error* yang diizinkan, Nilai terakhir dari iterasi tersebut adalah nilai tegangan pada masing-masing node.

Daya di setiap bus dapat dihitung dengan menggunakan tegangan hasil iterasi. Persamaan 2 merupakan perhitungan daya di masing-masing bus [6].

$$P_p + jQ_p = E_p \times I_p^* \quad (2)$$

dimana

- $P_p$  : Daya aktif pada bus p
- $Q_p$  : Daya reaktif pada bus p
- $E_p$  : Tegangan pada bus p
- $I_p$  : Arus pada bus p



Gambar 1 Model saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya

Sumber : Lawang (2008: 3)

Selain menentukan besaran daya pada tiap bus, analisis aliran daya juga digunakan untuk menentukan besar kerugian daya yang hilang pada saluran transmisi selama proses penyaluran daya dari pembangkit ke pusat beban. Perhatikan saluran yang terhubung antara bus p dan q pada Gambar 1. Arus saluran  $I_{pq}$  diukur pada bus p dan dianggap positif untuk arah p ke q, dapat ditulis pada Persamaan 3 [3].

$$I_{pq} = I_L + I_{p0} = y_{pq}(E_p - E_q) + y_{p0}E_p \quad (3)$$

dimana

- $I_{pq}$  : Arus pada bus p
- $I_L$  : Arus pada saluran antara bus p dan bus q
- $I_{p0}$  : Arus pada saluran *half line charging*
- $y_{pq}$  : Admitansi saluran antara bus p dan bus q
- $y_{p0}$  : *Half line charging*
- $E_p$  : Tegangan bus p
- $E_q$  : Tegangan bus q

Demikian juga arus saluran  $I_{qp}$  diukur pada bus q dan dianggap positif untuk arah q ke p, dapat ditulis pada persamaan 4.

$$I_{qp} = -I_L + I_{q0} = y_{qp}(E_q - E_p) + y_{q0}E_q \quad (4)$$

Daya kompleks  $S_{pq}$  dari bus p ke q dan  $S_{qp}$  dari bus q ke p dinyatakan pada persamaan 5 dan 6.

$$S_{pq} = E_p \times I_{pq}^* \quad (5)$$

$$S_{qp} = E_q \times I_{qp}^* \quad (6)$$

Rugi daya dalam saluran pq adalah penjumlahan aljabar dari daya yang ditentukan dari persamaan 5 dan 6, sehingga dapat dinyatakan pada persamaan 7.

$$S_{Lpq} = S_{pq} + S_{qp} \quad (7)$$

Sehingga persamaan untuk mendapatkan total rugi saluran untuk sistem dengan jumlah n bus adalah pada persamaan 8.

$$S_{LT} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n S_{Lpq} \quad (8)$$

dimana

$$S_{Lpq} : \text{Rugi daya pada saluran antara bus } p \text{ dan } q$$

$$S_{LT} : \text{Total rugi daya}$$

### C. Pemakaian Metode Newton-Raphson Pada Analisis Aliran Daya

Masalah aliran daya dapat diselesaikan dengan metode *Newton-Raphson* menggunakan sejumlah persamaan nonlinier yang menyatakan daya aktif dan reaktif sebagai fungsi dari besar dan sudut fasa tegangan [5]. Persamaan daya pada suatu bus i dapat ditulis :

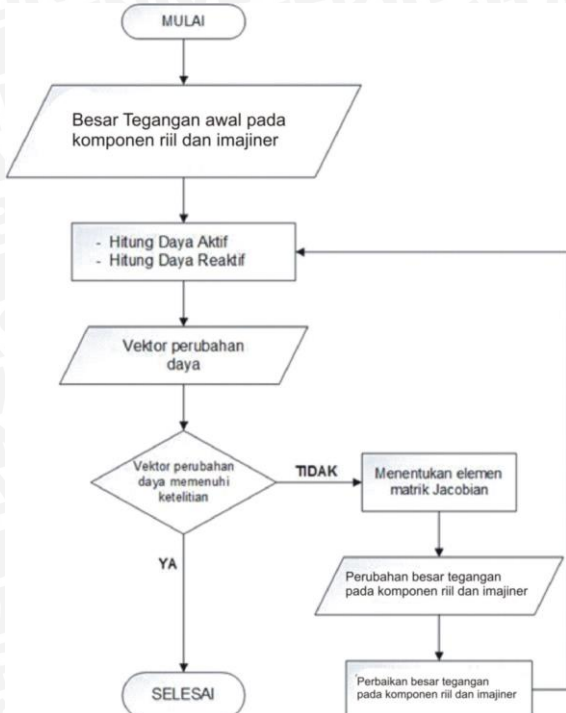
$$P_i - jQ_i = E_i^* I_i = E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k \quad (9)$$

