

Analisis Injeksi Pembangkit *Hybrid* Tenaga Surya-Angin pada Sistem GI Sengkaling Penyulang Pujon

Lukman Hakim, Hadi Suyono, dan Harry Soekotjo Dachlan

Abstract— To resolve the energy deficiency, there are some strategies have been done such as, diversification, conservation, and the intensification of energy resources. The diversification strategy at energy originated from new and renewable energy could be implemented by using the hybrid between photovoltaic (pv)/solar system and wind energy. The study has been conducted at Banyak Hill, Batu City. That located at coordinate : latitude and longitude 112.503948 -7.861087 °, and $\pm$ 941m elevation above sea level. The analysis has been performed to determine the energy potential and power system operation analyzes of hybrid solar-wind power system that injected to distribution system. Solar and wind energy potential has been determined based in the measurement that result and average solar of 5,19kWh/m². While the average wind speed of 2,9m/s at 10 meters above ground level. Based on the power system analysis, the injection of hybrid solar wind power plant could improve the voltage profile up to 5,15% compare with the existing systems while the power system losses could decide until 1,92% of the total generation power.

Abstrak—Upaya mengatasi kekurangan energi, ada beberapa strategi yang dilakukan seperti diversifikasi, konservasi, dan intensifikasi sumber energi. Strategi diversifikasi energi berasal dari energi baru dan terbarukan dengan menggunakan *hybrid* antara *photovoltaic* (pv)/surya sistem dan energi angin. Penelitian dilakukan di Gunung Banyak Kota Batu tepatnya pada koordinat *latitude* -7.861087° dan *longitude* 112.503948° elevasi $\pm$ 941m dpl. Analisis yang telah dilakukan adalah analisis potensi energi dan operasi sistem tenaga dari sistem tenaga *hybrid* surya-angin yang diinjeksikan ke sistem distribusi. Hasil pengukuran menunjukkan radiasi matahari rata-rata sebesar 5,19kWh/m². Sedangkan kecepatan angin rata-rata 2,9m/detik pada ketinggian 10 meter diatas permukaan tanah. Berdasarkan analisis sistem tenaga, injeksi pembangkit listrik tenaga *hybrid* surya-angin bisa meningkatkan profil tegangan hingga 5,15% dibandingkan dengan sistem yang ada sedangkan rugi-rugi daya sistem hingga 1,92% dari total pembangkit listrik.

Kata kunci—Surya, Angin, Probabilitas Weibull, Grid, *Hybrid* Surya-Angin, ACS.

Lukman Hakim, mahasiswa Program Magister Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (e-mail: masloekman@gmail.com).

Hadi Suyono, dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp.0341-554166; e-mail: hadis@ub.ac.id).

Harry Soekotjo Dachlan, dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp.0341-554166; harrysd@ub.ac.id).

I. PENDAHULUAN

AMANAT undang-undang tentang Energi menyatakan bahwa penyediaan energi dilakukan melalui: diversifikasi, konservasi, dan intensifikasi sumber energi dan energi. Salah satu Sasaran Kebijakan Energi Nasional adalah terwujudnya energi (primer) mix yang optimal pada tahun 2025, yaitu peranan energi baru dan terbarukan lainnya, khususnya, biomasa, nuklir, tenaga air skala kecil, tenaga surya, dan tenaga angin menjadi lebih dari 5% terhadap konsumsi energi nasional. Kondisi energi listrik eksisting berdasarkan data statistik PLN 2014 khususnya mengenai energi baru terbarukan masih belum memenuhi ketentuan dan perundangan yang berlaku di Indonesia. Langkah-langkah yang harus dilakukan salah satunya adalah dengan diversifikasi energi [1].

Indonesia secara geografis dilewati garis khatulistiwa dan beriklim tropis. Potensi energi surya di Indonesia rata-rata sebesar 4,8 kWh/m² per hari, sedangkan kecepatan angin di seluruh Indonesia berkisar antara 2,5–5,5 m/detik pada ketinggian 24 meter di atas permukaan tanah yang mampu membangkitkan energi listrik hingga 100 kW per turbin [2]. Dengan demikian energi baru dan terbarukan angin dan surya sebagai pembangkit listrik tidak diragukan lagi sebagai sumber energi yang berkelanjutan di Indonesia.

