

## Program Aliran Daya Untuk Analisis Sistem Distribusi Dengan Penambahan *Photovoltaic* Model

Syafii, dan Ricky Maulana  
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik  
Universitas Andalas

### ABSTRAK

Perkembangan teknologi yang semakin pesat memicu kebutuhan akan energi, terutama energi listrik. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa listrik telah menjadi bagian yang sangat penting bagi umat manusia. Di negara berkembang seperti Indonesia, idealnya pertumbuhan listrik 2-2,5 kali lipat dibandingkan pertumbuhan ekonomi. Kenyataannya, saat ini pertumbuhan listrik per tahun hanya 7-8 persen. Penambahan pembangkit dengan energi yang dapat terbarukan menjadi salah satu solusi untuk mengatasi kebutuhan akan listrik. Seperti dengan penambahan pembangkit listrik dengan tenaga matahari atau photovoltaic. Dalam artikel ini, perhitungan aliran daya menggunakan metoda fast decoupled dengan model photovoltaic yang terhubung ke jaringan distribusi. Program aliran daya dibangun menggunakan Microsoft visual studio 2010 dengan Bahasa Pemrograman C++. Penambahan variasi jumlah dan ukuran photovoltaic pada sistem distribusi akan mengurangi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan.

*Kata Kunci* :Kebutuhan listrik, Photovoltaic, Microsoft visual studio 2010, Rugi-rugi daya, Jatuh tegangan

### I. PENDAHULUAN

Penambahan pembangkit dengan energi yang dapat terbarukan menjadi salah satu solusi untuk mengatasi kebutuhan akan listrik. Energi ramah lingkungan adalah suatu istilah yang menjelaskan apa yang dianggap sebagai sumber energi dan tenaga yang ramah terhadap lingkungan. Khususnya, istilah ini merujuk ke sumber-sumber energi yang dapat diperbaharui dan tidak mencemari lingkungan<sup>[1]</sup>. Seperti dengan penambahan pembangkit listrik dengan tenaga matahari atau *photovoltaic*. *Photovoltaic (PV)* dapat secara langsung mengubah cahaya matahari menjadi listrik. Perangkat dasar dari sebuah sistem *PV* adalah *PV cell*. *Cells* dapat digabungkan menjadi bentuk panel dan *arrays*<sup>[2]</sup>.

Penambahan *photovoltaic array* ini akan mempengaruhi parameter-parameter listrik seperti tegangan, daya dan rugi-rugi saluran. Untuk itu, diperlukan studi aliran daya untuk mengetahui pengaruh penambahan *photovoltaic* model yang terhubung ke bus beban / PQ bus, dan berasal dari pengembangan radiasi matahari dan suhu lingkungan.

Tujuan utama dari penulisan artikel ini adalah Mengintegrasikan model *photovoltaic*

*array* dalam perhitungan aliran daya. Mengetahui rugi-rugi daya dan profil tegangan sistem tenaga listrik, setelah penambahan *photovoltaic array* dengan variasi radiasi matahari (G) dan suhu lingkungan (T) dalam satu hari.

### II. TINJAUAN PUSTAKA

Aliran daya menyatakan aliran daya aktif atau reaktif dari satu atau lebih sumber daya ke beban melalui jaringan 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<sup>[3]</sup> :

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.

Data yang diperlukan dalam perhitungan aliran daya adalah admitansi atau impedansi bus, rating dan impedansi transformator, rating kapasitor shunt, dan setelan sadapan transformator. Kondisi kerja harus selalu ditetapkan untuk setiap studi, kecuali pada salah satu bus, daya bersih (net) yang memasuki jaringan pada setiap bus harus ditentukan. Daya yang diserap oleh suatu beban adalah masukan daya negatif yang masuk melalui interkoneksi.

Tipe bus yang digunakan dalam studi aliran daya:

### 1. Bus Beban (*Load Bus*)

Setiap bus yang tidak memiliki generator disebut dengan *load bus*. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering juga disebut bus PQ. Daya aktif dan reaktif yang disuplai ke dalam sistem tenaga adalah mempunyai nilai positif, sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negatif.

### 2. Bus Generator (*Generator Bus*)

*Generator bus* dapat disebut dengan *voltage controlled bus* karena tegangan pada bus dibuat selalu konstan. Setiap bus generator dimana memiliki daya megawatt yang dapat diatur melalui *prime mover* (penggerak mula) dan besaran tegangan yang dapat diatur melalui arus eksitasi generator sehingga bus ini sering juga disebut dengan PV bus.

### 3. Slack bus (*Bus Berayun atau Swing bus*)

*Slack bus* sering juga disebut dengan *Swing bus* atau rel berayun. Adapun besaran yang diketahui dari bus ini adalah tegangan (V) dan sudut beban ( $\delta$ ). Suatu sistem tenaga biasanya didesain memiliki bus ini yang dijadikan referensi yaitu besaran  $u = 0^0$ . Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif dan reaktif.

Salah satu yang harus diingat dalam analisa aliran daya adalah tanda daya nyata (P)

dan daya reaktif (Q). Daya reaktif *lagging* adalah daya reaktif positif menunjukkan arusnya bersifat induktif dan daya reaktif *leading* adalah daya negative menunjukkan arusnya bersifat kapasitif dan arus bus positif adalah arus yang arahnya menuju bus. Dikarenakan aliran arus generator menuju bus dan aliran arus beban meninggalkan bus, sehingga tanda daya adalah positif untuk bus generator dan negatif untuk bus beban.