Pemisahan bagian riil dan imajiner, maka diperoleh persamaan daya pada bus i adalah

$$P_i = \text{Re} \{ E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k \} \quad (10)$$

$$Q_i = \text{Re} \{ -E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k \} \quad (11)$$

Kedua persamaan nonlinier  $P_i$  dan  $Q_i$  merupakan persamaan-persamaan utama dalam analisis aliran daya dengan menggunakan metode *Newton-Raphson*. Kedua rumusan ini menghasilkan dua persamaan nonlinier dalam setiap bus. Daya aktif dan daya reaktif adalah diketahui sedangkan besar tegangan dan sudut fasa tegangan tidak diketahui untuk semua bus kecuali pada slack bus dimana besar tegangannya diketahui dan dijaga konstan sehingga terdapat  $2(n-1)$  persamaan yang harus diselesaikan untuk penyelesaian aliran daya. Berikut merupakan diagram alir langkah-langkah mendapatkan tegangan bus dengan metode *Newton-Raphson*:



Gambar 2. Diagram Alir Langkah- Langkah Pengerjaan Metode Newton-Raphson

**D. Pemakaian Metode Holomorphic Embedding Pada Analisis Aliran Daya**

Holomorphic Embedding adalah teknik menanamkan suatu masalah kecil ke dalam masalah yang besar dengan variabel kompleks sambil menjamin bahwa masalah yang dihasilkan adalah analitik. Dalam proses penyelesaiannya, dibutuhkan suatu ekspansi dalam bentuk deret pangkat sehingga fungsi tegangan yang ditanamkan oleh parameter s dapat terselesaikan [8]. Jika m adalah kumpulan dari bus PQ, persamaan aliran daya untuk bus I adalah sebagai berikut :

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} E_k = \frac{S_i^*}{E_i^*}, i \in m \tag{12}$$

dimana

- $Y_{ik}$  : Matriks admitansi
- $S_i$  : Daya pada bus i
- $E_k$  : Matriks tegangan bus
- $E_i$  : Tegangan pada bus i

Elemen shunt dalam (12) dipindah ke ruas kanan dan persamaan tersebut tertanam/embedded dengan parameter kompleks s sebagai berikut: [7]

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik trans} E_k(s) = \frac{s S_i^*}{E_i^*(s)} - s Y_{i shunt} E_i(s), i \in m \tag{13}$$

Parameter/variabel kompleks s pada Persamaan (2-58) adalah variabel kompleks yang bernilai (0+j0) dan (1+j0). Saat variabel kompleks s bernilai 0, maka Persamaan (2-58) menjadi seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2-59) di bawah ini