Untuk mendapatkan kajian lebih mendalam mengenai potensi energi baru terbarukan di daerah-daerah wilayah Indonesia, maka perlu dilakukan penelitian khusus di setiap daerah yang secara hipotesis mempunyai potensi sumber energi baru terbarukan. Sehingga sasaran Kebijakan Energi Nasional akan lebih cepat terwujud.

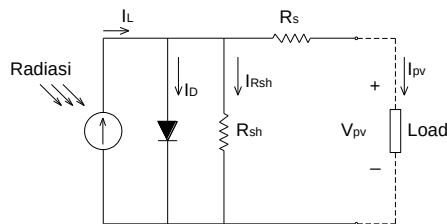
Pada penelitian ini dilakukan di daerah administratif Kota Batu tepatnya pada koordinat *latitude* -7.861087° dan *longitude* 112.503948° elevasi $\pm$ 941 dpl. Lokasi ini berpotensi menghasilkan energi matahari dan angin yang memadai untuk dikonversi menjadi energi listrik karena berada di dataran tinggi, dan berada di lembah gunung yang memungkinkan sebagai daerah tangkapan angin. Lokasi tersebut juga digunakan sebagai tempat latihan penerbangan paralayang. Selain itu daerah tersebut adalah dataran yang tidak terdapat pohon tinggi sehingga sinar matahari langsung mengenai permukaan tanah dataran.

II. SISTEM PEMBANGKIT HYBRID

A. PV Sistem

PV sistem terdiri dari tiga bagian utama yaitu: *module* panel surya, radiasi surya yang mengenai permukaan *module* panel surya, dan temperatur permukaan *module* panel surya [3]. Radiasi surya diperoleh dengan mengukur dan observasi secara langsung di lokasi penelitian tiap jamnya setiap hari selama rentang waktu penelitian. Temperatur permukaan *module* panel surya mempengaruhi arus dan tegangan keluaran panel surya. Kenaikan temperatur menyebabkan arus keluaran panel surya naik, sedangkan tegangan akan turun begitu juga sebaliknya [5]. Injeksi sistem *pv* pada sistem distribusi sudah banyak disiskusikan seperti pada [4].

Module panel surya adalah kumpulan *pv* sel, rangkaian ekuivalen [6] ditunjukkan Gambar.1.



Gambar. 1. Rangkaian Ekuivalen PV Module

Persamaan tegangan dan arus pada *pv module* diberikan sebagai berikut [5], [6], [7] :

$$I_{pv} = \frac{G}{G_0} [I_{sc} + \alpha(T - T_{ref})] - I_d \left[\exp \left(\left(\frac{q}{kAT} \right) \left(\frac{V_{pv}}{n_s} + I_{pv} R_s \right) \right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$V_{pv} = \frac{kAT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_d} + 1 \right) \quad (2)$$

Daya keluaran *pv module* didapat dengan persamaan:

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (3)$$

dimana:

- I_d : arus saturasi diode (A)
- I_{pv} : arus keluaran *pv module* (A)
- I_{Rsh} : arus yang mengalir pada tahanan R_{sh} (A)
- I_{sc} : arus kondisi standart test (A)
- I_L : arus *photo module* (A)
- q : muatan electron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
- α : koefisien temperatur *arus short circuit* ($^{\circ}\text{C}$)
- V_{pv} : tegangan *pv module* (V)
- k : konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T_{ref} : temperatur pada kondisi standart tes *pv module* (25°C)
- T : temperatur aktual pada permukaan *pv module* ($^{\circ}\text{C}$)
- G : radiasi matahari aktual pada permukaan *pv module* (W/m^2),
- G_0 : radiasi pada saat kondisi standart tes ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$),
- A : *factor ideal* (1,5)
- R_s : tahanan seri (ohm)

n_s : jumlah cell dalam rangkaian seri

P_{pv} : Daya keluaran *pv module* (watt)

Besar daya keluaran dari *pv* sistem digambarkan dalam bentuk kurva P-V yang merupakan hasil kali dari nilai tegangan dan arus pada Persamaan (3).