Oleh karena itu, dapat mengikuti ketentuan yang telah dibuat, yaitu:

1. P dan Q dengan bus beban bersifat induktif (bus beban dengan faktor daya *Lagging*) bernilai negatif ( $S = -P - jQ$ ).
2. P dan Q dengan bus beban bersifat kapasitif (bus beban dengan faktor daya *leading*) adalah negative dan positif berturut-turut ( $S = -P + jQ$ ).
3. P dan Q bus generator bersifat induktif (bus dengan generator sedang beroperasi pada faktor daya *lagging*) adalah kedua bernilai positif ( $S = P + jQ$ ).
4. P dan Q bus generator bersifat kapasitif (bus dengan generator sedang beroperasi faktor daya *leading*).
5. Daya reaktif dari peralatan kompensasi kapasitif shunt dilokasi bus adalah positif.

Pada sistem multi-bus, penyelesaian aliran daya dengan metode Persamaan aliran daya. Metode yang digunakan pada umumnya dalam penyelesaian aliran daya, salah satunya adalah 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<sup>[4]</sup>.

Umumnya :

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

Sehingga dari persamaan Newton – Raphson

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \left( \frac{\Delta |V|}{|V|} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Maka submatriks  $J_2$  dan  $J_3$  dapat diabaikan sehingga persamaannya menjadi

$$[\Delta P] = [J_1][\Delta u] \quad (2)$$

$$[\Delta Q] = [J_4] \left[ \frac{\Delta |V|}{|V|} \right] \quad (3)$$

Disini terlihat persamaan dapat diselesaikan secara terurai (*decoupled*) dalam bentuk hubungan P dengan  $\Delta u$  dan Q dengan  $|V|$ .

Dengan penguraian ini memberikan keuntungan :

- kebutuhan memori jadi separuhnya
- teknik pemrograman 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

$$\left[ \frac{\Delta P}{|V|} \right] = [B'] [\Delta u] \quad (4)$$

$$\left[ \frac{\Delta Q}{|V|} \right] = [B''] [\Delta |V|] \quad (5)$$

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  $[B'] =$   
Luar diagonal :

$$B'_{pq} = \frac{1}{X_{pq}} \quad (6)$$

Diagonal :

$$B'_{pp} = - \sum_{q \in \Gamma(p)} B'_{pq} \quad (7)$$

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

Luar diagonal ;

$$B''_{pq} = \frac{X_{pq}}{(r_{pq}^2 + x_{pq}^2)} \quad (8)$$

Diagonal :

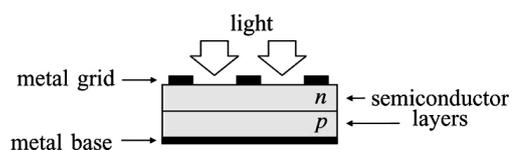
$$B''_{pq} = \sum_p Y_{sh} - \sum_{q \in \Gamma(p)} B''_{pq} \quad (9)$$

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

Ukuran matrik :

$B'$   $(N-1) \times (N-1)$  semua bus kecuali *slack*  
 $B''$   $(N-1-PV) \times (N-1-PV)$  hanya PQ bus saja

*Photovoltaic (PV)* dapat secara langsung mengubah cahaya matahari menjadi listrik. Perangkat dasar dari sebuah sistem *PV* adalah *PV cell*. *Cells* dapat dikelompokkan menjadi bentuk panel dan *arrays*. Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh terminal *PV* dapat digunakan langsung untuk beban kecil seperti motor DC. Aplikasi yang rumit memerlukan konverter elektronik untuk mengolah listrik dari  $PV^{[2]}$ .

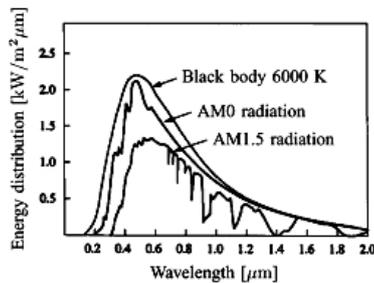


**Gambar 1.** Struktur Fisik Dari Sebuah *PV cell*.

Sel *photovoltaic* pada dasarnya terdiri atas diode semikonduktor *p-n junction* yang terkena cahaya. Sel *photovoltaic* dibuat dari beberapa semikonduktor dengan jenis manufaktur yang berbeda. Dipasaran yang dapat ditemukan hanya Sel-sel silikon berupa *monocrystalline* dan *polycrystalline*.

Efisiensi perangkat *PV* bergantung pada distribusi spectrum dari radiasi matahari. Matahari adalah sumber cahaya yang spektrum radiasi dapat dibandingkan dengan spectrum benda hitam mendekati yang 6000

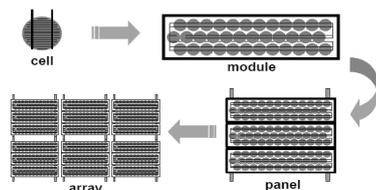
K.Bendahitam menyerap dan memancarkan radiasi elektromagnetik semua panjang gelombang. Teori distribusi panjang gelombang dari radiasi benda hitam secara matematis dijelaskan oleh hukum Planck, yang menetapkan hubungan dan saling ketergantungan panjang gelombang (atau frekuensi), suhu dan distribusi spektrum dari benda hitam. Gambar.2 menunjukkan distribusi spektrum dari radiasi benda hitam dibandingkan dengan radiasi matahari di luar angkasa dan daratan.



**Gambar 2.** Pendistribusian spektrum radiasi benda hitam dan radiasi Matahari di ruang luar angkasa (AM0) dan di permukaan Bumi (AM1.5)

PV pada umumnya mengacu pada standar distribusi spektrum. Dengan standar radiasi yaitu langsung tegak lurus terhadap permukaan Matahari. Radiasi difusi adalah radiasi dipengaruhi oleh uap atmosfer dan refleksi di permukaan Bumi. Standar AM1.5 didefinisikan untuk PV yang permukaannya miring pada 37° menghadap sinar Matahari.

*Photovoltaic cell* dipasang seri atau parallel untuk meningkatkan produksi arus atau tegangan. *Photovoltaic module*, terdiri dari *photovoltaic cells* yang dilindungi didalam laminasi industry. *Photovoltaic panel*, terdiri dari lebih dari satu *photovoltaic module* dan dipasang sebagai unit pemasangan lapangan. *Photovoltaic array*, merupakan unit lengkap sebagai pembangkit<sup>[4]</sup>.



**Gambar 3.** Photovoltaic cell, modul, panel, dan array

Persamaan teori dasar dari semikonduktor bahwa secara matematis menjelaskan tentang karakteristik I-V dari sel PV yang ideal adalah

$$I = I_{pv,cell} - I_{0,cell} \left[ \exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

$$I = I_{pv,cell} - I_d \quad (11)$$

Dimana:

$I_{pv,cell}$  = arus yang dihasilkan oleh cahaya datang (berbanding lurus dengan penyinaran Matahari)

$I_d$  = persamaan Shockley diode

$I_{0,cell}$  = saturasi terbalik atau arus bocor dari diode

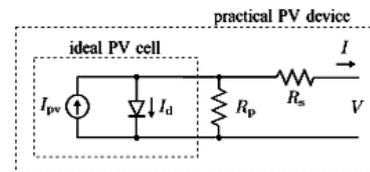
$q$  = muatan elektron ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C)

$k$  = konstanta Boltzmann ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K)

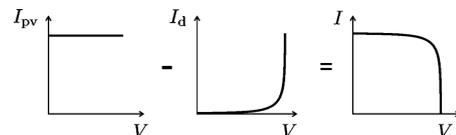
$T$  = temperatur dari *p-n junction* (Kelvin)

$A$  = konstanta ideal dioda

Gambar.3 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari sel PV yang ideal. Dan Gambar 4 menunjukkan kurva I-V dari persamaan (9) dan (10).



**Gambar 4.** Model dioda tunggal dari sel PV teoritis dan rangkaian ekivalen PV termasuk seri dan resistensi paralel.

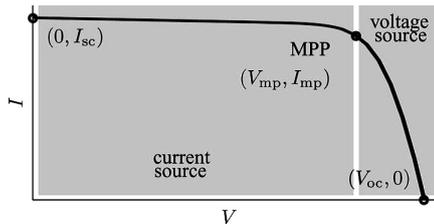


**Gambar 5.** kurva dari Karakteristik I-V sel PV. Arus bersih sel (I) adalah terdiri dari arus ( $I_{pv}$ ) yang dibangkitkan cahaya dan arus dioda ( $I_d$ ).

Persamaan dasar (9) dari dasar sel PV tidak menggambarkan karakteristik I-V dari PV array. Array tersusun dari beberapa sel PV yang terhubung dan karakteristik di terminal PV array memerlukan parameter tambahan untuk dasar persamaan.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (12)$$

Sel dihubungkan secara paralel meningkatkan arus dan sel-sel dihubungkan dalam seri memberikan tegangan output yang lebih besar. Jika array terdiri dari  $N_p$  yang hubungan paralel dari sel PV dan arus saturasi dapat dinyatakan sebagai  $I_{pv} = I_{pv,cell} N_p$ ,  $I_0 = I_{0,cell} N_p$  pada persamaan (11). Persamaan ini yang memulai kurva I-V pada gambar 5 dimana tiga titik bertanda adalah: *short circuit* ( $0, I_{sc}$ ), MPP ( $V_{mp}, I_{mp}$ ), dan *open circuit* ( $V_{oc}, 0$ ).



**Gambar 6.** Kurva karakteristik I-V dari praktikal PV dan titik bertanda: *short circuit* ( $0, I_{sc}$ ), MPP ( $V_{mp}, I_{mp}$ ), dan *open circuit* ( $V_{oc}, 0$ ).

Cahaya yang menghasilkan Arus dari sel PV sangat tergantung pada radiasi linear matahari dan juga dipengaruhi oleh suhu sesuai dengan persamaan berikut<sup>[2]</sup>:

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (13)$$

Dimana:

$I_{pv,n}$  (A) = cahaya yang menghasilkan arus pada kondisi nominal (biasanya 25°C and 1000 W/m<sup>2</sup>)

$T = T - T_n$  (T dan  $T_n$  sebagai suhu aktual dan nominal (Kelvin))

$G$  = iradiasi pada permukaan perangkat (W/m<sup>2</sup>)

$G_n$  = nominal iradiasi.

Persamaan daya aktif dari Photovoltaic dapat ditulis sebagai berikut:

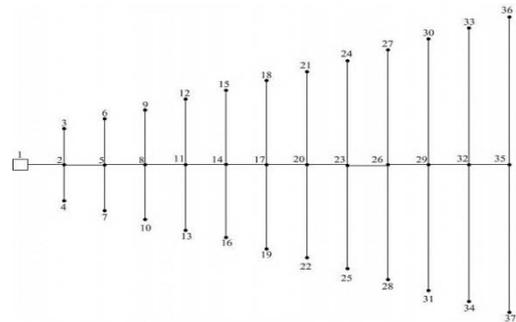
$$P = V \left( I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{V_i a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (14)$$

Turunan dari tegangan adalah nol, saat maksimum power point (MPP), hasilnya  $V_{mpp}$  dan  $I_{mpp}$  dapat diselesaikan menggunakan persamaan (2.11) dan (2.13). Sehingga daya aktif maksimum ( $P_{MPP}$ ) dapat ditentukan<sup>[5]</sup>.

