

ANALISA PENGARUH INTEGRASI PEMBANGKIT TERSEBAR DALAM SISTEM KOMPOSIT

Syafii, Syukri Yunus, dan Asrizal

Gedung Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Kampus Limau Manis, Universitas Andalas, Padang, 25163
email: syafii@ft.unand.ac.id

Abstrak—Pemakaian tenaga listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi. Untuk itu dibutuhkan sistem tenaga listrik yang andal, berkualitas, dan mampu memenuhi semua kebutuhan tenaga listrik. Untuk mengoptimalkan keandalan kerja sistem tenaga listrik salah satunya adalah dengan pengintegrasian pembangkit tersebar pada sistem tenaga komposit. Dengan terkoneksi pembangkit tersebar ke jaringan distribusi listrik dapat mengurangi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan. Dalam pemasangan pembangkit tersebar ini banyak hal yang harus dipertimbangkan, seperti posisi pemasangan yang tepat, jumlah pembangkit tersebar, besar kapasitas pembangkit tersebar dan jenis teknologi pembangkit tersebar yang digunakan. Berdasarkan hasil penelitian posisi penempatan pembangkit tersebar yang optimal adalah berada dekat dengan beban. Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan pembangkit tersebar turun dan profil tegangan semakin baik atau meningkat. Besar kecilnya penurunan rugi-rugi daya dan nilai jatuh tegangan bervariasi tergantung jenis teknologi pembangkit tersebar yang digunakan.

Kata Kunci: Pembangkit tersebar, Rugi-rugi daya dan Profil tegangan

Abstract—Electricity demand in Indonesia continues to increase in accordance with the development of science and technology. Therefore, there is a need of reliable power system, qualified, and able to meet all electricity needs. To optimize the reliability of the power system work one is to perform the installation of distributed generation on power composite system. With the installation of distributed generation power loss and voltage drop that occurs can be reduced. In the installation of distributed generation is a lot of things to consider, such as the exact mounting position, the amount of distributed generation, distributed generation large capacity and type of distributed generation technology used. Based on the research results position the optimal placement of distributed generation is located close to the load. The total power loss and transmission systems combined distribution system after the addition of distributed generation has been decreased and voltage profile increased. The losses and voltage drop values vary based on the variation of distributed generation technologies.

Keywords: Distributed generation, Power losses and Voltage profiles

I. PENDAHULUAN

Untuk mengoptimalkan kehandalan kerja sistem tenaga listrik salah satunya adalah dengan melakukan pemasangan pembangkit tersebar pada sistem tenaga komposit. Sistem komposit yang dimaksud adalah sistem tenaga yang melibatkan saluran transmisi dan distribusi sekaligus dalam analisisnya. Pembangkit tersebar merupakan pembangkit yang dipasang pada jaringan distribusi dengan tujuan untuk mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya yang muncul akibat dari impedansi saluran.

Pembangkit tersebar umumnya diletakkan dekat dengan beban (konsumen).

Analisa aliran daya adalah ibarat jantung dalam suatu perencanaan sistem tenaga dan dalam menentukan operasi terbaik dari sistem tenaga yang eksisting. Dengan meningkatnya jumlah pembangkit-pembangkit kecil yang tersebar (isolated system) terhubung ke jaringan distribusi, telah merubah sistem distribusi dari sistem pasif kepada jaringan aktif [1] yang dikenal dengan sebutan sistem distribusi aktif (SDA). Dengan demikian analisa sistem tenaga listrik yang menggabungkan sistem transmisi

dan distribusi penting untuk memperoleh hasil yang akurat. Keadaan ini membuat ukuran sistem yang akan dianalisa semakin besar. Oleh karena itu diperlukan tool analisis yang dapat melakukan perhitungan sistem skala besar dengan cepat dan akurat. Salah satunya adalah penyelesaian aliran daya menggunakan metode Fast Decoupled.

Untuk mendukung manfaat pembangkit tersebar dalam sistem tenaga listrik maka diperlukan perencanaan yang baik termasuk menentukan lokasi penempatan dan besar daya pembangkit tersebar yang digunakan. Dalam paper ini akan dijelaskan pengaruh besar, jumlah, dan teknologi pembangkit tersebar yang digunakan terhadap performansi tegangan dan rugi-rugi daya. Sistem tenaga komposit yang digunakan adalah sistem transmisi 14 bus dan sistem distribusi 37 bus IEEE. Perhitungan aliran daya menggunakan metode Fast Decoupled yang dibangun dengan software Microsoft Visual Studio 2010 berbasis pemrograman C++.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pembangkit Tersebar

Dalam pendefinisian kapasitas pembangkit tersebar terdapat definisi yang berbeda-beda dan saat ini definisi yang digunakan sebagai berikut [2] :

1. The Electric Power Research Institute mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas beberapa kilowatt sampai dengan 50 MW.
2. Menurut Gas Research Institute mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 25 kW dan 25 MW.
3. Preston dan Rastler menentukan ukuran mulai dari beberapa kilowatt hingga lebih dari 100 MW.
4. Cardell mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 500 kW dan 1 MW.
5. International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE) mendefinisikan pembangkit tersebar sebagai pembangkit dengan kapasitas lebih kecil dari 50 -100 MW.

Tipe pembangkit tersebar umumnya dibedakan berdasarkan kapasitasnya yang ditunjukkan oleh tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1. Tipe pembangkit tersebar berdasarkan range daya [3]

Tipe pembangkit tersebar	Range daya (MW)
<i>Micro distributed generation</i>	1 watt < 5 kW
<i>Small distributed generation</i>	5 kW < 5MW
<i>Medium distributed generation</i>	5 MW < 500 MW
<i>Large distributed generation</i>	500 MW < 300 MW

Mengenai teknologi dan daya yang dihasilkan oleh pembangkit tersebar akan ditunjukkan oleh tabel 2.2 sebagai berikut :

Tabel 2.2 Teknologi Pembangkit Tersebar [5]