B. Sistem Tenaga Angin

Bagian utama sistem pembangkit listrik tenaga angin adalah: kecepatan angin sebagai sumber energi, turbin angin, dan generator listrik.

Model pola Kecepatan angin didapatkan dengan melakukan pengukuran secara langsung di lokasi penelitian. Data kecepatan angin dianalisis dengan metode Fungsi Probabilitas *density Weibull*. Berikut persamaan fungsi probabilitas *density Weibull* [9]:

$$f(v) = \frac{k_p}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k_p-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^{k_p} \right] \quad (4)$$

dimana:

k_p : parameter bentuk pada distribusi *Weibull*

c : parameter skala pada distribusi *Weibull*

v : kecepatan angin (m/s)

Besar daya yang dihasilkan oleh turbin angin diperoleh dengan persamaan [5] berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (9)$$

dimana:

P_w : daya angin (watt)

ρ : kerapatan udara (kg/m^3)

A : luas area putaran baling-baling (m^2)

v : kecepatan angin (m/s)

Kecepatan angin akan naik pada setiap perubahan ketinggian akibat gesekan dengan permukaan tanah [5]. Berikut persamaan perubahan kecepatan angin:

$$v = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha} \quad (10)$$

dimana:

v : kecepatan angin pada ketinggian h

v_{ref} : kecepatan angin referensi pada ketinggian referensi h_{ref}

h : ketinggian kecepatan angin (m)

h_{ref} : ketinggian referensi (m)

α : koefisien gesek tanah

Setiap turbin angin mempunyai efisiensi C_p , dengan demikian persamaan (9) yang disubstitusikan dengan persamaan (10) menjadi:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p \left[v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha} \right]^3 \quad (11)$$

Persamaan (11) adalah persamaan akhir untuk menghitung daya turbin angin pada ketinggian turbin angin h diatas permukaan tanah.

C. Sistem Pembangkit Hybrid Surya-Angin

Pada penelitian ini akan menyajikan suatu sistem pembangkit tenaga listrik *hybrid* yaitu kombinasi antara tenaga surya dan tenaga angin. Dengan demikian maka daya listrik yang dihasilkan dari pembangkit *hybrid*

diperoleh dengan persamaan:

$$P_h = P_{pv} + P_w \dots\dots\dots (12)$$

dimana P_h adalah daya total pembangkit *hybrid*.

III. SISTEM HYBRID TERHUBUNG GRID

GI Sengkaling Penyulang Pujon terdiri dari 117 bus dengan panjang saluran total 59,65 km dan bekerja pada rating tegangan 20 kV frekuensi 50 Hz. Pembangkit *hybrid* surya-angin akan diinjeksikan ke jaringan eksisting di bus yang mempunyai jarak terdekat dengan lokasi penelitian yaitu ± 440 meter, tepatnya pada koordinat *latitude* -7.864428° dan *longitude* 112.504837° ,

Metode yang akan digunakan untuk menganalisis aliran daya sistem pada penelitian ini menggunakan metode *Newton-Rapshon*. Simulasi sistem sebelum dan sesudah injeksi menggunakan perangkat *software* PSAT 2.1.8. [9]. Sistem yang akan diinjeksikan ke jaringan sistem GI Sengkalin penyulang Pujon harus memenuhi syarat aturan jaringan yang telah ditentukan [10].

IV. ANALISIS POTENSI DAN TEKNIS SISTEM

Analisis potensi sumber energi baru terbarukan adalah potensi angin dan surya untuk sumber energi pembangkit listrik. Sedangkan analisis teknis mencakup pada kemampuan pembangkit listrik eksisting jika diinjeksi dengan sumber pembangkit baru berupa pembangkit listrik tenaga *hybrid* surya-angin.

A. