

Studi Aliran Beban Sistem 150 KV Wilayah Sulawesi Utara - Gorontalo

Indra Pondaag, Glanny M. Ch. Mangindaan, Lily S. Patras
Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sam Ratulangi Manado, Jl. Kampus Bahu, 95115, Indonesia
pondaagindra@gmail.com, glanny_m@unsrat.ac.id, lilys_patras@yahoo.com
Diterima: 13 Oktober 2020; direvisi: 15 Oktober 2020; disetujui: 23 Oktober 2020

Abstract — *The study or analysis of the power flow is needed to determine the operating condition of the electrical power system in a steady state, through solving the equation of power flow on the network. The main purpose of the power flow study is to determine the voltage magnitude, voltage angle, active power flow and reactive power on the line as well as transmission losses that appear in the power system. Power Flow Analysis on the 150 kV system in North Sulawesi - Gorontalo was conducted by Newton-Raphson method, and then compared to the simulation results of Power System Analysis Toolbox (PSAT). In the simulation, the system is in good condition until the load increases to 120%. When the load is raised to 150%, the system has a power deficit. When generation is lowered to 85% (simulation 4) the voltage quality becomes better. In simulation 4, there was a more economical operation, power loss was also reduced. In simulation 5, where bus7 was released, there was a voltage 0.828179 pu (per unit), the power loss in simulation 5 is also very large.*

Keywords — *Line Power Loss; Load; Phase Angle; Power Flow; Transmission.*

Abstrak — *Studi atau analisa aliran daya dibutuhkan untuk menentukan kondisi operasi sistem tenaga listrik dalam kondisi mantap (steady state), melalui pemecahan persamaan aliran daya pada jaringan. Tujuan utama studi aliran daya adalah untuk menentukan magnitude tegangan, sudut tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran serta rugi-rugi transmisi yang muncul dalam sistem tenaga. Analisis Aliran Daya pada sistem 150 kV wilayah Sulawesi Utara - Gorontalo dilakukan dengan metode Newton-Raphson, dan kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi Power System Analysis Toolbox (PSAT). Pada simulasi yang dilakukan, sistem berada dalam kondisi baik sampai pada peningkatan beban menjadi 120%. Ketika beban dinaikkan menjadi 150%, sistem mengalami defisit daya, karena slack bus (PLTP Lahendong unit 1-4) telah melewati batas kapasitas daya aktif 1.5 pu (per unit). Saat pembangkitan diturunkan menjadi 85% (simulasi 4) rugi daya menjadi berkurang dibandingkan pada simulasi 1, 2 dan 3. Pada simulasi 4, terjadi operasi yang lebih ekonomis, serta rugi daya juga berkurang. Pada simulasi 5, dimana bus7 dilepas, tegangan menjadi 0.828179 pu, rugi daya pada simulasi 5 juga sangat besar.*

P. Indra is with the Sam Ratulangi University, Manado, CO 95115 IND (corresponding author to provide phone: 0812-4440-4997; fax: 0812-4440-4997; e-mail: pondaagindra@gmail.com).

M. Ch. Glanny, Ph.D., was with Sam Ratulangi University, Manado, CO 95115 IND. He is now with the Department of Engineering, Sam Ratulangi University, Manado, CO 95115 IND (e-mail: glanny_m@unsrat.ac.id).

Kata kunci — *Aliran Daya; Beban; Rugi Daya Saluran; Sudut Fasa; Tegangan; Transmisi.*

I. PENDAHULUAN

Kecenderungan sistem tenaga listrik saat ini adalah terbentuknya sistem interkoneksi antara satu pusat pembangkit dengan pembangkit lainnya dengan tujuan untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik secara terus-menerus kepada konsumen dalam jumlah dan mutu yang baik. Untuk tujuan itu, sistem tenaga listrik haruslah direncanakan dan dioperasikan dengan baik [1].

Supaya sistem tenaga dapat dioperasikan dengan baik, dibutuhkan studi atau analisa aliran daya sistem tenaga listrik dalam kondisi mantap (steady state), melalui pemecahan persamaan aliran daya pada jaringan. Tujuan utama studi aliran daya adalah untuk menentukan magnitude tegangan, sudut tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran serta rugi-rugi transmisi yang muncul dalam sistem tenaga. Hasil studi aliran daya dapat dijadikan pedoman dalam perencanaan, pengoperasian sistem, penjadwalan ekonomis sistem pembangkit dan juga dibutuhkan dalam banyak analisis seperti stabilitas transien dan studi kontingensi [2].

Studi aliran daya dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik Sulawesi Utara – Gorontalo yang merupakan suatu sistem interkoneksi yang terdiri atas berbagai pusat tenaga listrik yang terhubung melalui saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 kV. Dengan adanya sebuah studi tentang aliran daya pada sistem tenaga listrik Sulawesi Utara – Gorontalo diharapkan dapat menjadi suatu sumbangsih untuk meningkatkan keandalan Sistem Tenaga Listrik Sulawesi Utara – Gorontalo kedepannya, serta data hasil analisa daya dapat digunakan dalam melakukan perencanaan peningkatan beban, peningkatan pembangkitan, juga peninjauan dalam melakukan pelepasan pembangkit listrik.

Untuk melakukan analisis aliran daya yang akurat, berbagai metode telah dikembangkan untuk digunakan, salah satunya adalah metode Newton-Raphson. Dengan metode Newton Raphson, proses pencarian solusi aliran daya dapat dilakukan dengan hasil yang akurat, serta memiliki jumlah iterasi yang lebih sedikit (lebih cepat) daripada metode terdahulunya seperti metode Gauss-Siedel [3]. Namun algoritma Load Flow Newton-Raphson juga tergolong sulit, sebab harus memperhitungkan laju perubahan variabel daya

terhadap variabel tegangan dan sudut fasa, atau yang disebut dengan komponen Jacobian [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis aliran daya sistem tenaga listrik wilayah Sulawesi Utara – Gorontalo pada kondisi normal (*steady state*) dengan metode Newton Raphson.

A. Analisis Aliran Daya

Dalam analisis rangkaian listrik pada umumnya, suatu sumber dinyatakan sebagai sumber tegangan ideal atau sumber arus ideal, dan beban dinyatakan sebagai impedansi. Sumber tegangan ideal memberikan daya ke rangkaian pada tegangan tertentu, berapapun besar arus yang dibutuhkan oleh rangkaian; sumber arus ideal memberikan daya pada rangkaian pada arus tertentu, berapapun tegangan yang diperlukan oleh rangkaian. Oleh karena itu, apabila rangkaian merupakan rangkaian linier, terdapat hubungan linier antara tegangan, arus dan impedansi; dan dalam analisis, misalnya dengan menggunakan metoda tegangan simpul, kita memperoleh persamaan linier. Dalam sistem tenaga, kita melihat situasi yang berbeda. Sumber merupakan sumber daya yang hanya boleh beroperasi pada batas daya dan tegangan tertentu. Sementara beban dinyatakan sebagai besar daya yang diminta/diperlukan, pada tegangan yang juga ditentukan. Suatu permintaan daya hanya dapat dilayani selama pembebanan tidak melampaui batas daya yang mampu disediakan oleh sumber. Kita mengetahui bahwa walaupun rangkaian tetap rangkaian linier, relasi daya antara sumber dan beban tidaklah linier. Oleh karena itu jika kita menurunkan persamaan rangkaian, dengan daya sebagai parameter, persamaan rangkaian yang kita peroleh merupakan persamaan nonlinier. Dalam memecahkan persamaan nonlinier ini diperlukan cara khusus [5].