No.	Teknologi Pembangkit Tersebar	Daya
1	Combined Cycle Gas Turbine	35 - 400 MW
2	Internal Combustion Engines	5 kW – 10 MW
3	Combustion Turbine	1 – 250 MW
4	Micro Turbines	35 kW – 1 MW
5	Small Hydro	1 – 100 MW
6	Micro Hydro	25 kW – 1 MW
7	Wind Turbine	200 W - 3 MW
8	Photovoltaic Arrays	200 W – 100 kW
9	Solar Thermal, Lutz System	10 – 80 MW
10	Biomass Gasification	100 kW -20 MW
11	Solar Thermal, Central Receiver	1 – 10 MW
12	Fuel Cells, PhosAcid	200 kW – 2 MW
13	Fuel Cells, Molten Carbonate	250 kW – 2 MW
14	Fuel Cells, Proton Exchange	1 – 250 kW
15	Fuel Cells, Solid Oxide	250 kW – 5 MW
16	Geothermal	5 – 100 MW
17	Ocean Energy	0,1 – 1 MW
18	Stirling Engine	2 – 10 kW
19	Battery Storage	0.5 – 5 MW

B. Aliran Daya Listrik

Studi aliran daya dilakukan pada sistem yang berada pada keadaan steady state dengan fasa yang seimbang. Keterangan utama yang diperoleh dari studi aliran beban adalah besar dan sudut fase tegangan pada setiap bus beserta daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran.

Studi aliran daya berguna untuk [6] :

1. Perencanaan dan pengembangan jaringan listrik studi aliran daya memberikan informasi tentang akibat terjadinya pembebanan beban baru, penambahan pembangkitan baru, penambahan saluran transmisi, interkoneksi dengan sistem lain, dan sebagainya.
2. Penentuan pembebanan terhadap peralatan sistem listrik seperti saluran transmisi dan transformator pada kondisi sekarang atau di masa depan.
3. Penentuan kondisi operasi terbaik sistem tenaga listrik
4. Memberikan data masukan bagi perhitungan gangguan dan studi stabilitas.

C. Metode Fast Decoupled

Metode fast decoupled adalah kulminasi dari usaha – usaha untuk menyederhanakan implementasi sekaligus memperbaiki efisiensi perhitungan metode Newton – Raphson yang walaupun terkenal memiliki konvergensi yang kuadratis namun terlalu banyak memakan tempat dan waktu [7].

Umumnya :

- Tahanan sistem <<< reaktansi sistem → $|G| \ll |B| \rightarrow Y = G + jB$
- Sudut tegangan (δ) cukup kecil sehingga $\cos \delta \approx 1$ dan $\sin \delta \approx 0$

Sehingga dari persamaan Newton – Raphson

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta \delta}{|\mathcal{V}|} \\ \frac{\Delta |\mathcal{V}|}{|\mathcal{V}|} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Maka submatriks J_2 dan J_3 dapat diabaikan sehingga persamaannya menjadi

$$\Delta P = [J_1] \Delta \delta \quad (2.2)$$

$$\Delta Q = [J_4] \frac{\Delta |\mathcal{V}|}{|\mathcal{V}|} \quad (2.3)$$

Disini terlihat persamaan dapat diselesaikan secara terurai (*decoupled*) dalam bentuk hubungan P dengan δ dan Q dengan $|\mathcal{V}|$.

Dengan penguraian ini memberikan keuntungan:

- kebutuhan memori jadi separuhnya
- teknik pemograman jadi jauh lebih sederhana
- kecepatan hitung bisa jadi 2 kali lipat

Penyederhanaan lebih lanjut adalah penggunaan Jacobian yang sama untuk semua iterasi. Bentuk umum persamaan *fast decoupled* adalah

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ |\mathcal{V}| \end{bmatrix} = [B'] \Delta \delta \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ |\mathcal{V}| \end{bmatrix} = [B''] \Delta |\mathcal{V}| \quad (2.5)$$

Dimana unsur – unsur matrik B diperoleh dari pendekatan – pendekatan dan penyederhanaan yang ternyata sangat memperbaiki keandalan dan konvergensi metode *fast decoupled* :

- a) menghilangkan dari $[B']$ unsur – unsur reaktansi shunt seperti yang berasal dari kapasitansi transmisi dan reaktansi *tap setting* trafo di luar nominal.
- b) Menghilangkan dari $[B'']$ pengaruh pemutaran sudut yang dihasilkan oleh pemutar fasa.
- c) Mendapatkan unsur – unsur $[B']$ langsung dari susceptansi dari reaktansi jaringan.

Sehingga unsur – unsur $[B'] =$

Elemen off diagonal:

$$B'_{pq} = \frac{1}{X_{pq}} \quad (2.6)$$

Elemen diagonal:

$$B'_{pp} = - \sum_{q \in \Gamma(p)} B'_{pq} \quad (2.7)$$

Unsur – unsur $[B'']$ merupakan komponen imajiner matrik $[-Y_{bus}]$

Elemen off diagonal:

$$B''_{pq} = \frac{X_{pq}}{r_{pq}^2 + x_{pq}^2} \quad (2.8)$$

Elemen diagonal:

$$B''_{pq} = \sum_p Y_{sh} - \sum_{q \in \Gamma(p)} B''_{pq} \quad (2.9)$$

Y_{sh} = semua admitansi shunt di bus p (termasuk *line charging*, *tap trafo* di luar nominal, kapasitansi yang terpasang di shunt, dan lain – lain).