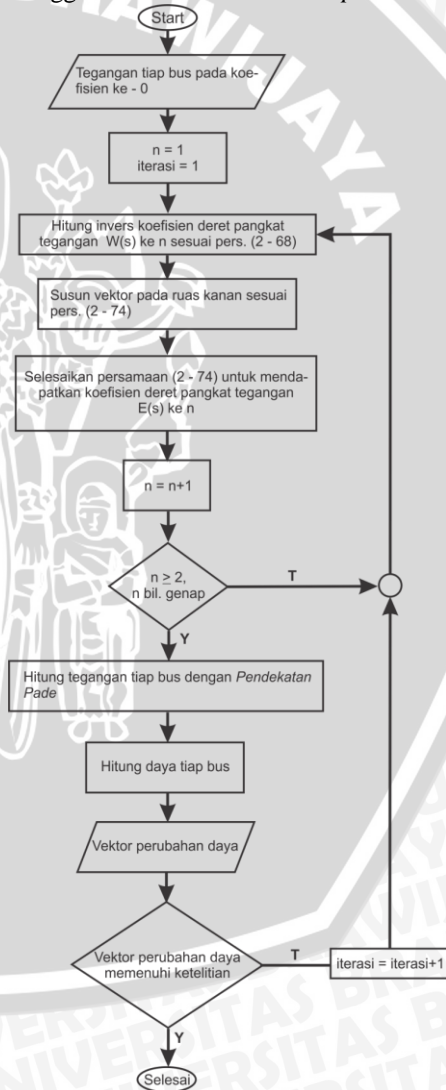
$$\sum_{k=1}^N Y_{ik trans} E_k(s) = 0, i \in m \tag{14}$$

Dapat dilihat dari Persamaan (2-59), bahwa besar tegangan pada bus beban akan sama dengan besar tegangan pada bus acuan. Sehingga saat  $s = 0$ , sistem direpresentasikan sebagai sistem tanpa pembangkitan dan pembebanan.

Jika variabel kompleks s bernilai 1, maka Persamaan (2-58) akan memenuhi persamaan aliran daya (2-57), dimana tegangan yang ada pada Persamaan (2-57) diubah menjadi bentuk fungsi holomorphic dengan memasukkan nilai 1 pada variabel s. Ditunjukkan seperti Persamaan (2-60) di bawah ini.

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik trans} E_k(1) = \frac{S_i^*}{E_i^*(1)} - Y_{i shunt} E_i(1), i \in m \tag{15}$$

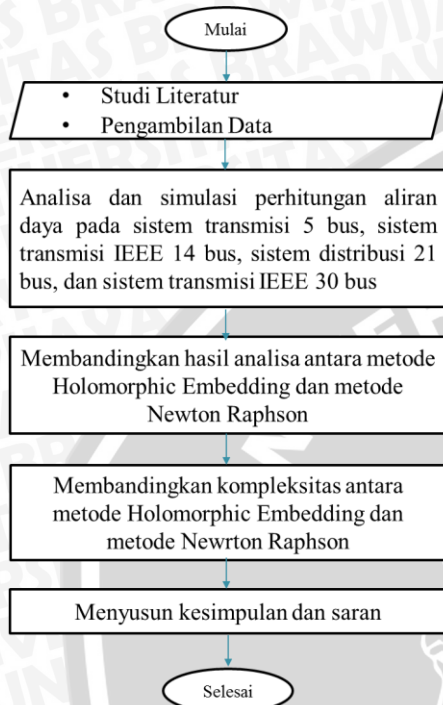
Berikut ini diagram alir untuk analisis aliran daya dengan menggunakan metode Holomorphic Embedding.



Gambar 3. Diagram Alir Langkah- Langkah Pengerjaan Metode Holomorphic Embedding

### III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini meliputi studi literatur, pengambilan data, simulasi perhitungan, analisis hasil perhitungan, serta penarikan kesimpulan dan saran. Dijelaskan diagram alir metode penelitian pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Metode Penelitian

#### A. Studi Literatur

Studi literatur yang dilaksanakan berupa kajian pustaka terhadap sumber-sumber bacaan yang relevan sehingga mampu menunjang dalam melakukan analisis aliran daya. Teori-teori yang berhubungan dengan judul penelitian ini adalah:

1. Mempelajari hal-hal yang berhubungan dengan jaringan transmisi, seperti sistem per unit, konsep perhitungan aliran daya, pemodelan matriks, dan persamaan aliran daya.
2. Mempelajari analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan metode Newton Raphson.
3. Mempelajari analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan metode Holomorphic Embedding.
4. Mempelajari rugi-rugi daya sistem tenaga listrik.

#### B. Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder adalah data yang diperoleh dari beberapa sumber yang sudah ada seperti dari buku referensi dan/atau skripsi, jurnal, dan data yang bersumber dari perusahaan terkait. Adapun data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data saluran pada sistem transmisi 5 bus.
2. Data saluran pada sistem transmisi IEEE 14 bus.