B. Jenis-jenis Busbar dalam Aliran Daya

Bus-bus dalam rangkaian sistem tenaga merupakan simpul-simpul rangkaian yang biasa dikenal dalam analisis rangkaian listrik. Bus-bus ini dapat dikelompokkan dalam beberapa jenis [6] :

1) Generator bus, adalah bus dimana generator dihubungkan melalui transformator. Daya yang masuk dari generator ke bus ini dan yang kedua adalah aliran daya menuju saluran transmisi. Daya yang langsung menuju beban dinyatakan dengan persamaan (2):

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \tag{1}$$

Dari bus ke-i ini mengalir daya ke dua jurusan; yang pertama adalah aliran daya langsung ke beban yang terhubung ke bus ini dan yang kedua adalah aliran daya menuju saluran transmisi. Daya yang langsung menuju beban dinyatakan dengan persamaan (2):

$$S_{Bi} = P_{Bi} + jQ_{Bi} \tag{2}$$

Dan daya yang menuju saluran transmisi menjadi dinyatakan dengan persamaan (3):

$$S_i = P_i + jQ_i = S_{Gi} - S_{Bi} \tag{3}$$

2) Bus yang tidak terhubung ke generator tetapi terhubung hanya ke beban disebut *load bus*. Dari bus beban j mengalir

daya menuju ke beban sebesar S_{Bj} atau daya yang mengalir ke saluran transmisi dinyatakan dengan persamaan (4):

$$S_J = -S_{Bj} \tag{4}$$

3) *Slack bus* atau bus mengambang atau swing bus. Bus ini seolah berfungsi sebagai simpul sumber tegangan bebas dan yang ditetapkan pada bus ini adalah tegangan dan sudutnya.

C. Persamaan Arus-Tegangan

Karena relasi linier hanya ada pada tegangan dan arus, tidak pada daya, maka persamaan aliran daya harus diturunkan melalui persamaan arus dan tegangan terlebih dahulu. Selain itu, karena digunakan sistem per-unit, impedansi transformator dapat disatukan dengan impedansi generator sehingga transformator tak digambarkan lagi dalam diagram satu garis untuk analisa ini.

1) Sistem dengan dua bus

Tinjau bus generator nomor 1 yang terhubung melalui saluran transmisi ke bus generator nomor 2. Diagram satu garis dan model satu fasa dapat dilihat pada gambar 1 dimana:

S_{G1}, S_{G2} : Daya per fasa generator;

V_1, V_2 : Tegangan fasa - netral;

\bar{I}_1, \bar{I}_2 : Arus ke saluran transmisi dari bus 1 dan bus 2;

$\bar{I}_{B1}, \bar{I}_{B2}$: Arus beban (langsung) dari bus 1 dan bus 2;

z_{12} : Impedansi seri antar bus dalam rangkaian ekivalen pi;

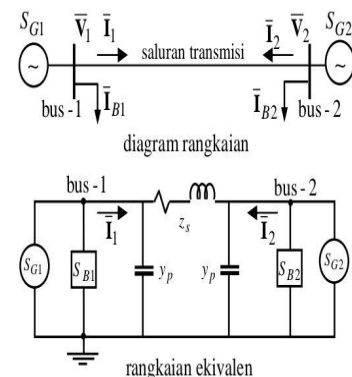
y_p : Admitansi paralel saluran transmisi pada rangkaian ekivalen pi.

Arus yang keluar dari bus 1 ke saluran transmisi dinyatakan dengan persamaan (4):

$$\bar{I}_1 = y_p V_1 + y_{12} (V_1 - V_2) = (y_p + y_{12})V_1 - y_{12}V_2 \tag{4}$$

Dengan demikian kita memperoleh persamaan (5) dan (6) untuk sistem dengan dua bus:

$$\bar{I}_1 = Y_{11}V_1 - y_{12}V_2 \tag{5}$$



Gambar 1. Model satu fasa diagram dan rangkaian ekivalen

$$\bar{I}_2 = -Y_{12}V_1 + y_{22}V_1 \tag{6}$$

2) Sistem dengan Tiga Bus

Persamaan (5) dan (6) dikembangkan untuk sistem dengan Tiga Bus menjadi persamaan (7):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \tag{7}$$

3) Sistem dengan n Bus

Persamaan dengan Tiga Bus dikembangkan untuk sistem dengan n Bus seperti pada persamaan (8):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & \dots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & Y_{2n} & Y_{3n} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{8}$$

Persamaan (8) dapat diringkas menjadi persamaan (9):

$$\bar{I}_{bus} = [Y_{bus}] [V_{bus}] \tag{9}$$

D. Persamaan Aliran Daya

Untuk menurunkan persamaan aliran daya, perlu diperhatikan arus yang mengalir ke saluran transmisi (tidak termasuk arus ke beban langsung). Untuk bus i dalam sistem dengan n bus, kita dapatkan persamaan Aliran Daya seperti pada persamaan (10) - (14), dimana ψ_i merupakan sudut fasa tegangan pada bus i dan θ_{ij} adalah sudut fasa admitansi saluran antara bus i dan j:

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \tag{10}$$

$$S_i = V_i I_i = V_i \sum_{j=1}^n (Y_{ij}V_j)^* \tag{11}$$

$$S_i = V_i \angle \psi_i \sum_{j=1}^n (|Y_{ij}| \angle -\theta_{ij} V_j \angle -\psi_j = P_i + jQ_i \tag{12}$$

$$P_i = V_i \left(\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\psi_i - \theta_{ij} - \psi_j) \right) \tag{13}$$

$$Q_i = V_i \left(\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\psi_i - \theta_{ij} - \psi_j) \right) \tag{14}$$

Perhatikan bahwa S_i adalah daya yang mengalir ke saluran transmisi [7]. Hubungan dengan daya generator bisa diperoleh dengan persamaan (15)

$$S_i = P_i + jQ_i = S_{Gi} - S_{Bi} \tag{15}$$

Persamaan (15) dapat diturunkan menjadi persamaan aliran daya seperti pada persamaan (16) dan (17):

$$P_{Gi} - P_{Bi} = V_i \left(\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\psi_i - \theta_{ij} - \psi_j) \right) \tag{16}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Bi} = V_i \left(\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\psi_i - \theta_{ij} - \psi_j) \right) \tag{17}$$