Ukuran matrik

$B' \rightarrow (N - 1) \times (N - 1) \rightarrow$ semua bus kecuali *slack*

B'' → (N - 1 - PV) x (N - 1 - PV) → hanya PQ bus saja

D. Rugi-Rugi Sistem Tenaga Listrik

Rugi-rugi yang terdapat pada sistem kelistrikan secara umum meliputi rugi tegangan dan rugi daya. Rugi daya adalah selisih antara daya yang dialirkan atau dikirimkan dari suatu bus generator menuju bus beban. Besarnya rugi-rugi daya dapat diperoleh melalui proses matematis berikut:

$$P_{\text{losses}} = P_{\text{ kirim }} - P_{\text{ terima }} \tag{2.10}$$

$$P = I^2 R \tag{2.11}$$

Rugi-rugi tegangan adalah selisih antara tegangan kirim pada sebuah bus generator dengan tegangan yang diterima bus beban. Rugi tegangan biasanya disebut jatuh tegangan. Rumus secara matematisnya adalah sebagai berikut :

$$\Delta V = V_s - V_r \tag{2.12}$$

$$\Delta V = I \times Z$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Program aliran daya dibuat menggunakan Microsoft Visual studio 2010 dengan bahasa pemrograman C++. Pada tahap awal, dilakukan penomoran pada setiap bus dari sistem transmisi 14 bus dan sistem distribusi 37 bus sehingga menjadi 51 bus. Bus yang memiliki kapasitas paling besar dijadikan slack bus dan diberi kode 1, bus yang terhubung ke generator diberi kode 2 dan bus beban diberi kode 0. Data yang diperlukan untuk analisa aliran daya ini meliputi data resistansi, reaktansi, data pembangkitan, data beban, asumsi magnitude tegangan dan sudut tegangan bus.

Perhitungan dimulai dengan membentuk impedansi jaringan (Zij) dengan rumus

$$Z_{ij} = R_{ij} + X_{ij} \tag{3.1}$$

Dimana :

Zij = Impedansi jaringan antara bus ke i dan bus ke j

Rij = Resistansi jaringan antara bus ke i dan bus ke j

Xij = Reaktansi jaringan antara bus ke i dan bus ke j

Kemudian dibentuk admitansi jaringan

$$Y_{ij} = Y_{rij} + Y_{xij} \tag{3.2}$$

Dimana :

$$Y_{rij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad Y_{xij} = -\frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Selanjutnya dibentuk dengan susunan sebagai berikut :

1. Matriks admitansi bus [Y], matriks tersebut dipisah menjadi komponen matriks [G] dan matriks [B].
2. Matriks [BP] dan matriks [BQ],
Matriks [BP] dibentuk dengan menghilangkan kolom dan baris yang menunjukkan slack bus dari matriks [B]. Sedangkan matriks [BQ] dibentuk dengan menghilangkan kolom dan baris yang menunjukkan bus pembangkit dari matriks [BP].
3. Matriks [BP]⁻¹ dan Matriks [BQ]⁻¹.

Selanjutnya dihitung daya terjadwal pada setiap bus dengan rumus :

$$P_{jad} = P_{generator} - P_{beban} \tag{3.3}$$

$$Q_{jad} = Q_{generator} - Q_{beban} \tag{3.4}$$

Proses iterasi dicari daya terhitung dengan rumus

$$P_i^{hit} = \sum_{n=1}^3 [Y_{in} V_i Y_n] \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{3.5}$$

$$Q_i^{hit} = -\sum_{n=1}^3 [Y_{in} V_i Y_n] \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{3.6}$$

Mismatch power dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$\Delta P_n = P_n^{jad} - P_n^{hit} \tag{3.7}$$

$$\Delta Q_2 = Q_n^{jad} - Q_n^{hit} \tag{3.8}$$

Selanjutnya dihitung perubahan sudut fasa (Δθ) dan magnitude tegangan (ΔV) dengan rumus :

$$\Delta \theta_i = \sum_{i=2}^n B P I N_{2i} \cdot \Delta P_i / |V_i| \tag{3.9}$$

$$|\Delta V_i| = \sum_{i=2}^n B Q I N_{2i} \cdot \Delta Q_i / |V_i| \tag{3.10}$$

Dimana :

Δθi = perubahan sudut fasa bus ke i

|ΔVi| = perubahan magnitude tegangan bus ke i

BPIN = elemen matriks [BP]⁻¹

BQIN = elemen matriks [BQ]⁻¹

Sudut fasa dan magnitude tegangan tiap bus yang baru dicari dengan rumus :

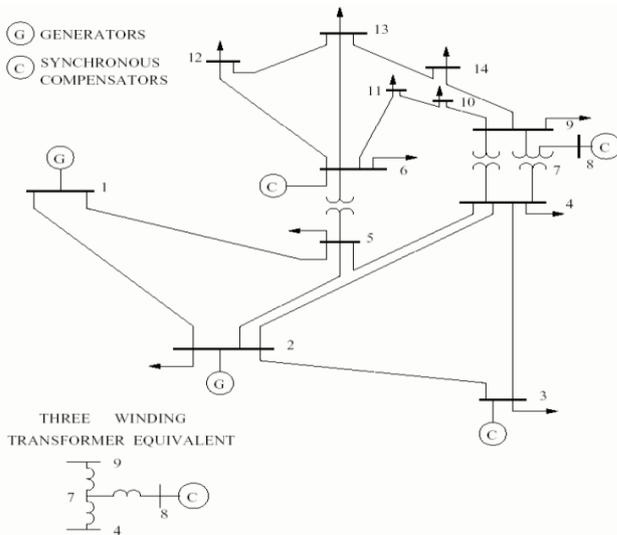
$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (3.11)$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (3.12)$$

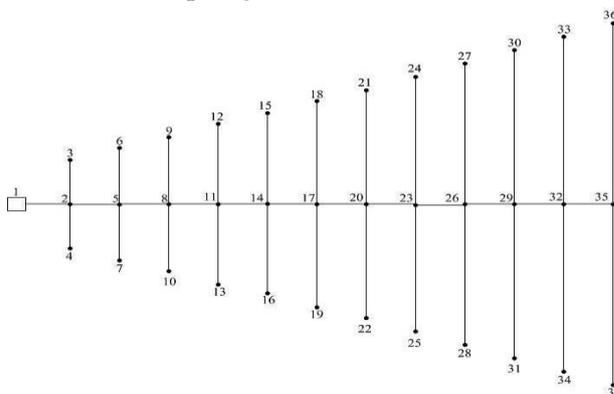
IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Model Sistem Transmisi dan Sistem Distribusi

Sistem yang digunakan adalah sistem transmisi 14 bus IEEE [8] dan sistem distribusi 37 bus dari jurnal IEEE [9]. Sistem transmisi dan sistem distribusi ini adalah sistem tenaga listrik yang berada dalam keadaan *steady state*. Untuk menggabungkan sistem transmisi 14 bus dengan sistem distribusi 37 bus dilakukan dengan menambahkan sebuah transformator. Topologinya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.1 Topologi 14 bus sistem transmisi



Gambar 4.2 Topologi 37 bus sistem distribusi

B. Pemodelan Pembangkit Tersebar

Pada penelitian ini tidak dilakukan pemodelan pembangkit tersebar secara detail karena pada penelitian ini hanya menentukan pengaruh dari penambahan pembangkit tersebar terhadap sistem tenaga listrik. Data pembangkit tersebar yang digunakan adalah data pembangkitan rata-rata yang mampu dihasilkan oleh pembangkit tersebar itu sendiri.

Dalam pengujian ada 5 jenis variasi penambahan pembangkit tersebar, yaitu:

1. Variasi letak pembangkit tersebar
Pengujian dilakukan dengan memvariasi letak pembangkit tersebar. Pembangkit tersebar ini diletakkan hanya pada bagian sistem distribusi 37 bus. Hal ini dilakukan karena sistem distribusi 37 bus lebih dekat ke beban dan lebih rentan terjadi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan.
2. Variasi jumlah pembangkit tersebar
Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jumlah pembangkit tersebar. Pada penelitian ini jumlah pembangkit tersebar yang digunakan maksimal 8 unit.
3. Variasi teknologi pembangkit tersebar
Pengujian dilakukan dengan memvariasikan teknologi pembangkit tersebar yang digunakan. Teknologi pembangkit tersebar yang digunakan adalah *wind turbine* dan *photovoltaic*.
4. Variasi besar kapasitas pembangkit tersebar
Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan besar kapasitas daya dari pembangkit tersebar. Pada pengujian ini diasumsikan $PT_1 > PT_2 > PT_3$.
5. Variasi letak, jumlah, teknologi yang digunakan, dan besar kapasitas pembangkit tersebar

Pada pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan seluruh parameter untuk menentukan penempatan dan ukuran dari pembangkit tersebar yang digunakan agar berada pada keadaan yang optimal, sehingga rugi-rugi daya dan jatuh tegangan yang terjadi sangat kecil.

Program aliran daya menggunakan metode *fast decoupled* dengan konvergensi iterasi 0,00001 dan bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa C++.

C. Hasil Program Aliran daya

1) Hasil Program Sebelum Penambahan Pembangkit Tersebar

Pada pengujian ini total rugi-rugi daya yang terjadi pada gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi sebesar 13,85831 MW. Pada pengujian sebelum penambahan pembangkit tersebar ini rugi-rugi daya yang terjadi masih cukup besar karena dipengaruhi oleh panjang saluran dari sistem transmisi. Sedangkan untuk profil tegangan terjadi jatuh tegangan terbesar pada bus ke-50 dan 51 pada sistem distribusi. Hal ini terjadi karena bus ke-50 dan 51 berada diujung saluran dengan panjang yang sama.

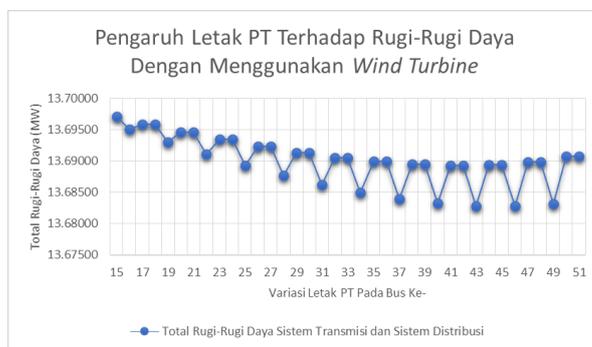
Data mengenai total rugi-rugi daya, dan profil tegangan pada gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi sebelum penambahan pembangkit tersebar adalah Total P_{losses} = 13,85831 MW dan drop tegangan adalah 1.02726 pu.

2) Hasil Program Sesudah Penambahan Pembangkit Tersebar

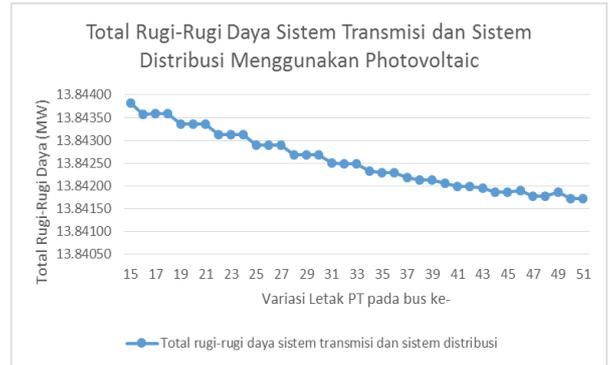
a. Hasil Program Berdasarkan Variasi Letak Pembangkit Tersebar

Berdasarkan data dari pengaruh letak pembangkit tersebar dengan menggunakan *wind turbine* dan *photovoltaic* dapat ditentukan bahwa dengan dilakukannya penambahan pembangkit tersebar pada setiap bus sistem distribusi dari gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi ini dapat mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan.

Pengaruh variasi letak pembangkit tersebar terhadap rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi digambarkan oleh grafik berikut :



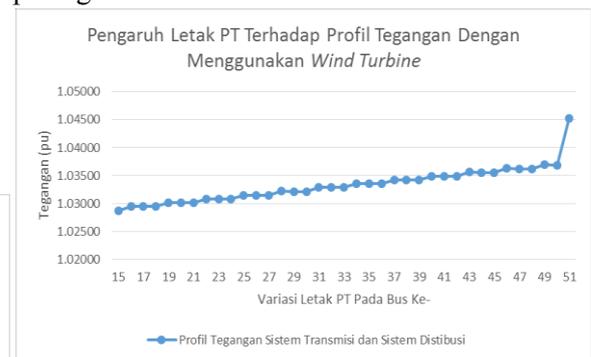
Gambar 4.3 Pengaruh *Wind Turbine* Terhadap Rugi-Rugi Daya



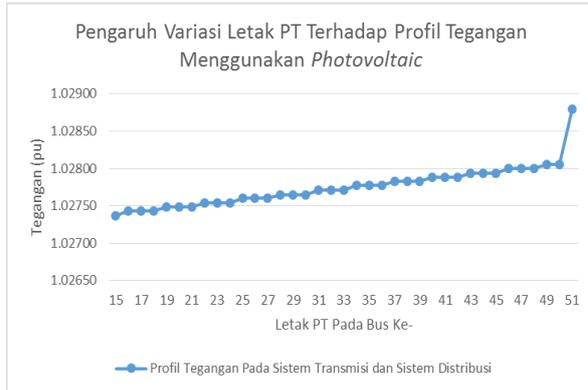
Gambar 4.4 Pengaruh Letak *Photovoltaic* Terhadap Rugi-Rugi Daya

Berdasarkan grafik di atas dapat diketahui bahwa letak pembangkit tersebar yang optimal pada saat pengaruh variasi letak pembangkit tersebar dengan menggunakan *wind turbine* adalah pada bus ke- 46. Pada bus ke- 46 ini total rugi-rugi daya yang dihasilkan sebesar 13,68280 MW. Sedangkan berdasarkan variasi letak pembangkit tersebar yang menggunakan *photovoltaic* dapat ditentukan bahwa posisi terbaik adalah pada ujung saluran. Semakin ke ujung saluran maka rugi-rugi dayanya semakin kecil. Pada penelitian ini rugi-rugi daya terkecil berada pada bus ke- 51 dengan total rugi-rugi daya sebesar 13,84172 MW.

Untuk pengaruh variasi letak pembangkit tersebar terhadap profil tegangan dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 4.5 Pengaruh Letak *Wind Turbine* Terhadap Profil Tegangan



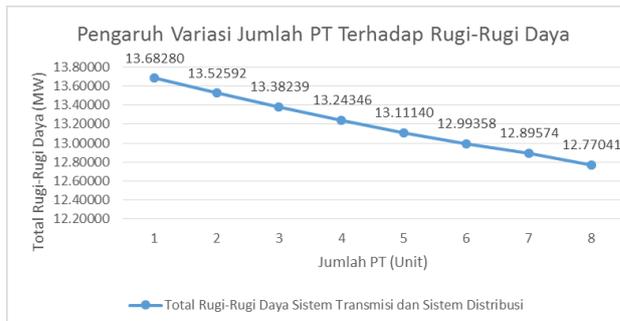
Gambar 4.6 Pengaruh Letak Photovoltaic Terhadap Profil Tegangan

Berdasarkan grafik diatas dapat ditentukan pengaruh letak pembangkit tersebar pada saat menggunakan *wind turbine* dan *photovoltaic* pada profil tegangan. Pada saat menggunakan *wind turbine* profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi adalah sebesar 1,03626 pu. Sedangkan pada saat menggunakan *photovoltaic* profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi adalah sebesar 1,02879 pu. Berdasarkan grafik di atas dapat ditentukan bahwa semakin ke ujung saluran maka profil tegangan meningkat.

Pada pengaruh variasi letak pembangkit tersebar ini posisi yang optimal adalah pada daerah yang dekat dengan beban. Pada posisi yang dekat dengan beban rugi-rugi daya yang terjadi semakin kecil dan jatuh tegangan pun juga semakin kecil.

b. Hasil Program Berdasarkan Variasi Jumlah Pembangkit Tersebar

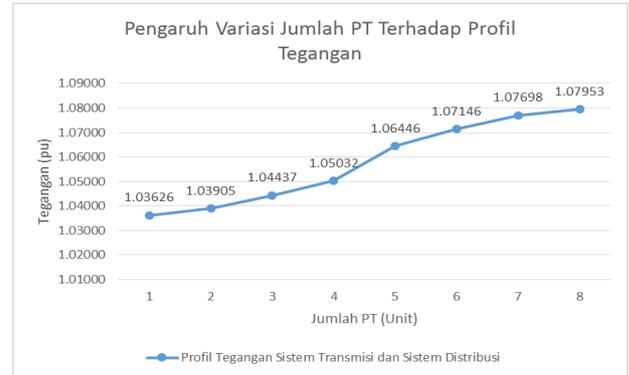
Pengaruh dari variasi jumlah pembangkit tersebar terhadap rugi-rugi daya dan profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi dapat diketahui berdasarkan grafik berikut:



Gambar 4.7 Pengaruh Jumlah PT Terhadap Rugi-Rugi Daya

Berdasarkan grafik di atas maka dapat ditentukan bahwa semakin banyak jumlah

pembangkit tersebar yang ditempatkan pada suatu sistem tenaga listrik maka rugi-rugi daya yang terjadi akan semakin kecil. Total rugi-rugi daya pada gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi yang terkecil terjadi pada saat pembangkit tersebar yang digunakan berjumlah 8 unit dengan total rugi-rugi daya sebesar 12,77041 MW. Sedangkan pada saat menggunakan 1 unit pembangkit tersebar total rugi-rugi daya pada gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi adalah 13,68280 MW.



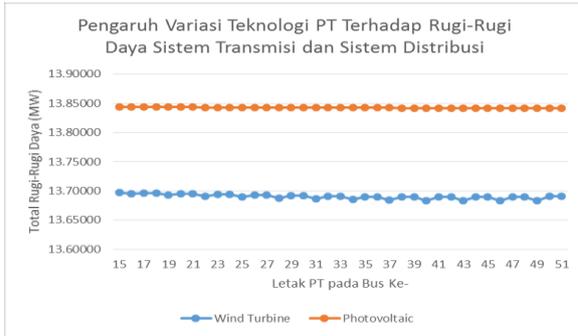
Gambar 4.8 Pengaruh Jumlah PT Terhadap Profil Tegangan

Pada grafik di atas dapat ditentukan pengaruh variasi jumlah pembangkit tersebar yang digunakan terhadap profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi. Tegangan yang terbaik terjadi pada saat jumlah pembangkit tersebar yang digunakan sebanyak 8 unit dengan tegangan sebesar 1,07953 pu. Sedangkan untuk pemasangan 1 unit tegangan yang dihasilkan sebesar 1,03626 pu.

Semakin banyaknya pembangkit tersebar yang ditambahkan maka daya yang disuplai oleh pembangkit tersebar pada sistem tenaga listrik akan semakin besar. Semakin besarnya daya yang disuplai ini menyebabkan terjadinya peningkatan pada daya terima. Dengan terjadinya peningkatan daya terima inilah total rugi-rugi daya pada sistem transmisi dan sistem distribusi yang terjadi semakin kecil. Selain itu dengan semakin besarnya daya terima maka akan menyebabkan terjadinya peningkatan tegangan pada ujung saluran.

c. Hasil Program Berdasarkan Variasi Jenis Teknologi Pembangkit Tersebar

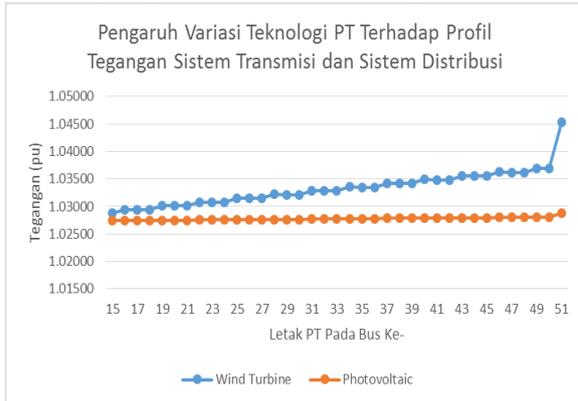
Untuk mengetahui dampak variasi jenis teknologi pembangkit tersebar terhadap gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi dapat diketahui dari grafik berikut :



Gambar 4.9 Pengaruh Variasi Teknologi PT Terhadap Rugi-Rugi Daya

Pada grafik di atas dapat ditentukan pengaruh variasi teknologi pembangkit tersebar terhadap total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi. Berdasarkan grafik di atas total rugi-rugi daya pada saat menggunakan *wind turbine* lebih kecil dibandingkan pada saat menggunakan *photovoltaic*. Pada saat menggunakan *wind turbine* total rata-rata rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi yang terjadi sebesar 13,69008 MW. Sedangkan pada saat menggunakan *photovoltaic* total rata-rata rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi yang terjadi sebesar 13,842545 MW.

Untuk pengaruh variasi teknologi pembangkit tersebar yang digunakan terhadap profil tegangan dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 4.10 Pengaruh Variasi Teknologi PT Terhadap Profil Tegangan

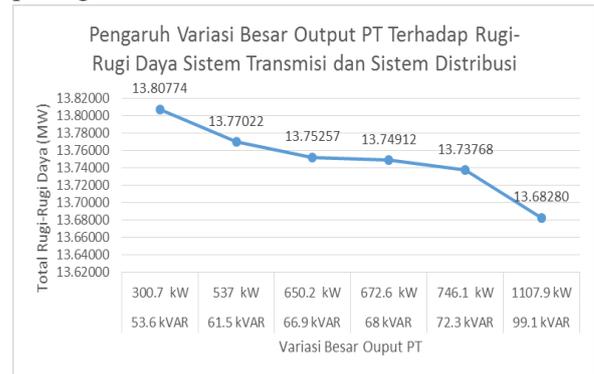
Pada grafik di atas dapat ditentukan pengaruh variasi teknologi pembangkit tersebar terhadap profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi. Berdasarkan grafik di atas semakin ke ujung saluran maka tegangan semakin meningkat. Peningkatan tegangan yang terbaik terjadi pada saat menggunakan *wind turbine*. Pada saat menggunakan *wind turbine* tegangan rata-rata yang terjadi sebesar 1,03328 pu. Sedangkan untuk penggunaan *photovoltaic*

tegangan rata-rata yang terjadi sebesar 1,02775 pu.

Berdasarkan data yang didapat dari hasil pengujian variasi teknologi pembangkit tersebar yang digunakan maka pembangkit tersebar yang lebih efektif digunakan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan adalah *wind turbine*.

d. Hasil Program Berdasarkan Variasi Berdasarkan Besar Kapasitas Pembangkit Tersebar

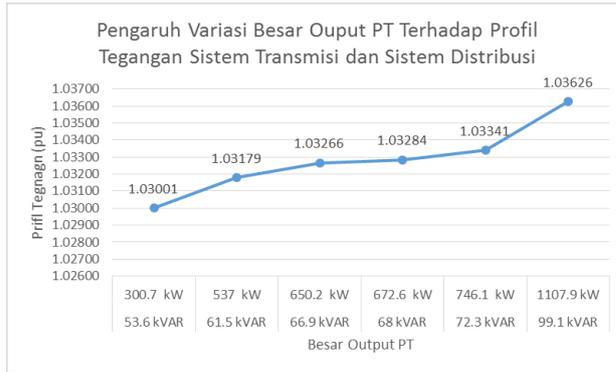
Untuk pengaruh besar kapasitas daya pembangkit tersebar terhadap gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi dapat diketahui pada gambar berikut :



Gambar 4.11 Pengaruh Variasi Kapasitas PT Terhadap Rugi-Rugi Daya Sistem Komposit

Pada grafik di atas dapat ditentukan pengaruh besar kapasitas pembangkit tersebar terhadap total rugi-rugi daya sistem transmisi dan sistem distribusi. Berdasarkan data dari pengujian variasi besar kapasitas pembangkit tersebar bahwa semakin besar kapasitas daya dari pembangkit tersebar yang digunakan maka akan semakin kecil rugi-rugi daya yang terjadi. Hal ini terjadi karena semakin besar daya yang disuplai pembangkit tersebar terhadap sistem tenaga listrik. Semakin besarnya daya yang disuplai oleh pembangkit tersebar ini maka akan menyebabkan daya terima akan meningkat.