3. Data saluran pada sistem distribusi 21 bus.
4. Data saluran pada sistem transmisi IEEE 30 bus.

#### C. Simulasi Perhitungan

Dengan menggunakan data yang telah diketahui, simulasi perhitungan aliran daya dilakukan dengan menggunakan metode Newton-Raphson dan Holomorphic Embedding. Simulasi analisis aliran daya dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

1. Penentuan jumlah bus yang akan disimulasikan.
2. Pengumpulan data daya aktif dan daya reaktif pada masing-masing bus.
3. Memodelkan sistem sesuai single line diagram.
4. Memberikan nilai tiap komponen sesuai data.
5. Memasukkan nilai error yang digunakan pada metode analisis aliran daya.
6. Melakukan perhitungan aliran daya dengan metode Newton-Raphson.
7. Mencatat hasil simulasi aliran daya dengan metode Newton-Raphson dalam tabel.
8. Melakukan perhitungan aliran daya dengan metode Holomorphic Embedding.
9. Mencatat hasil simulasi aliran daya dengan metode Holomorphic Embedding dalam tabel.
10. Pengambilan kesimpulan dan saran.

#### D. Analisis Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan analisis aliran daya yang telah didapat akan digunakan sebagai bahan analisis yang mengacu pada rumusan masalah yang meliputi :

1. Perbandingan dari hasil analisis dan waktu perhitungan antara metode Newton-Raphson dengan metode Holomorphic Embedding.
2. Perbandingan kompleksitas antara metode Newton-Raphson dan metode Holomorphic Embedding pada perhitungan aliran daya.

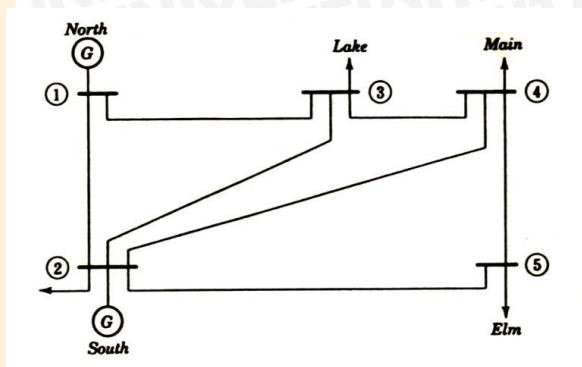
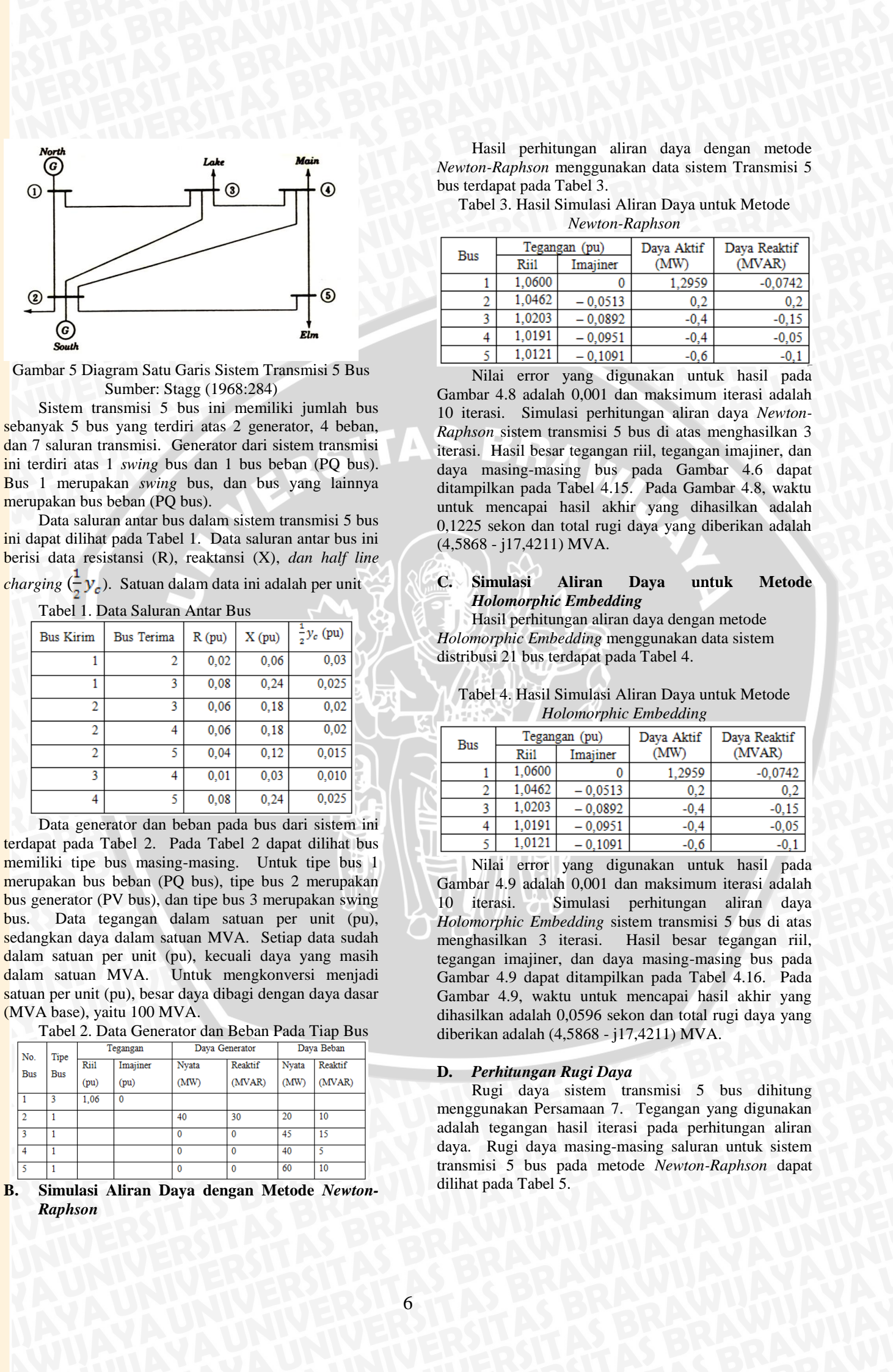
#### E. Penarikan Kesimpulan

Pada bagian ini akan diambil kesimpulan dan saran. Kesimpulan diambil berdasarkan teori yang dipakai, perhitungan, dan hasil simulasi. Saran dibuat agar bisa menjadi masukan bagi pembaca sebagai bahan untuk melanjutkan penelitian tentang topik ini. Saran dibuat berdasarkan kesulitan yang dialami selama penelitian dan hal-hal lain yang sekiranya perlu untuk dikaji lebih dalam.

### IV. PEMBAHASAN

#### A. Sistem Transmisi 5 Bus

Data yang digunakan dalam skripsi ini adalah data sekunder sistem transmisi 5 Bus, sistem distribusi 21 Bus, serta sistem transmisi IEEE 14 Bus dan 30 Bus. Dalam makalah skripsi ini hanya ditampilkan data untuk sistem transmisi 5 Bus bersumber dari buku yang berjudul "Computer Methods and Power System Analysis". Diagram satu garis dari sistem transmisi 5 bus ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram Satu Garis Sistem Transmisi 5 Bus  
Sumber: Stagg (1968:284)

Sistem transmisi 5 bus ini memiliki jumlah bus sebanyak 5 bus yang terdiri atas 2 generator, 4 beban, dan 7 saluran transmisi. Generator dari sistem transmisi ini terdiri atas 1 *swing* bus dan 1 bus beban (PQ bus). Bus 1 merupakan *swing* bus, dan bus yang lainnya merupakan bus beban (PQ bus).