Persamaan (16) dan (17) adalah dua persamaan yang diperoleh untuk setiap bus i, dalam persamaan ini terdapat enam besaran peubah yang terkait dengan bus yang bersangkutan, seperti pada persamaan (18):

$$P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Bi}, Q_{Bi}, V_i, \psi_i \tag{18}$$

Besaran yang lain adalah besaran di luar bus i. Jika bus I adalah bus generator, maka sebagian besaran yang terdapat pada persamaan (16) dan (17) merupakan besaran yang diketahui atau ditentukan: Pbi dan Qbi adalah daya beban yang diketahui; Pgi merupakan besaran yang diketahui karena daya nyata ini bisa ditentukan dengan mengatur masukan uap di turbin misalnya; Vi juga tertentu besarnya karena bisa diatur melalui arus eksitasi; Qgi walaupun tidak diketahui namun akan tertentu besarnya jika tegangan dan sudut fasa diketahui; dengan demikian hanya tinggal satu peubah yang harus dihitung yaitu ψ .

Jika bus i adalah bus beban, tak ada generator yang terhubung ke bus ini; maka P_{Gi} dan Q_{Gi} bernilai nol, dan $P_i = -P_{Bi}$ dan $Q_i = -Q_{Bi}$ keduanya diketahui atau ditentukan (tanda minus pada Pbi dan Qbi diberikan karena daya dianggap mengalir ke saluran. Dengan demikian untuk bus beban ada dua besaran peubah yang harus dihitung yaitu V_i dan ψ_i .

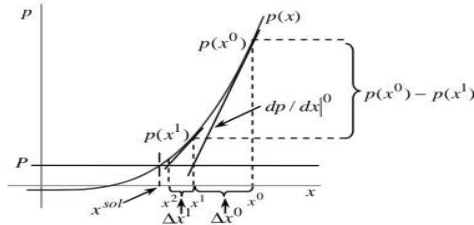
Jadi di setiap bus pada dasarnya hanya ada dua atau satu peubah yang harus dicari, yaitu V_i, ψ_i pada bus beban dan ψ_i di bus generator. Dalam satu jaringan transmisi yang terdiri dari total n bus, dengan n_g bus generator dan satu slack bus, terdapat besaran yang harus dihitung sebanyak persamaan (19):

$$N = 2(n-1) - n_g \tag{19}$$

Kebanyakan bus dalam sistem tenaga adalah bus beban; hanya sebagian kecil dari total jumlah bus merupakan bus generator.

E. Metode Newton-Raphson

Pada gambar 2 misalkan diberikan sebuah persamaan nonlinier dengan ruas kanan tidak sama dengan nol, $p(x) = P$:



Gambar 2. Proses iterasi untuk persamaan $p(x) = P$

Solusi yang dicari adalah x^{sol} yang berada pada titik potong kurva $p(x)$ dengan garis P sejajar sumbu x . x^0 merupakan estimasi awal solusi persamaan. Dan jika $p(x^0)$ belum sama dengan atau setidaknya mendekati nilai P , maka perlu dicari estimasi solusi lainnya, dinamakan x^1 . Untuk menentukan x^1 secara efektif agar $p(x)$ semakin dekat dengan nilai P , maka dibuat garis singgung pada titik $(x^0, p(x^0))$, yaitu dengan

diferensial: $\left. \frac{dp}{dx} \right|^0$. Setelah dibuat garis singgung di titik $(x^0, p(x^0))$, garis singgung ini akan memotong garis P yang sejajar sumbu x pada titik x^1 . Kemudian jika x^1 belum lagi mendekati P , maka ditarik lagi garis singgung di titik $(x^1, p(x^1))$ untuk menentukan x^2 , dan begitu seterusnya sampai menemukan x^{sol} atau setidaknya mendekati sesuai dengan toleransi yang telah ditentukan [8].

Δx^0 adalah jarak antara x^0 dengan x^1 , dan dapat dihitung:

$$\Delta x^0 = \frac{P - p(x^0)}{\left. \frac{dp}{dx} \right|^0}$$

. Antara $p(x^n)$ dengan P memiliki selisih sebesar: $\Delta p(x^n) = P - p(x^n)$. Dalam perjalanan menuju P tersebut, alur yang kita lewati adalah kurva $p(x)$. secara umum, pada iterasi ke k kita akan mempunyai persamaan yang memberikan perbedaan nilai fungsi dengan nilai seharusnya, seperti pada persamaan (20):

$$\Delta p^k = \left(\frac{dp}{dx} \right)^k \Delta x^k \tag{20}$$

Pada persamaan dua peubah, didapatkan pengembangan seperti pada persamaan (21) dan (22):

$$\Delta p^0 = P - p(x^0, y^0) = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^0 \Delta x^0 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^0 \Delta y^0 \tag{21}$$

$$\Delta q^0 = P - q(x^0, y^0) = \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)^0 \Delta x^0 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \right)^0 \Delta y^0 \tag{22}$$

Yang dapat dituliskan dalam bentuk matriks seperti pada persamaan (23):

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix}^0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} & \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial q}{\partial x} & \frac{\partial q}{\partial y} \end{bmatrix}^0 \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}^0 = J^0 \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}^0 \tag{23}$$

Matriks 2×2 turunan parsial terhadap x dan y disebut *Jacobian* dan dinyatakan dengan J . Apabila Δp^0 dan Δq^0 tidak bernilai nol maka didapatkan persamaan (24):

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}^0 = (J^{-1})^0 \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix}^0 \tag{24}$$

Inilah persamaan untuk menentukan besar koreksi. Dengan persamaan (24) ini dapat dihitung Δx_0 dan Δy_0 sehingga dapat diperoleh x_1 dan y_1 untuk iterasi selanjutnya seperti pada persamaan (25):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}^1 = \begin{bmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \end{bmatrix}^0 \tag{25}$$

F. Aplikasi pada Analisis Aliran Daya

Dalam menuliskan persamaan aliran daya, kita memperlakukan semua bus sebagai bus beban, agar penulisan lebih terstruktur; ini berarti bahwa semua bus mengandung dua peubah yaitu tegangan dan sudut fasanya, walaupun ada peubah yang sudah ditetapkan di beberapa bus generator.