Untuk pengaruh variasi besar kapasitas pembangkit tersebar terhadap profil tegangan dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 4.12 Pengaruh Kapasitas PT Terhadap Profil Tegangan

Pada grafik di atas ditentukan pengaruh variasi teknologi pembangkit tersebar terhadap profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi. Berdasarkan data dari pengujian variasi besar kapasitas pembangkit tersebar bahwa semakin besar kapasitas daya dari pembangkit tersebar yang digunakan maka profil tegangan akan semakin meningkat. Ini artinya jatuh tegangan yang terjadi akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena daya yang disuplai pembangkit tersebar terhadap sistem tenaga listrik semakin besar. Semakin besarnya daya yang disuplai oleh pembangkit tersebar ini maka akan menyebabkan daya terima akan meningkat dan tegangan pun akan meningkat.

e. Hasil Program Berdasarkan Variasi Letak, Jumlah, Jenis, dan Besar Kapasitas Pembangkit Tersebar

Untuk mengetahui dampak seluruh parameter dapat diketahui pada tabel berikut :

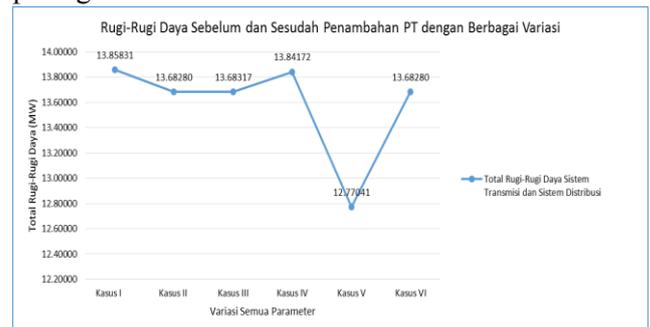
No.	No. bus Ke-	PT Size						Total Plosses (MW)	Tegangan (pu)
		PT1		PT2		PT3			
		kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR		
1	18, 33, 50	1170,9	99,1	746,1	27,3	672,6	68	13,48533	1,03881
	20, 30, 40	746,1	27,3	672,6	68	650,2	66,9	13,54804	1,03656
	40, 45, 50	672,6	68	650,2	66,9	537	61,5	13,57578	1,04164
2	18, 33, 50	746,1	27,3	672,6	68	650,2	66,9	13,54903	1,03773
	20, 30, 40	672,6	68	650,2	66,9	537	61,5	13,57690	1,03577
	40, 45, 50	650,2	66,9	540	63,5	539	61,6	13,59319	1,04077
3	18, 33, 50	537	61,5	539	61,6	512,3	60,5	13,61555	1,03580
	20, 30, 40	539	61,6	512,3	60,5	300,7	53,6	13,65073	1,03340
	40, 45, 50	512,3	60,5	300,7	53,6	276,6	53,1	13,68339	1,03618

Berdasarkan data dari hasil pengujian variasi seluruh parameter ini posisi penempatan pembangkit tersebar yang terbaik berada dekat dengan beban. Untuk pemasangan *wind turbine* posisi terbaik adalah merata pada sistem tenaga listrik. Hal ini dikarenakan *wind turbine* juga menghasilkan daya reaktif. Sedangkan untuk *photovoltaic* posisi yang terbaik adalah diujung saluran karena *photovoltaic* hanya menghasilkan daya aktif. Untuk jumlah unit yang digunakan

semakin banyak unit yang digunakan maka rugi-rugi daya dan jatuh tegangan yang terjadi akan semakin kecil. Pada pengujian ini keadaan yang optimal adalah pada saat penempatan pembangkit tersebar pada bus ke-18, 13, dan 50 dengan total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi yang terjadi sebesar 13,48533 MW dan profil tegangan sebesar 1,03881 pu.

D. Rugi-Rugi Daya Setelah Penambahan Pembangkit Tersebar

Untuk mengetahui total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi yang terjadi sebelum maupun sesudah pemasangan pembangkit tersebar dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 4.13 Perbandingan Total Rugi-Rugi Daya Sebelum dan Sesudah Penambahan PT

Keterangan grafik :

- Kasus I : Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi sebelum penambahan PT
- Kasus II : Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan variasi letak PT
- Kasus III : Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan menggunakan *wind turbine*
- Kasus IV : Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan menggunakan *photovoltaic*
- Kasus V : Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan variasi jumlah PT
- Kasus VI : Total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan variasi kapasitas PT

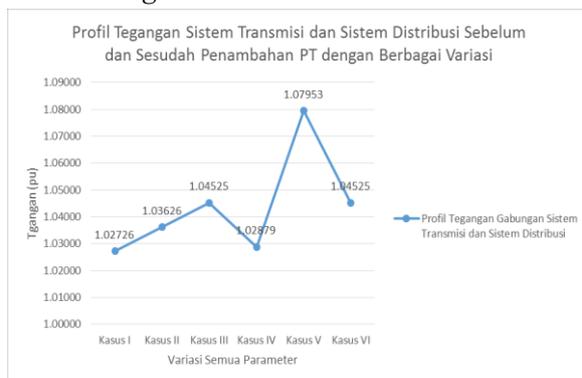
Berdasarkan pada grafik di atas dapat diketahui bahwa penurunan total rugi-rugi daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi terkecil terjadi pada saat variasi jumlah pembangkit tersebar yang digunakan. Pada variasi jumlah pembangkit tersebar ini menggunakan 8 unit pembangkit tersebar. Semakin banyak jumlah pembangkit tersebar yang digunakan maka akan menyebabkan semakin besarnya kapasitas daya yang akan disuplai oleh pembangkit tersebar terhadap sistem tenaga listrik.

Semakin besarnya suplai daya ini menyebabkan daya terima meningkat dan rugi-rugi daya sistem transmisi dan sistem distribusi menjadi berkurang. Penurunan total rugi-rugi daya ini berbanding lurus dengan jumlah pembangkit tersebar yang digunakan.

Berdasarkan variasi letak dari pembangkit tersebar lokasi penempatan yang terbaik dengan teknologi pembangkit tersebar berupa *wind turbine* maupun *photovoltaic* adalah pada daerah yang dekat dengan beban. Sedangkan berdasarkan teknologi yang digunakan maka teknologi pembangkit tersebar yang lebih efektif untuk mengurangi rugi-rugi daya adalah *wind turbine*. *Wind turbine* menjadi teknologi yang lebih efektif karena *wind turbine* menghasilkan daya yang lebih besar jika dibandingkan dengan *photovoltaic*.