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{MPP} = 0 \quad (15)$$

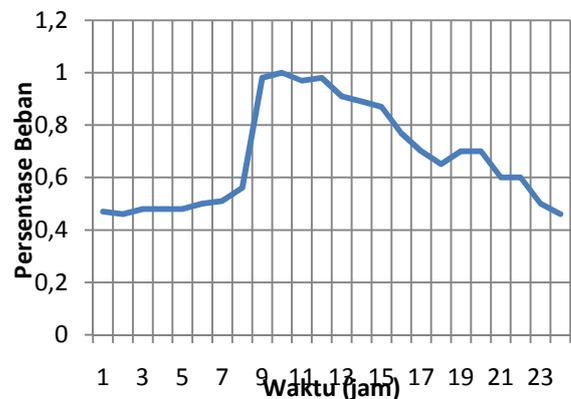
### III. METODA PENELITIAN

Sistem distribusi listrik yang digunakan adalah sistem yang dioperasikan oleh Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Brazil<sup>[6]</sup>. Sistem distribusi ini adalah sistem radial dan terdiri atas 37 bus dengan total beban adalah 2,298 MVA, dan topologinya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 7.** Topologi sistem distribusi yang diuji.

Data sistem yang digunakan, dapat dilihat pada lampiran A. Dan, beban harian, dapat dilihat pada grafik dibawah ini.



**Gambar 8.** Beban Harian.

Daya aktif (P) yang ditambahkan ke sistem distribusi, berupa daya aktif maksimum (MPP) *photovoltaic* yang diasumsikan telah melewati *converter DC/ inverter* dan terhubung secara paralel terhadap sistem distribusi.

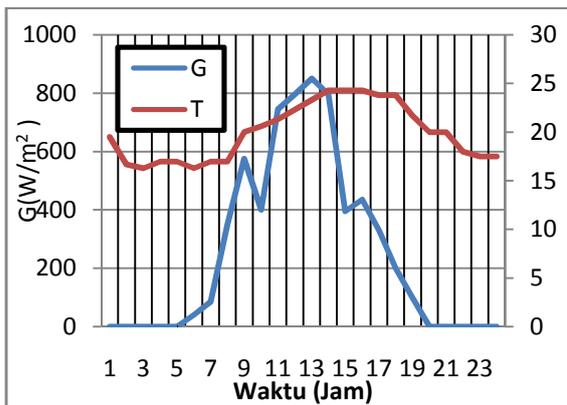
Dalam pengujian ada 3 jenis variasi penambahan *photovoltaic array* ke sistem distribusi, yaitu :

- a. Variasi letak *photovoltaic array*  
Pengujian dilakukan dengan variasi letak *photovoltaic array*. Dengan penempatan di bus 35, bus 17 dan bus 2.

- b. Variasi jumlah modul  
 Pengujian dilakukan dengan variasi jumlah modul *photovoltaic array* sebanyak 500, 1000 dan 1500 modul yang terhubung ke bus 35.
- c. Variasi jenis photovoltaic  
 Pengujian dilakukan dengan variasi jenis produk *photovoltaic* modul yang digunakan, dengan variasi daya aktif *photovoltaic* PV1>PV2>PV3. Jumlah yang digunakan sebanyak 500 modul dan terhubung ke bus 35.

Daya aktif *photovoltaic* bergantung terhadap radiasi matahari (G) dan suhu lingkungan (T). Nilai dari parameter ini diperoleh dari kurva radiasi dan temperature seperti pada gambar 4.5.

Program aliran daya menggunakan metoda fast decoupled, dengan konvergen iterasi 0.00001, dan bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa C++.



Gambar 9. Kurva radiasi, dan temperatur.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

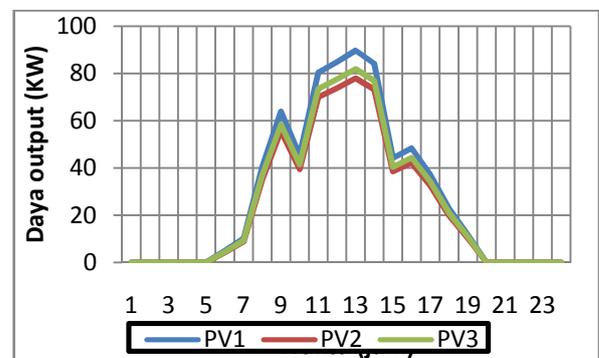
Program aliran daya dijalankan dalam dua kondisi untuk sistem distribusi ini. Pertama, program dijalankan sebelum ditambahkan *photovoltaic array*. Dan kedua, program dijalankan setelah ditambahkan *photovoltaic array* dengan berbagai macam kondisi.

Pada pengujian ini, aliran daya sistem distribusi listrik 37 bus dijalankan tanpa penambahan *photovoltaic array*, dengan menggunakan beban selama satu hari. Beban puncak daya aktif yaitu pada jam 10.00 dengan

total sebesar 1,958 MW, dan rugi-rugi daya sebesar 19,59 KW. Untuk jatuh tegangan paling besar, selalu terjadi pada bus 37 dan 36, karena berada di ujung saluran dengan panjang saluran yang sama.