Karena *slack bus* ditetapkan sebagai bus nomor 1, dengan tegangan $1 \angle 0^\circ$ pu, maka kita bekerja mulai dari bus 2, dan nilai peubah yang harus dicari agar persamaan aliran daya terpenuhi adalah tegangan serta sudut fasa di setiap bus yaitu V dan Ψ [9]. Pengembangan untuk jaringan transmisi dengan n bus adalah seperti pada persamaan (26) - (29) [10]:

$$\Delta \bar{u}^{-k} = \begin{bmatrix} \Delta p_2 \\ \Delta p_3 \\ \vdots \\ \Delta p_n \\ \Delta q_2 \\ \vdots \\ \Delta q_n \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} P_2 - p_2(V_2, \Psi_2, \dots, \Psi_n) \\ P_3 - p_3(V_2, \Psi_2, \dots, \Psi_n) \\ \vdots \\ P_n - p_n(V_2, \Psi_2, \dots, \Psi_n) \\ Q_2 - q_2(V_2, \Psi_2, \dots, \Psi_n) \\ \vdots \\ Q_n - q_n(V_2, \Psi_2, \dots, \Psi_n) \end{bmatrix}^k \tag{26}$$

$$\Delta \bar{u}^{-k} = J^k \Delta x^k \tag{27}$$

$$J^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial V_2} & \frac{\partial p_2}{\partial \Psi_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial V_n} & \frac{\partial p_2}{\partial \Psi_n} & \dots \\ \frac{\partial p_3}{\partial V_2} & \frac{\partial p_3}{\partial \Psi_2} & \dots & \frac{\partial p_3}{\partial V_n} & \frac{\partial p_3}{\partial \Psi_n} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \frac{\partial p_n}{\partial V_2} & \frac{\partial p_n}{\partial \Psi_2} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial V_n} & \frac{\partial p_n}{\partial \Psi_n} & \dots \\ \frac{\partial q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial q_2}{\partial \Psi_2} & \dots & \frac{\partial q_2}{\partial V_n} & \frac{\partial q_2}{\partial \Psi_n} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \frac{\partial q_n}{\partial V_2} & \frac{\partial q_n}{\partial \Psi_2} & \dots & \frac{\partial q_n}{\partial V_n} & \frac{\partial q_n}{\partial \Psi_n} & \dots \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$\Delta \bar{x}^k = \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \cdot \\ \Delta V_n \\ \Delta \Psi_2 \\ \cdot \\ \Delta \Psi_n \end{bmatrix}^k = (J^{-1})^k \Delta \bar{u}^k \quad (29)$$

$\Delta \bar{u}^k$ pada persamaan (26) adalah *vector* yang berisi perbedaan nilai daya di setiap bus terhadap nilai daya yang ditetapkan untuk setiap bus yang bersangkutan pada iterasi ke k, baik daya nyata maupun daya reaktif. $\Delta \bar{x}^k$ pada persamaan (29) adalah *vector* yang berisi koreksi peubah di setiap bus, yaitu tegangan dan sudut fasanya, yang diperoleh pada iterasi ke k untuk melakukan iterasi selanjutnya. Pada waktu menetapkan dugaan awal misalnya, diperoleh $\Delta \bar{x}^0$ untuk melakukan koreksi pada iterasi ke 1; diperoleh $\Delta \bar{x}^1$ untuk melakukan koreksi pada iterasi ke 2 dan seterusnya. Matriks jacobian adalah matriks yang berisi laju perubahan daya, baik daya nyata maupun daya reaktif, terhadap perubahan tegangan maupun sudut fasa di setiap bus. Perhatikan bahwa daya merupakan fungsi semua peubah di setiap bus. Oleh karena itu, perbedaan nilai daya di setiap bus dengan daya yang ditetapkan pada bus yang bersangkutan pada iterasi ke k, merupakan hasil kali matriks jacobian pada iterasi ke k dengan *vector* koreksi tegangan maupun sudut fasa pada iterasi ke k. Jika matriks jacobian tidak bernilai nol, yang berarti dalam peninjauan grafis (pada persamaan dengan peubah tunggal misalnya), garis singgung pada kurva tidak sejajar dengan sumbu x, besaran koreksi dapat dihitung dengan persamaan (29).

II. METODE

A. Metode Pengumpulan Data

Data yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang berasal dari literatur-literatur atau sumber-sumber yang mendukung penelitian ini. Data-data sekunder merupakan data yang diperoleh dari pihak lain (sudah tersedia) dan digunakan untuk penelitian lain. Data-data yang dibutuhkan yang telah disebutkan sebelumnya, dapat diperoleh dari PT. Unit Penyaluran dan Pengaturan Beban (UP2B) Wilayah SulutGo, Tomohon, dan juga data teknis saluran transmisi dapat diperoleh dari PT. Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Wilayah SulutGo, Tomohon. Data-data lainnya juga dapat diambil dari buku-buku dan jurnal-jurnal yang berkaitan dengan penelitian ini, untuk mendapatkan landasan teori dan konsep yang tersusun.

B. Metode Analisa Data

Data yang telah diperoleh dari pengumpulan data kemudian dianalisa dan diolah dengan metode iterasi Newton-

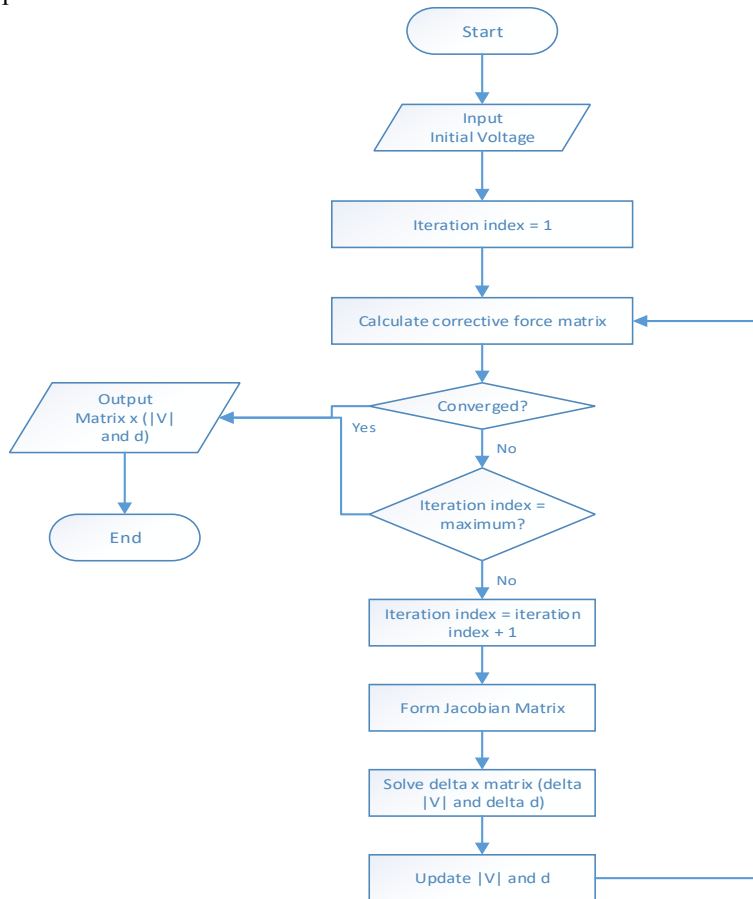
Raphson untuk memperoleh solusi aliran daya, setelah itu data-data tersebut dibandingkan dengan simulasi Power System Analysis Toolbox (PSAT) yang ada pada matlab. Flowchart untuk metode Newton Raphson seperti pada gambar 3. Rangkaian *single line diagram* pada PSAT dapat dilihat seperti pada gambar 4 dan 5.