Data saluran antar bus dalam sistem transmisi 5 bus ini dapat dilihat pada Tabel 1. Data saluran antar bus ini berisi data resistansi (R), reaktansi (X), dan *half line charging* ( $\frac{1}{2}y_c$ ). Satuan dalam data ini adalah per unit

Tabel 1. Data Saluran Antar Bus

Bus Kirim	Bus Terima	R (pu)	X (pu)	$\frac{1}{2}y_c$ (pu)
1	2	0,02	0,06	0,03
1	3	0,08	0,24	0,025
2	3	0,06	0,18	0,02
2	4	0,06	0,18	0,02
2	5	0,04	0,12	0,015
3	4	0,01	0,03	0,010
4	5	0,08	0,24	0,025

Data generator dan beban pada bus dari sistem ini terdapat pada Tabel 2. Pada Tabel 2 dapat dilihat bus memiliki tipe bus masing-masing. Untuk tipe bus 1 merupakan bus beban (PQ bus), tipe bus 2 merupakan bus generator (PV bus), dan tipe bus 3 merupakan *swing* bus. Data tegangan dalam satuan per unit (pu), sedangkan daya dalam satuan MVA. Setiap data sudah dalam satuan per unit (pu), kecuali daya yang masih dalam satuan MVA. Untuk mengkonversi menjadi satuan per unit (pu), besar daya dibagi dengan daya dasar (MVA base), yaitu 100 MVA.

Tabel 2. Data Generator dan Beban Pada Tiap Bus

No. Bus	Tipe Bus	Tegangan		Daya Generator		Daya Beban	
		Riil (pu)	Imajiner (pu)	Nyata (MW)	Reaktif (MVAR)	Nyata (MW)	Reaktif (MVAR)
1	3	1,06	0				
2	1			40	30	20	10
3	1			0	0	45	15
4	1			0	0	40	5
5	1			0	0	60	10

### B. Simulasi Aliran Daya dengan Metode *Newton-Raphson*

Hasil perhitungan aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* menggunakan data sistem Transmisi 5 bus terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Aliran Daya untuk Metode *Newton-Raphson*

Bus	Tegangan (pu)		Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
	Riil	Imajiner		
1	1,0600	0	1,2959	-0,0742
2	1,0462	-0,0513	0,2	0,2
3	1,0203	-0,0892	-0,4	-0,15
4	1,0191	-0,0951	-0,4	-0,05
5	1,0121	-0,1091	-0,6	-0,1

Nilai error yang digunakan untuk hasil pada Gambar 4.8 adalah 0,001 dan maksimum iterasi adalah 10 iterasi. Simulasi perhitungan aliran daya *Newton-Raphson* sistem transmisi 5 bus di atas menghasilkan 3 iterasi. Hasil besar tegangan riil, tegangan imajiner, dan daya masing-masing bus pada Gambar 4.6 dapat ditampilkan pada Tabel 4.15. Pada Gambar 4.8, waktu untuk mencapai hasil akhir yang dihasilkan adalah 0,1225 detik dan total rugi daya yang diberikan adalah (4,5868 - j17,4211) MVA.

### C. Simulasi Aliran Daya untuk Metode *Holomorphic Embedding*

Hasil perhitungan aliran daya dengan metode *Holomorphic Embedding* menggunakan data sistem distribusi 21 bus terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Aliran Daya untuk Metode *Holomorphic Embedding*

Bus	Tegangan (pu)		Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
	Riil	Imajiner		
1	1,0600	0	1,2959	-0,0742
2	1,0462	-0,0513	0,2	0,2
3	1,0203	-0,0892	-0,4	-0,15
4	1,0191	-0,0951	-0,4	-0,05
5	1,0121	-0,1091	-0,6	-0,1

Nilai error yang digunakan untuk hasil pada Gambar 4.9 adalah 0,001 dan maksimum iterasi adalah 10 iterasi. Simulasi perhitungan aliran daya *Holomorphic Embedding* sistem transmisi 5 bus di atas menghasilkan 3 iterasi. Hasil besar tegangan riil, tegangan imajiner, dan daya masing-masing bus pada Gambar 4.9 dapat ditampilkan pada Tabel 4.16. Pada Gambar 4.9, waktu untuk mencapai hasil akhir yang dihasilkan adalah 0,0596 detik dan total rugi daya yang diberikan adalah (4,5868 - j17,4211) MVA.

### D. Perhitungan Rugi Daya

Rugi daya sistem transmisi 5 bus dihitung menggunakan Persamaan 7. Tegangan yang digunakan adalah tegangan hasil iterasi pada perhitungan aliran daya. Rugi daya masing-masing saluran untuk sistem transmisi 5 bus pada metode *Newton-Raphson* dapat dilihat pada Tabel 5.



Tabel 5. Hasil Perhitungan Rugi Daya Metode *Newton-Raphson*

Bus Kirim	Bus Terima	Rugi Daya	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	2	1,4104	-2.4308
1	3	1,1920	-1,8555
2	3	0,3515	-3.2376
2	4	0,4413	-2.9656
2	5	1,1252	0,1758
3	4	0,0356	-1,9898
4	5	0,0307	-5.1176

Kemudian rugi daya masing-masing saluran untuk sistem transmisi 5 bus pada metode *Holomorphic Embedding* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Rugi Daya Metode *Holomorphic Embedding*

Bus Kirim	Bus Terima	Rugi Daya	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	2	1,4104	-2.4308
1	3	1,1920	-1,8555
2	3	0,3515	-3.2376
2	4	0,4413	-2.9656
2	5	1,1252	0,1758
3	4	0,0356	-1,9898
4	5	0,0307	-5.1176

#### E. Waktu Iterasi

Perhitungan aliran daya dengan data dan jumlah bus yang berbeda-beda menyebabkan hasil iterasinya berbeda-beda juga. Semakin banyak jumlah bus, maka waktu iterasi cenderung lebih lama. Dari Tabel 7 dapat dibuktikan bahwa semakin banyak jumlah bus, waktu yang dibutuhkan untuk iterasi berakhir semakin lama.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Waktu Iterasi

Jumlah Bus	<i>Newton-Raphson</i>		<i>Holomorphic Embedding</i>		Selisih Waktu Iterasi (sekon)
	Jumlah Iterasi	Waktu Iterasi (sekon)	Jumlah Iterasi	Waktu Iterasi (sekon)	
5	3	0,1225	3	0,0596	0,0629
14	3	0,1758	4	0,0689	0,1069
21	2	0,0630	2	0,0592	0,0038
30	4	0,5786	4	0,0853	0,4933

Menurut hasil penelitian pada Tabel 7, waktu iterasi yang dihasilkan oleh *Holomorphic Embedding* lebih cepat dibandingkan dengan *Newton-Raphson* pada sistem dengan 5 bus, 14 bus, 21 bus, dan 30 bus. Sistem distribusi 21 bus menghasilkan waktu iterasi yang lebih cepat dibandingkan sistem dengan jumlah bus lain dikarenakan pada sistem distribusi tidak ada kapasitansi saluran.

#### F. Perbandingan Error Tiap Iterasi

Error yang digunakan untuk menghentikan iterasi dari hasil perhitungan pada Tabel 3 dan 4 adalah 0.0001. Dari Tabel 8 dan 9 dapat ditunjukkan bahwa error tiap iterasi hingga lebih kecil dari 0.0001 di sistem jaringan 5 bus, 14 bus, 21 bus, dan 30 bus.

Tabel 8. Error Tiap Iterasi Untuk 5 Bus dan 14 Bus

Iterasi	<i>Newton-Raphson</i>		<i>Holomorphic Embedding</i>	
	Error 5 Bus	Error 14 Bus	Error 5 Bus	Error 14 Bus
1	0,132	0,2101	0,0104	0,055
2	0,0011	0,0129	$2,78 \times 10^{-4}$	0,0092
3	$2,14 \times 10^{-7}$	$6,21 \times 10^{-5}$	$3,20 \times 10^{-6}$	$3,57 \times 10^{-4}$
4				$7,84 \times 10^{-5}$

Tabel 9. Error Tiap Iterasi Untuk 21 Bus dan 30 Bus

Iterasi	<i>Newton-Raphson</i>		<i>Holomorphic Embedding</i>	
	Error 21 Bus	Error 30 Bus	Error 21 Bus	Error 30 Bus
1	0,073	0,2579	$4,98 \times 10^{-4}$	0,0613
2	$2,17 \times 10^{-6}$	0,0178	$3,41 \times 10^{-8}$	0,0111
3		$1,12 \times 10^{-4}$		$4,72 \times 10^{-4}$
4		$5,25 \times 10^{-9}$		$6,82 \times 10^{-5}$