Program aliran daya dijalankan dengan menambahkan *photovoltaic array* dengan berbagai macam variasi pengujian. Data hasil menjalankan program aliran daya seperti rugi-rugi daya dan jatuh tegangan, dibandingkan dengan data yang didapat sebelum penambahan *photovoltaic*. Dari perbandingan tersebut dapat dilihat pengaruhnya penambahan *photovoltaic* model terhadap sebuah sistem distribusi radial.

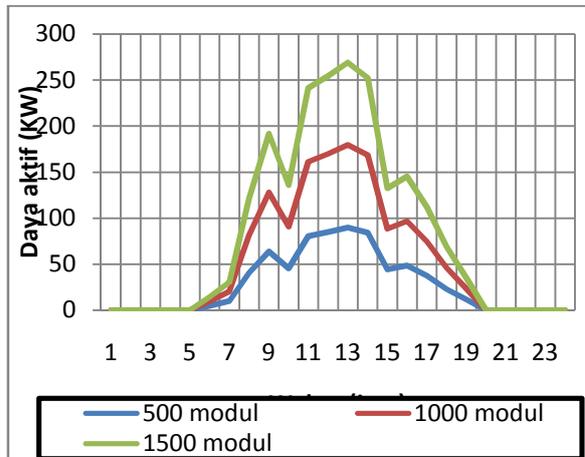
Daya aktif hasil keluaran *photovoltaic* dengan variasi jenis *manufacture photovoltaic* berbeda dan jumlah modul ditambahkan sama. Dengan ukuran *photovoltaic* PV1>PV3>PV2. Data sheet *photovoltaic* dapat dilihat pada Lampiran B. Daya aktif maksimum yang dikeluarkan dari masing-masing modul berbeda, untuk PV1 sebesar 89,77 KW, PV2 sebesar 78,02 KW dan PV3 sebesar 81,82 KW. Perbandingan daya aktif dalam satu hari dengan jenis *photovoltaic* berbeda dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 10. Grafik daya output *photovoltaic* dengan jenis *manufacture* berbeda.

Daya aktif hasil keluaran dengan variasi jumlah modul dengan *photovoltaic* yang digunakan sama yaitu PV1. Jumlah modul-nya adalah 500, 1000 dan 1500. Daya aktif maksimum dari modul yang berjumlah 500 sebesar 89,77 KW, untuk modul yang berjumlah 1000 sebesar 179,53 KW, dan modul yang berjumlah 1500 sebesar 269,30 KW. Perbandingan daya aktif dalam satu hari dengan

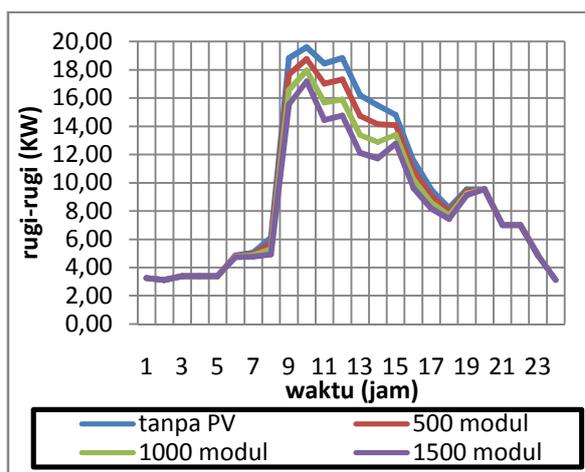
jumlah modul berbedadapat dilihat pada grafik berikut:



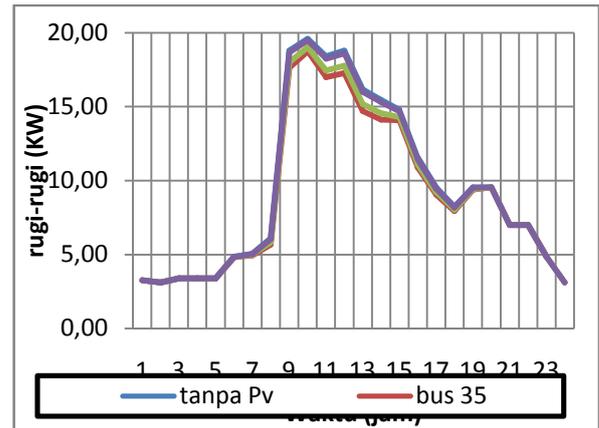
**Gambar 11.** Grafik daya keluaran *photovoltaic* dengan modul berbeda.

Dari seluruh variasi yang digunakan, pada jam 1.00 sampai jam 5.00 dan jam 20.00 sampai jam 24.00, daya keluarannya adalah nol. Radiasi matahari pada jam tersebut adalah nol, yang mengakibatkan daya keluaran juga menjadi nol. Radiasi matahari berperan penting dalam keluaran daya aktif sehingga grafik radiasi matahari identik dengan seluruh grafik daya aktif keluaran *photovoltaic* berbagai variasi.