C. Prosedur Analisa Data

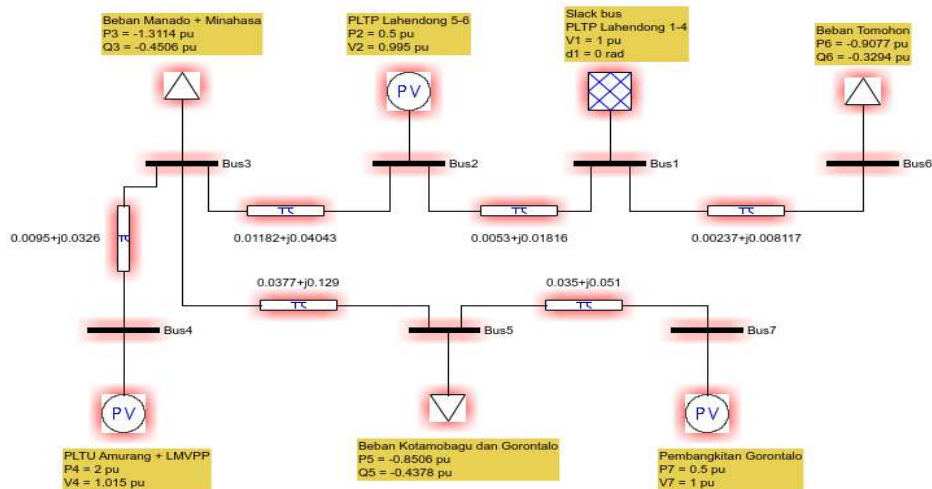
Solusi suatu persamaan aliran daya adalah mencari profil tegangan di semua bus dalam suatu sistem tenaga. Karena persamaan daya merupakan persamaan non-linier, maka solusi dilakukan dengan cara iterasi. Proses pencarian solusi adalah sebagai berikut:

- 1) Berdasarkan pada data teknis dari jaringan, tentukan elemen-elemen dari matriks [Ybus].
- 2) Pada bus beban tentukan P_B, Q_B .
- 3) Pada bus generator tentukan nilai tegangan bus V dan P_G .
- 4) Buat *slack bus* (bus nomor 1) bertegangan $\bar{V}_1 = 1 \angle 0^\circ$.
- 5) Masukkan parameter yang diketahui maupun yang tidak diketahui ke persamaan aliran daya di bus beban (PQ bus) dan bus generator (PV bus). Parameter yang diketahui (known parameters) akan menjadi konstanta pada persamaan, sedangkan parameter yang tidak diketahui (unknown parameters) akan menjadi variable yang akan diselesaikan pada persamaan tersebut (V dan δ).
- 6) Membentuk komponen matriks Jacobian [J] berdasarkan persamaan aliran daya yang didiferensialkan secara parsial terhadap parameter-parameter yang akan diselesaikan.
- 7) Menentukan daya tetapan yang harus dicapai sebagai konvergensi iterasi. Daya tetapan ini dapat dibentuk sebagai matriks [S] (S huruf besar untuk membedakannya nanti dengan daya hasil tiap iterasi huruf kecil "s").
- 8) Inisiasikan unknown parameters |V| dan δ ke dalam matriks [x]. Untuk awal iterasi, matriks [x] akan berisi perkiraan/initial |V| dan δ unknown parameters. Pada iterasi selanjutnya, matriks [x] akan berisi nilai |V| dan δ yang merupakan hasil akhir iterasi sebelumnya.
- 9) Setelah poin 8 diinputkan pada persamaan aliran daya, maka akan diperoleh daya hasil iterasi ke k. Daya hasil iterasi ke k tersebut dapat dibuat sebagai matriks [s](k).
- 10) Matriks [x] pada poin 8 juga diinputkan ke komponen matriks Jacobian. Kemudian komponen-komponen matriks Jacobian tersebut dibuat sebagai Matriks [J].
- 11) Menghitung invers dari matriks [J].
- 12) Menghitung matriks corrective force [ΔS], atau matriks penentu konvergensi iterasi.
- 13) Menghitung matriks residu |V| dan δ , yaitu matriks [Δx] dengan persamaan.
- 14) Kemudian hitung matriks [X] (huruf besar untuk membedakan dengan matriks [x] huruf kecil pada poin 8) sebagai hasil akhir iterasi.
- 15) Jika hasil perhitungan pada poin 12 sudah sangat mendekati nol atau sudah mencapai hasil yang ditentukan, maka [X] menjadi matriks penyelesaian dari |V| dan δ yang sebelumnya tidak diketahui, dan iterasi berhenti.
- 16) Jika hasil perhitungan pada poin 12 belum mendekati nol atau belum mencapai hasil yang ditentukan, maka iterasi berlanjut. Matriks [X] (huruf besar) diubah menjadi

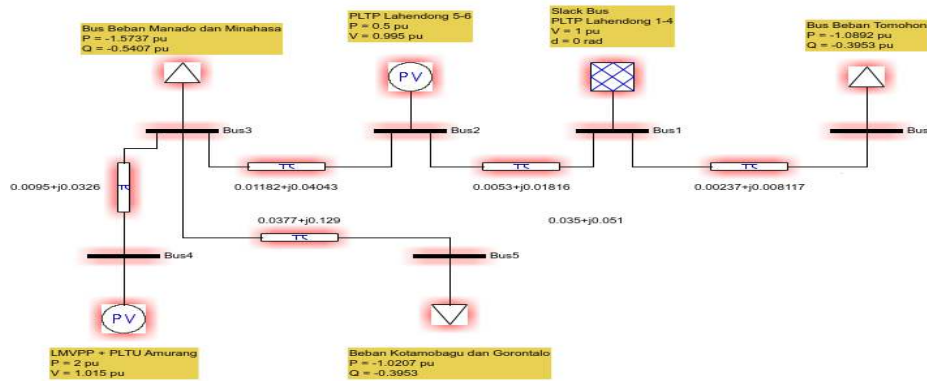
matriks [x] (huruf kecil) seperti pada poin 8, kemudian ulangi dari poin 8 sampai 16.