Tingkat berkurangnya rugi-rugi daya semuanya bergantung pada letak, jenis teknologi yang digunakan, serta besar kapasitas daya yang dihasilkan oleh pembangkit tersebar tersebut. Semakin besar kapasitas daya pembangkit tersebar yang digunakan dan semakin dekat dengan beban maka rugi-rugi daya yang terjadi juga semakin kecil.

E. Profil Tegangan Setelah Penambahan Pembangkit Tersebar



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Profil Tegangan

Profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan pembangkit tersebar dapat diketahui dari gambar 4.14.

Keterangan grafik :

- Kasus I : Profil tegangan daya gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi sebelum penambahan PT
- Kasus II : Profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan variasi letak PT
- Kasus III : Profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan menggunakan *wind turbine*
- Kasus IV : Profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan menggunakan *photovoltaic*
- Kasus V : Profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan variasi jumlah PT
- Kasus VI : Profil tegangan gabungan sistem transmisi dan sistem distribusi setelah penambahan PT dengan variasi kapasitas PT

Berdasarkan grafik di atas dapat diketahui bahwa profil tegangan yang terbaik terjadi pada saat variasi jumlah pembangkit tersebar yang digunakan. Pada saat jumlah pembangkit tersebar yang digunakan meningkat maka daya yang akan disuplai pada sistem tenaga pun akan meningkat, dengan terjadinya peningkatan daya terima ini juga berdampak terjadinya peningkatan tegangan terima. Meningkatnya tegangan terima ini maka akan terjadi perbaikan profil tegangan pada ujung saluran sistem tenaga listrik. Peningkatan tegangan yang terjadi berbanding lurus dengan besar kapasitas daya dari pembangkit tersebar yang digunakan. Semakin besar daya aktif yang disuplai maka tegangan pun akan semakin meningkat.

Tingkat berkurangnya jatuh tegangan bergantung pada letak pembangkit tersebar yang optimal, besar kapasitas daya, jumlah, dan jenis teknologi pembangkit tersebar yang digunakan. Pada penelitian ini penempatan pembangkit tersebar yang optimal berada dekat dengan beban. Teknologi pembangkit tersebar yang lebih efektif untuk mengurangi jatuh tegangan antara *wind turbine* dan *photovoltaic* adalah *wind turbine* karena *wind turbine* menghasilkan daya yang lebih besar.

V. SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Total rugi-rugi daya gabungan sistem komposit sebelum penambahan pembangkit tersebar adalah sebesar 13,85831 MW dan profil tegangan 1,02726 pu.
2. Total rugi-rugi daya sistem komposit setelah penambahan pembangkit tersebar berdasarkan variasi letak adalah sebesar 13,6820 MW dan profil tegangannya sebesar 1,03626 pu .
3. Total rugi-rugi daya sistem komposit setelah penambahan pembangkit tersebar berdasarkan variasi jumlah pembangkit tersebar pada saat berjumlah 8 unit adalah sebesar 12,77041 MW dan profil tegangan sebesar 1,07953 pu.
4. Total rugi-rugi daya sistem komposit setelah penambahan pembangkit tersebar berdasarkan variasi besar kapasitas pembangkit tersebar adalah sebesar 13,73768 MW dan profil tegangannya sebesar 1,03341 pu.
5. Total rugi-rugi daya sistem komposit setelah penambahan pembangkit tersebar pada saat menggunakan *wind turbine* adalah sebesar 13,68317 MW dan profil tegangan 1,03693 pu.
6. Total rugi-rugi daya sistem komposit setelah penambahan pembangkit tersebar pada saat menggunakan *photovoltaic* adalah sebesar 13,84172 MW dengan profil tegangan sebesar 1,02805 pu.

DARTAR PUSTAKA

- [1] Meliopoulos, A. P. S., kokkinides, G., Huang, R., Farantatos, E., Choi, S., Lee, Y., Yu, X, 2001. Smart grid technologies for autonomous operation and control. IEEE Transaction on Smart Grid. March 2011, 2(1): 1-10.
- [2] Ackermann, Thomas dan Goran Andersson dan Lennart Soder.2000."Distributed Generation: a definition" *Electrical Power System Research* 57 (2001) 195-204.
- [3] Guseynov, A., M., dan Akhundov, B., S. 2006. *Defining Impact of Distributed Generation on Power System Stability*. Azerbaijan Scientific Research Institute of Energetic And Energy Design.
- [4] Hasannuddin, Teuku. Analisa Tanggapan Frekuensi Akibat Masuknya *Distributed Generation* Pada Sistem Interkoneksi Jamali. Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe.
- [5] Mahendra, Miko.2011."Tugas Akhir: Pengaruh Penambahan PLTU Teluk Sirih 100 MW pada Sistem Interkoneksi Sumatera". Padang: Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas
- [6] Syafii, dan Ricky Maulana, 2012. "Program Aliran Daya Untuk Analisis Sistem Distribusi Dengan Penambahan Photovoltaic Model". Jurnal Nasional Teknik Elektro Vol.1, No.1 September 2011.
- [7] D, William. dan Stevenson. Jr. 1990. Analisis Sistem Tenaga Listrik. Bandung: Erlangga.
- [8] http://www.ee.washington.edu/research/pstc_a/pf14/pg_tca14bus.htm diakses Rabu 14 Agustus 2013 pukul 20:30 WIB
- [9] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, and S. Carneiro Jr, "Voltage control devices models for distribution power flow analysis", IEEE Trans. on power systems, vol. 16, no. 4 pp. 586-594, November 2001

Biodata Penulis

Syafii, menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Sumatra Utara (USU) tahun 1997. Pendidikan S2 bidang Energi Elektrik diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2002. Pendidikan S3 di Electrical power system Eng, UTM tahun 2011. Saat ini penulis terdaftar sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas Padang. Minat penelitian komputasi sistem tenaga dan pembangkit energy terbarukan.

Syukri Yunus, menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung (ITB) tahun 19. Pendidikan S2 bidang Ilmu komputer diselesaikan di Univerisitas Indonesia (UI) tahun 19. Saat ini penulis terdaftar sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas Padang.

Astrizal, menamatkan S1 di jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (UNAND) tahun 2014.