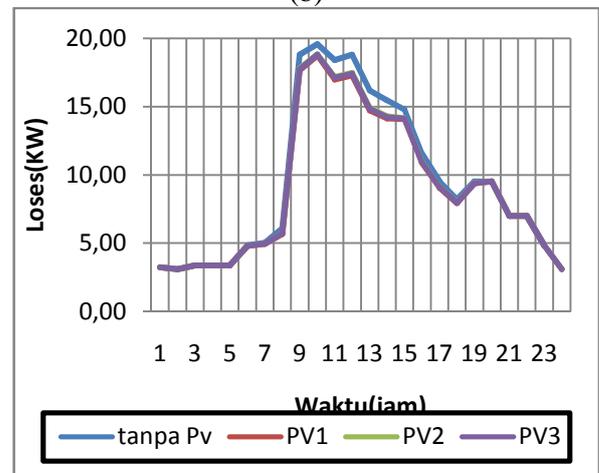
Hasil aliran daya setelah penambahan *photovoltaic* untuk rugi-rugi daya dalam satu hari dengan variasi cara penambahan *photovoltaic* dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



(a)



(b)



(c)

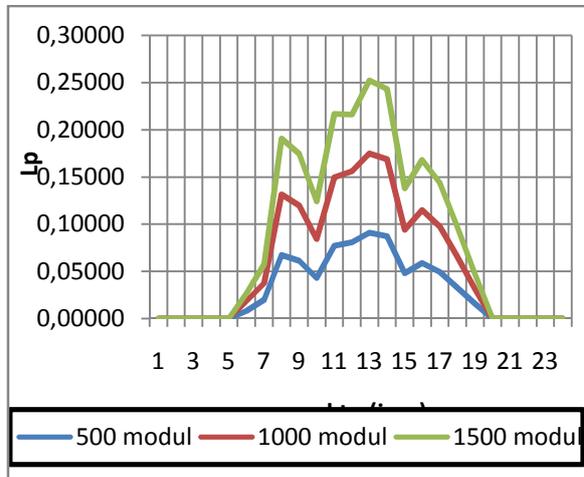
**Gambar 12.** Grafik rugi-rugi daya.

- (a) Variasi jumlah *photovoltaic*.
- (b) Variasi letak *photovoltaic*
- (c) Variasi jenis *photovoltaic*.

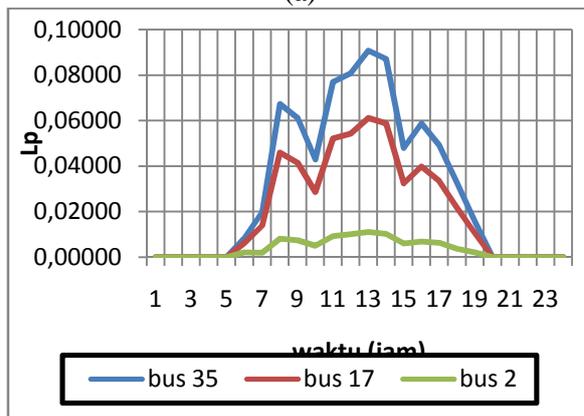
Penambahan *photovoltaic* mengurangi rugi-rugi daya pada sistem distribusi. Penurunan total rugi-rugi daya bergantung dengan daya keluaran *photovoltaic* dan posisi yang tepat untuk peletakan *photovoltaic*. Pada gambar 12(a) dapat dilihat penurunan rugi-rugi daya terbesar saat jumlah *photovoltaic* yang digunakan sangat banyak, dengan daya keluaran juga sangat besar. Pada gambar 12(b) dapat dilihat penurunan rugi-rugi daya terbesar dengan memposisikan *photovoltaic* di ujung jaringan, dimana rugi-rugi dayanya paling besar. Indeks kondisi dari rugi-rugi daya aktif setelah penambahan *photovoltaic* dapat ditulis sebagai berikut:

$$L_p = 1 - \frac{\text{Total rugi-rugi daya dengan penambahan photovoltaic}}{\text{Total rugi-rugi daya tanpa penambahan photovoltaic}}$$

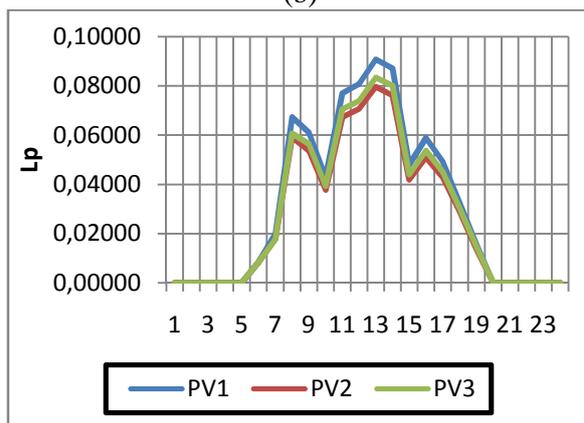
Indeks kondisi rugi-rugi daya aktif dengan berbagai variasi, dapat dilihat pada grafik berikut:



(a)



(b)



(c)

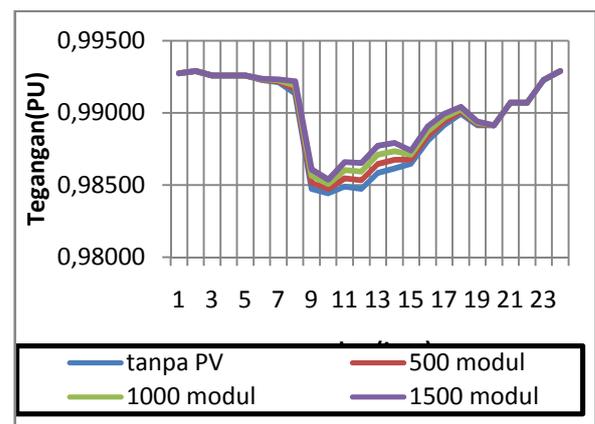
**Gambar 13.** Grafik indeks rugi-rugi daya aktif .

- (a) Variasi jumlah *photovoltaic*.
- (b) Variasi letak *photovoltaic*
- (c) Variasi jenis *photovoltaic*.