Gambar 3. Flowchart Metode Newton Raphson



Gambar 4. Representasi Sistem Tenaga SulutGo 7 Busbar



Gambar 5. Representasi Sistem Tenaga SulutGo 6 Busbar untuk Simulasi 5

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Analisis Dengan Metode Newton-Raphson

Analisa ini dilakukan dengan 5 simulasi dengan kondisi yang berbeda,

- 1) Kondisi sistem normal. Beban 100% dan Pembangkitan 100%;
- 2) Kondisi beban meningkat menjadi 120%;
- 3) Kondisi beban meningkat menjadi 150%;
- 4) Kondisi Pembangkitan turun menjadi 85%;
- 5) Simulasi Bus 7 lepas dari sistem.

a. Hasil Analisis Simulasi 1

Pada simulasi 1, seperti pada table I - IV, tegangan terendah berada di bus 5, yaitu sebesar 0.9624 pu. Aliran daya aktif terbesar terjadi dari bus 4 ke bus 3. Sedangkan aliran daya reaktif terbesar terjadi dari bus 1 ke bus 2. Slack bus masih tidak melewati batas kapasitas daya aktif 1.5 per unit (p.u) (150 MW). Rugi daya terbesar terjadi pada saluran antara bus 3 dan bus 4.

Aliran daya line to line dapat dihitung dengan persamaan (30) - (32) yang merupakan persamaan awal aliran daya sebelum diturunkan:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i (Y_{ij} (V_i - V_j))^* \quad (30)$$

$$P_{ij} = Y_{ij} V_i^2 \cos(-\theta_{ij}) - V_i Y_{ij} V_j \cos(\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) \quad (31)$$

$$Q_{ij} = Y_{ij} V_i^2 \sin(-\theta_{ij}) - V_i Y_{ij} V_j \sin(\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) \quad (32)$$

Rugi daya saluran dapat dihitung dengan persamaan (33) dan (34):

$$p_{ij} = (|P_{ij}| - |P_{ji}|) \quad (33)$$

$$q_{ij} = (|Q_{ij}| - |Q_{ja}|) \quad (34)$$

b. Hasil analisis simulasi 2

Pada simulasi 2, tegangan terendah berada di bus 5, yaitu sebesar 0.9555 pu. Aliran daya aktif terbesar terjadi dari bus 4

ke bus 3. Sedangkan aliran daya reaktif terbesar terjadi dari bus 7 ke bus 5. Daya reaktif dari bus 7 ke 5 meningkat karena beban induktif bus 5 juga meningkat. Slack bus masih tidak melewati batas kapasitas daya aktif 1.5 pu (150 MW). Rugi daya aktif terbesar terjadi pada saluran antara bus 5 dan bus 7. Sedangkan rugi daya reaktif terbesar terjadi pada saluran antara bus 3 dan bus 4.

c. Hasil analisis simulasi 3

Pada simulasi 3, tegangan terendah berada di bus 5, yaitu sebesar 0.9444 pu. Sistem belum terlalu siap untuk kondisi pembebanan yang meningkat menjadi 150%, sebab total rugi daya yang dihasilkan pun sangat besar pada simulasi ini jika dibandingkan dengan beban 100% dan beban 120%. Slack bus juga telah melewati kapasitas daya aktif 1.5 pu (150 MW) untuk memenuhi penambahan beban yang terjadi. Artinya dengan kondisi pembebanan 150%, sistem Sulut-Go akan mengalami defisit daya dan rugi daya yang besar. Aliran daya aktif terbesar terjadi dari bus 4 ke bus 3. Sedangkan aliran daya reaktif terbesar terjadi dari bus 7 ke bus 5. Daya reaktif dari bus 7 ke 5 meningkat karena beban induktif bus 5 juga meningkat. Rugi daya aktif maupun daya reaktif terbesar terjadi pada saluran antara bus 3 dan bus 4.

d. Hasil analisis simulasi 4

Simulasi 4, yaitu pembangkitan diturunkan menjadi 85% pada saat beban 100%, memberikan hasil yang lebih baik daripada simulasi 1, 2 dan 3, baik dari segi kualitas tegangan, maupun dari minimnya rugi-rugi daya yang dihasilkan pada simulasi 4, serta dari segi biaya pembangkitan, bahkan jika dibandingkan dengan simulasi 1. Penurunan pembangkitan daya ini dapat menjadi strategi untuk operasi ekonomis sistem tenaga listrik, juga untuk mengoptimalkan tegangan sistem. Sebab biaya pembangkitan tentunya akan berkurang. Walaupun pembangkitan pada PLTP 1-4 meningkat sedikit dibandingkan pada simulasi 1, namun pembangkitan pada PLTU dan LMVPP diturunkan sebanyak 85%. Tentunya kita tahu bahwa pembangkitan pada PLTU dan LMVPP yang menggunakan batu bara lebih mahal biayanya jika dibandingkan dengan pembangkitan pada PLTP yang menggunakan panas bumi. Sehingga simulasi 4 memberikan hasil yang lebih ekonomis dibandingkan simulasi 1-3, dan

TABEL I
TEGANGAN DAN SUDUT FASA SIMULASI 1

Bus	V NR	d NR
1	1.0000	0.0000
2	0.9950	0.0169
3	0.9862	0.0320
4	1.0150	0.0937
5	0.9624	-0.0149
6	0.9951	-0.0066
7	1.0000	-0.0028

TABEL II
DAYA BUSBAR SIMULASI 1

Bus	P NR (p.u)	Q NR (p.u)
1	0.1191	0.8511
2	0.5000	-0.1934
3	-1.3114	-0.4506
4	2.0000	0.3710
5	-0.8506	-0.4378
6	-0.9077	-0.3294
7	0.5000	0.3958

TABEL III
ALIRAN DAYA LINE TO LINE SIMULASI 1

From-to	P (p.u)	Q (p.u)
1.2	-0.7774	0.5101
1.6	0.9091	0.3373
2.1	0.7820	-0.4944
2.3	-0.2798	0.3002
3.2	0.2818	-0.2933
3.4	-1.9620	-0.2399
3.5	0.3692	0.0826
4.3	2.0002	0.3709
5.3	-0.3637	-0.0636
5.7	-0.4859	-0.3750
6.1	-0.9069	-0.3296
7.5	0.5001	0.3957

juga rugi daya pada simulasi 4 lebih kecil dibandingkan bahkan dengan simulasi 1.

e. Hasil analisis simulasi 5

Pada simulasi 5, saat bus 7 dilepas dari sistem, bus 5 memiliki tegangan sebesar 0.8281 pu. Bus 7 yang merupakan representasi dari sistem pembangkitan wilayah Gorontalo tidak dapat disepelekan atau diabaikan. Simulasi 5 ini juga memberikan nilai rugi daya terbesar jika dibandingkan dengan

TABEL IV
RUGI DAYA SALURAN SIMULASI 1

Line	P (p.u)	Q (p.u)
1.2	0.0046	0.0157
1.6	0.0022	0.0076
2.3	0.0020	0.0069
3.4	0.0382	0.1310
3.5	0.0055	0.0190
5.7	0.0142	0.0207
Total	0.0668	0.2009

TABEL V
PERBANDINGAN NR DAN PSAT UNTUK TEGANGAN DAN SUDUT FASA SIMULASI 1

Bus	V			
	V NR	d NR	PSAT	d PSAT
1	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
2	0.9950	0.0169	0.9950	0.0168
3	0.9862	0.0320	0.9863	0.0319
4	1.0150	0.0937	1.0150	0.0935
5	0.9624	-0.0149	0.9624	-0.0152
6	0.9951	-0.0066	0.9951	-0.0066
7	1.0000	-0.0028	1.0000	-0.0031

simulasi 1-4. Rugi daya terbesar terjadi dari bus 3 ke bus 5.

B. Perbandingan Dengan Power System Analysis Toolbox (PSAT)

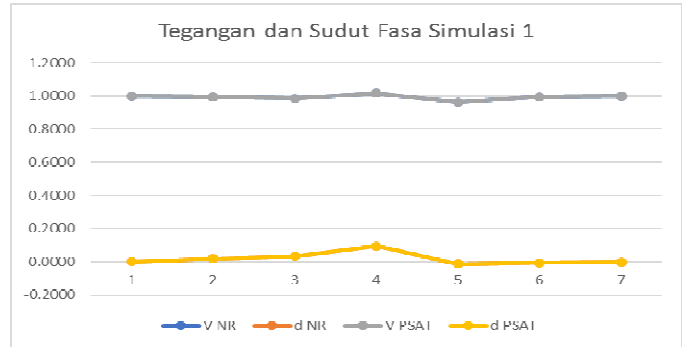
Selanjutnya perhitungan manual yang telah dilakukan dengan metode Newton Raphson akan dibandingkan dengan simulasi yang dilakukan dengan Power System Analysis Toolbox (PSAT).

Simulasi dengan PSAT memberikan hasil yang sangat mendekati nilai perhitungan manual, terlihat dari grafik yang sangat berhimpitan antara hasil Newton Raphson dengan PSAT. Perbedaan yang cukup mencolok hanya terjadi pada simulasi 3 untuk rugi daya pada line 3.5 dan pada total rugi daya simulasi 3. Dimana pada perhitungan manual, line 3.5 mengalami rugi daya reaktif sebesar 0.0014 pu, sedangkan pada simulasi dengan PSAT, line 3.5 mengalami rugi daya reaktif sebesar 0.0929 pu. Hal ini mempengaruhi rugi daya reaktif total pada simulasi 3. Untuk perhitungan manual, rugi daya reaktif total adalah sebesar 0.2347 pu, sedangkan rugi daya reaktif total dengan simulasi PSAT adalah sebesar 0.3214 pu. Untuk hasil rugi daya aktif, pada NR maupun PSAT memberikan hasil yang sama.

Perbandingan antara hasil simulasi NR dengan PSAT untuk simulasi 1 dapat dilihat seperti pada table V - VIII. Pada gambar 6 - 9 juga ditampilkan grafik perbandingan simulasi 1 untuk NR dengan PSAT.

TABEL VI
PERBANDINGAN NR DAN PSAT UNTUK DAYA BUSBAR SIMULASI 1

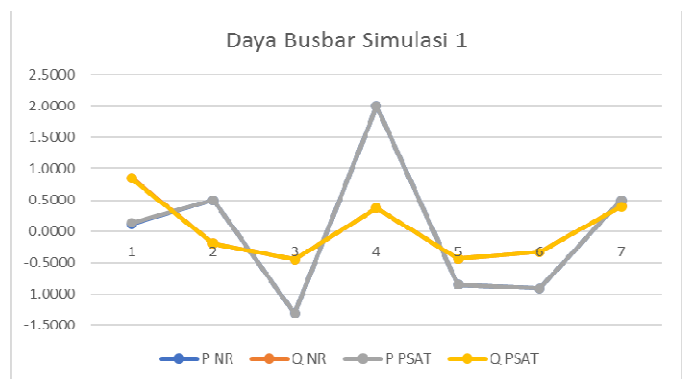
Bus	P NR	Q NR	P PSAT	Q PSAT
1	0.1191	0.8511	0.1364	0.8444
2	0.5000	-0.1934	0.5000	-0.1954
3	-1.3114	-0.4506	-1.3114	-0.4506
4	2.0000	0.3710	2.0000	0.3695
5	-0.8506	-0.4378	-0.8506	-0.4378
6	-0.9077	-0.3294	-0.9077	-0.3294
7	0.5000	0.3958	0.5000	0.3941



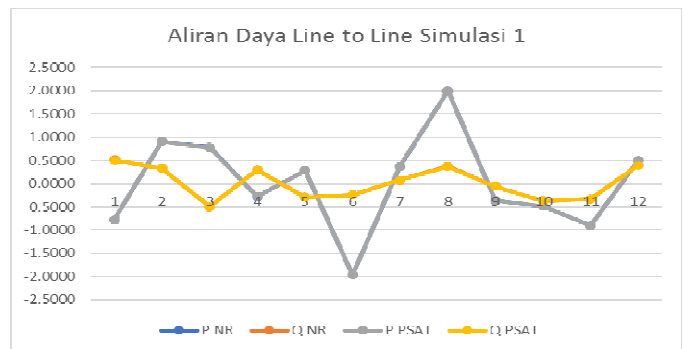
Gambar 6. Grafik NR dan PSAT untuk tegangan dan sudut fasa simulasi 1

TABEL VII
PERBANDINGAN NR DAN PSAT UNTUK ALIRAN DAYA LINE TO LINE SIMULASI 1

Line	From-to	P NR	Q NR	P PSAT	Q PSAT
1	1.2	-0.7774	0.5101	-0.7735	0.5083
2	1.6	0.9091	0.3373	0.9099	0.3360
3	2.1	0.7820	-0.4944	0.7781	-0.4938
4	2.3	-0.2798	0.3002	-0.2781	0.2984
5	3.2	0.2818	-0.2933	0.2801	-0.2926
6	3.4	-1.9620	-0.2399	-1.9619	-0.2396
7	3.5	0.3692	0.0826	0.3704	0.0816
8	4.3	2.0002	0.3709	2.0000	0.3695
9	5.3	-0.3637	-0.0636	-0.3648	-0.0634
10	5.7	-0.4859	-0.3750	-0.4858	-0.3744
11	6.1	-0.9069	-0.3296	-0.9077	-0.3294
12	7.5	0.5001	0.3957	0.5000	0.3941