## V. PENUTUP

### A. Kesimpulan

Berdasarkan permasalahan yang dibahas serta mengacu pada hasil simulasi dan analisis hasil aliran daya, maka pada penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan yang meliputi :

1. Tegangan riil dan imajiner yang dihasilkan metode *Holomorphic Embedding* sama dengan tegangan riil dan imajiner yang dihitung menggunakan metode *Newton-Raphson*. Waktu iterasi dari metode *Holomorphic Embedding* lebih cepat dari metode *Newton-Raphson*, sebagai contoh pada perhitungan aliran daya sistem transmisi 5 bus, dimana waktu untuk metode *Newton-Raphson* adalah 0,1225 sekon, sedangkan untuk metode *Holomorphic Embedding* adalah 0,0596 sekon. Metode *Holomorphic Embedding* mempercepat perhitungan aliran daya, ini disebabkan jumlah persamaan yang digunakan lebih sedikit jika dibandingkan dengan metode *Newton-Raphson*.
2. Perhitungan aliran daya dengan jumlah bus yang banyak mampu dihitung dengan cepat menggunakan metode *Holomorphic Embedding*. Hal ini dibuktikan dengan semakin banyak jumlah bus, semakin besar selisih waktu antara metode *Newton-Raphson* dan *Holomorphic Embedding*.
3. Metode *Newton-Raphson* dan *Holomorphic Embedding* relatif tidak bergantung dengan banyaknya bus atau besarnya sistem. Hal ini dibuktikan bahwa saat melakukan perhitungan hingga 30 bus, baik metode *Newton-Raphson* maupun *Holomorphic Embedding*, jumlah iterasi tidak berubah secara signifikan.

### B. Saran

Saran yang dapat diberikan dari skripsi ini adalah :

1. Metode *Holomorphic Embedding* ini dapat disimulasikan pada analisis aliran daya dengan jumlah bus lebih dari 30 bus.
2. Metode *Holomorphic Embedding* dapat disimulasikan pada analisis aliran daya dengan menganalisis PV bus.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Arrillaga, J. & Arnold, C.P. 1990. Computer Analysis of Power Systems. Chichester : John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Kundur, P. 1994. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill.
- [3] Lawang, O. 2008. Optimasi Load Tap Changing Transformer Menggunakan Algoritma Genetika Guna Meminimalisasi Rugi Daya Transmisi. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [4] Shidiq, M. 2009. Operasi Sistem Daya Elektrik. Malang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- [5] Stagg, G. W. & El-Abiad, A. H. 1968. Computer Methods in Power System Analysis. Tokyo: McGraw-Hill.
- [6] Stevenson, W. D. & Grainger, J. J. 1984. Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat. Jakarta: Erlangga.
- [7] Subramanian, M. K. 2014. Application of Holomorphic Embedding to the Power Flow Problem. Thesis. USA: Arizona State University.
- [8] Subramanian, M. K., Feng, Y., & Tylavsky, D. 2013. PV Bus Modeling in a Holomorphically Embedded Power-Flow Formulation dalam North American Power Symposium. Manhattan, 22-24 September 2013.
- [9] Tinney, W. & Hart, C. Power Flow Solution by Newton's Method. 1967. IEEE Journal. Vol. PAS-86, No. 11: 1449-1460.
- [10] Trias, A. 2012. The Holomorphic Embedding Load Flow Method dalam IEEE PES General Meeting. San Diego, 22-26 July 2012.
- [11] Wang, X. F., Song, Y., & Irving, M. 2008. Modern Power System Analysis, New York: Springer Science and Business Media.
- [12] Ward, J. B. & Hale, H. W. 1956. Digital Computer Solution of Power-Flow Problems. IEEE Journal. Vol. 75, No. 3: 398-404.
- [13] Zimmerman, R. D. & Murillo-Sanchez, C. E. 2011. MATPOWER 4.1: User's Manual. Colombia. Power Systems Engineering Research Center (Pserc).