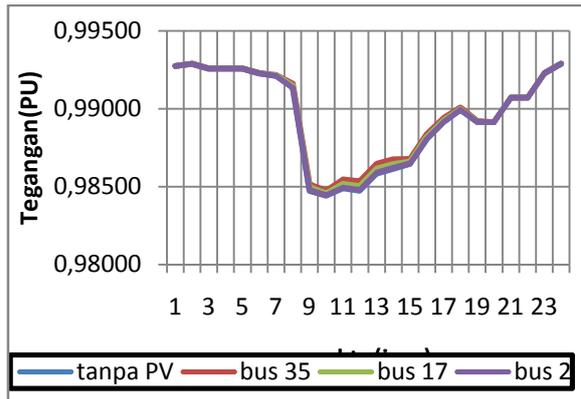
Saat matahari terbenam indeks  $L_p$  dalam semua variasi menjadi nol dan daya aktif *photovoltaic* tidak ada selama matahari terbenam. Dari grafik variasi jumlah *modul photovoltaic*, indeks tertinggi untuk jumlah *modul* 1500 adalah 0,252. Untuk jumlah *modul* 1000, indeks tertinggi yaitu 0,175. Dan untuk jumlah *modul* 500, indeks tertinggi yaitu 0,091.

Untuk grafik variasi jenis *photovoltaic* dengan ukuran  $PV1 > PV3 > PV2$ , didapatkan indeks yang hampir sama, namun tetap ukuran *photovoltaic* menjadi pembeda indeks rugi-rugi daya aktif. Untuk grafik letak *photovoltaic*, nilai indeks rugi-rugi daya tertinggi saat *photovoltaic* diletakan pada ujung sistem distribusi (bus 35) yaitu 0,091. Saat diletakan pada tengah sistem distribusi (bus 17), nilai indeks rugi-rugi daya tertinggi adalah 0,062. Dan saat diletakan pada pangkal sistem distribusi (bus 2), indeks rugi-rugi daya aktif tertinggi yaitu 0,011. Dari seluruh indek rugi-rugi daya aktif tertinggi terjadi pada jam 13.00, saat radiasi matahari tertinggi yaitu  $850 \text{ W/m}^2$ .

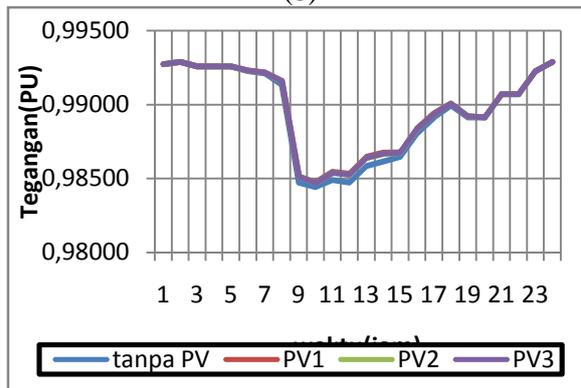
Setelah *photovoltaic* ditambahkan pada saluran distribusi, tegangan yang didapatkan pada setiap bus meningkat. Peningkatan tegangan hanya terjadi pada saat adanya radiasi matahari. Dan saat matahari terbenam, tidak ada peningkatan tegangan pada setiap bus. Untuk lebih lanjut dapat dilihat profil tegangan bus 37 setelah penambahan *photovoltaic* dalam berbagai variasi, pada gambar dibawah ini:



(a)



(b)



(c)

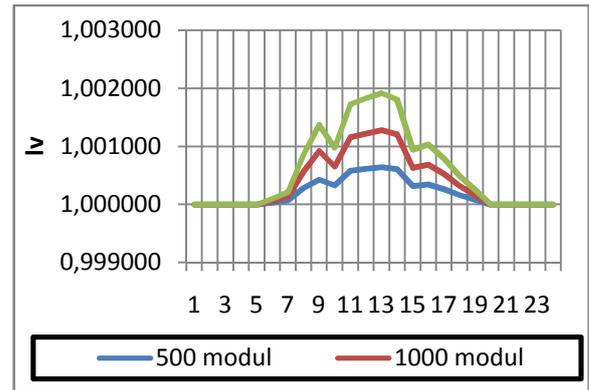
**Gambar 4.10** Profil tegangan pada bus 37.

- (a) Variasi jumlah *photovoltaic*.
- (b) Variasi letak *photovoltaic*
- (c) Variasi jenis *photovoltaic*.

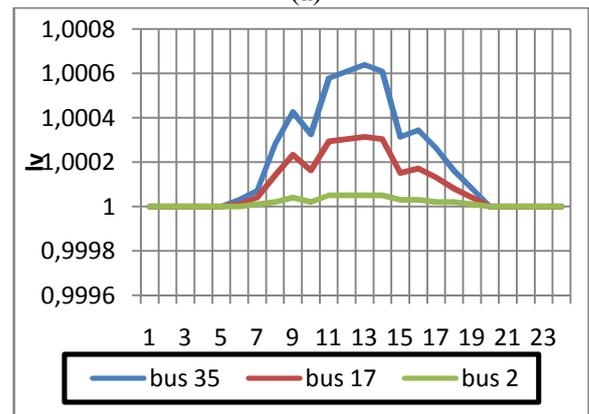
Tegangan pada bus 37 mengalami jatuh tegangan paling besar, sehingga profile tegangan bus ini yang ditampilkan. Sebelum penambahan *photovoltaic*, tegangan yang diterima paling kecil oleh bus 37 yaitu 0,98442 pu pada jam 10.00. Setelah penambahan *photovoltaic*, terjadi peningkatan tegangan. Karena *photovoltaic* dapat menyediakan daya aktif ke beban, sehingga membantu menurunkan arus sepanjang jaringan distribusi. Indeks kondisi dari peningkatan tegangan dapat ditulis sebagai berikut :

$$L_v = \max \left( \frac{|Tegangan \text{ dengan penambahan } photovoltaic|}{|Tegangan \text{ tanpa penambahan } photovoltaic|} \right)$$