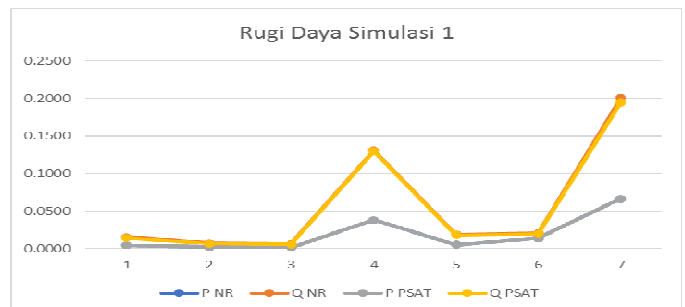
Gambar 7. Grafik NR dan PSAT untuk daya busbar simulasi 1



Gambar 8. Grafik NR dan PSAT untuk aliran daya line to line simulasi 1

TABEL VIII
PERBANDINGAN NR DAN PSAT UNTUK RUGI DAYA SALURAN SIMULASI 1

No	Line	P NR	Q NR	P PSAT	Q PSAT
1	1.2	0.0046	0.0157	0.0045	0.0146
2	1.6	0.0022	0.0076	0.0022	0.0066
3	2.3	0.0020	0.0069	0.0020	0.0058
4	3.4	0.0382	0.1310	0.0381	0.1299
5	3.5	0.0055	0.0190	0.0056	0.0181
6	5.7	0.0142	0.0207	0.0142	0.0197
7	Total	0.0668	0.2009	0.0667	0.1948



Gambar 9. Grafik NR dan PSAT untuk rugi daya simulasi 1

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kondisi kelistrikan sistem termasuk baik sampai pada peningkatan beban menjadi 120%. Namun Ketika beban meningkat menjadi 150%, terjadi jatuh tegangan yang cukup besar pada bus 5 (wilayah Kotamobagu dan Gorontalo), serta terjadi rugi daya yang cukup besar jika dibandingkan dengan beban 100% maupun beban 120%. PLTP Lahendong 1-4 (slack bus) pun melewati batas kapasitas daya aktif 1.5 pu, sehingga sistem mengalami defisit daya pada saat beban menjadi 150%. Sistem Sulut-Go saat ini belum siap dengan kondisi beban sebesar itu. Sehingga perlu ditingkatkan lagi untuk kualitas pembangkitan dan sistem transmisi, agar kedepannya jika terjadi penambahan beban sampai menjadi 150%, maka sistem sudah siap untuk memenuhi kebutuhan listrik yang ada.

Pada kondisi beban 100%, pembangkitan dapat diturunkan menjadi sebesar 85%. Hal ini akan lebih baik dari sisi ekonomis dimana rugi daya menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan simulasi 1 (beban 100% dan pembangkitan 100%), serta pembangkitan PLTU yang berkurang 85%, tentunya akan menghemat biaya yang sangat banyak bagi pembangkitan dalam sistem. Simulasi 4 dapat menjadi salah satu contoh operasi ekonomis sistem tenaga listrik.

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, pada simulasi 5, saat bus 7 (sebagai representasi bus generator wilayah Kotamobagu dan Gorontalo) dilepas atau mengalami penurunan, maka rugi daya pun menjadi sangat besar dan tegangan pada bus 5 menjadi sebesar 0.8281 p.u.

B. Saran

Jumlah pasokan daya perlu diperhatikan, terlebih khusus pada bus 7 yang merupakan representasi pembangkitan wilayah Gorontalo. Sebab pembangkitan di Gorontalo tidak dapat diabaikan karena akan terjadi rugi daya yang besar. Jumlah daya juga perlu ditingkatkan karena melihat pertumbuhan beban yang akan terus meningkat, untuk mencegah terjadinya defisit daya pada sistem.

V. KUTIPAN

- [1] N. K. Lal, "A Review on Load Flow Analysis," *Int. J. Innov. Res. Development*, vol. 3, no. 11, pp. 337–341, 2014.
- [2] O. A. Afolabi, W. H. Ali, P. Cofie, J. Fuller, P. Obiomon, and E. S. Kolawole, "Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies," *J. Energy Eng.*, vol. 7, pp. 509–523, 2015.
- [3] N. Amin, "Perbandingan Metode Gauss-Siedel dan Metode Newton-Raphson Dalam Solusi Aliran Daya," *J. SMARTek*, vol. 9, no. 3, pp. 213–217, 2011.
- [4] M. Fikri and D. Anggainsi, "Metode Newton Raphson Untuk Analisis Aliran Daya Jaringan," *J. Ilm. SUTET*, vol. 8, no. 2, pp. 114–121, 2018.
- [5] S. Sunardiyo, "Studi Analisis Aliran Beban (Load Flow) Sistem Tenaga Listrik Implementasi Pada Jaringan Kelistrikan Di Unnes," *Teknik-UNISFAT*, vol. 4, no. 2, pp. 117–128, 2009.
- [6] M. Djalal, Y. Chandra, M. Yunus, and H. Nauwir, "Penyelesaian Aliran Daya 37 Bus Dengan Metode Newton Raphson (Studi Kasus

Sistem Interkoneksi 150 kV Sulawesi Selatan)," *J. Tek. Mesin SINERGI*, vol. 12, no. 1, pp. 35–49, 2014.

- [7] A. Supriyadi, "Analisa Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Software ETAP 12.6," *J. Forum Teknol.*, vol. 06, no. 3, pp. 56–59, 2014.
- [8] C. Kumolo, "Analisis Aliran Beban Pada Sistem Tenaga Listrik di KSO Pertamina EP-GEO CEPU Indonesia Distrik 1 Kawangan Menggunakan Software ETAP 12.6," *J. Emit.*, vol. 16, no. 01, pp. 1–11, 2016.
- [9] E. H. Harun, "Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik 150 kV Gorontalo Menggunakan Metode Newton Raphson," *Pengemb. Iptek Dana PNBPN 2012*, vol. 4, no. 1, pp. 4–14, 2012.
- [10] A. Maruf, "Determination of Bus Voltage, Power Losses and Load Flow in the Northern Nigeria 330kV Transmission Sub-Grid," *Int. J. Adv. Res. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–9, 2013.

TENTANG PENULIS



Penulis bernama lengkap Indra Pondaag, anak pertama dari dua bersaudara. Anak dari Danny Pondaag (Ayah) dan Sumiana (Ibu). Lahir di Manado pada tanggal 23 Juli 1997. Pada saat ini beralamat di Manado, kecamatan Mapanget, kelurahan Paniki Dua. Penulis memiliki seorang saudara kandung yang bernama Kartika Pondaag (Adik). Penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah di SMA Negeri 8 Manado pada tahun 2013-2016. Pada tahun 2016, Penulis melanjutkan studi S1 di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sam Ratulangi Manado. Sejak semester 1, Penulis aktif dalam mengikuti Organisasi dan Unit Kegiatan Mahasiswa seperti Unit Pelayanan Kerohanian Kristen Fakultas Teknik (UPK. Kr. FT. UNSRAT), Blue Choir dan Himpunan Mahasiswa Elektro.