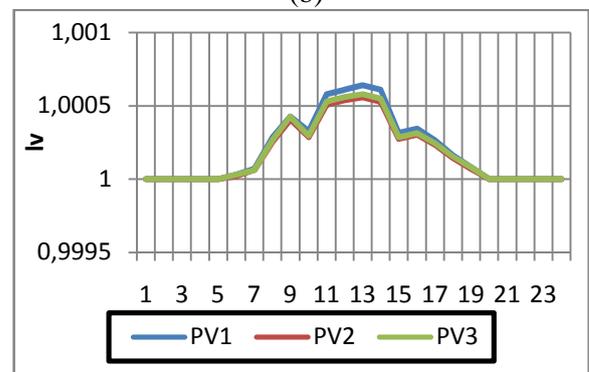
Indeks peningkatan tegangan pada bus 37 dengan berbagai variasi, dapat dilihat pada gambar berikut :



(a)



(b)



(c)

**Gambar 14** Indeks peningkatan tegangan pada bus 37.

- (a) Variasi jumlah *photovoltaic*.
- (b) Variasi letak *photovoltaic*
- (c) Variasi jenis *photovoltaic*.

Dari indeks peningkatan tegangan gambar 14(a), dapat dilihat bahwa peningkatan tertinggi saat jumlah *modul photovoltaic* 1500 dengan indeksnya adalah 1,001917 pada jam 13.00. Daya aktif yang dikeluarkan semakin tinggi sesuai dengan jumlah *modul* yang digunakan, sehingga peningkatan tegangan semakin besar pada ujung jaringan distribusi.

Dari gambar 14(b) dapat dilihat bahwa posisi pemasangan *photovoltaic array*, juga menentukan peningkatan tegangan pada jaringan distribusi. Pada Pemasangan *photovoltaic array* pada pangkal saluran, peningkatan tegangan tidak terlalu besardengan indeks terbesar adalah 1,000051. Saat dipasang pada ujung jaringan distribusi, indeks peningkatan tegangan sangat besar dengan indeks terbesarnya adalah 1,000639.

Indeks peningkatan tegangan untuk ukuran *photovoltaic* yang berbeda, dimana  $PV1 > PV3 > PV2$ , dapat dilihat indeks peningkatan tegangan tidak begitu jauh berbeda. Untuk indeks terbesar PV1 adalah 1,000639, indeks terbesar PV2 adalah 1,000558, dan untuk PV3 adalah 1,000578.

Dari seluruh grafik indeks peningkatan tegangan, grafik yang didapat identic dengan grafik radiasi matahari. Indeks pada saat matahari terbenam menjadi nol, karena *photovoltaic* tidak menghasilkan daya aktif.

## V. KESIMPULAN

Program aliran daya untuk analisi sistem distribusi dengan penambahan *photovoltaic* model telah berhasil dilakukan. Penambahan variasi jumlah dan ukuran *photovoltaic* pada sistem distribusi akan mengurangi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan. Rugi-rugi daya dan jatuh tegangan berkurang sesuai dengan besar radiasi matahari dan temperatur lingkungan, dengan kondisi terbaik saat radiasi matahari  $850 \text{ G/m}^2$  dan suhu lingkungan  $23,3^\circ\text{C}$ . Perbaikan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan, tidak terjadi saat matahari terbenam.

### 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

**Ricky Maulana**, menamatkan S1 di jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (UNAND) tahun 2012. Saat ini penulis sedang menjalankan S2 di Teknik Elektro Universitas Andalas.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Garcia, Paulo Augusto N. dan José Luiz R. Pereira. 2001. "Voltage Control Devices Model for Distribution Power Flow Analysis". IEEE Transactions On Power Systems, vol. 16, no. 4.
- [2] Villalva, Marcelo Gradella, dkk. 2009. "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays". IEEE Transactions On Power Electronics, vol. 24, no. 5.
- [3] Mahendra, Miko. 2011. "Tugas Akhir: Pengaruh Penambahan Pltu Teluk Sirih 100 MW Pada Sistem Interkoneksi Sumatera". Padang : Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas.
- [4] *Installing Photovoltaic system*. 1999: Florida Solar Energy Center
- [5] Mahmoud, Karar dan Mamdouh Abdel-Akher. 2010. "Analysis of Hybird Photovoltaic and Wind Energies Connected to Unbalanced Distribution Systems. IEEE International Conference on Power and energy: Malaysia.
- [6] [http://id.wikipedia.org/wiki/Energi\\_ramah\\_lingkungan](http://id.wikipedia.org/wiki/Energi_ramah_lingkungan). Diakses tanggal 27-01-2012. Jam 22.05 wib..
- [7] Wood, Allen J. dan Bruce F. Wollenberg. 1996. "Power Generation, Operation and Control 2<sup>nd</sup> Edition". New York: John Wiley and Sons, INC.
- [8] <http://economy.okezone.com/read/2011/05/30/20/462449/tertundanya-proyek-listrik-bisa-berdampak-signifikan>. Diakses tanggal 4-3-2012. Jam 21.20 wib
- [9] <http://economy.okezone.com/read/2011/05/30/20/462449/tertundanya-proyek-listrik-bisa-berdampak-signifikan>. Diakses tanggal 4-3-2012. Jam 21.20 wib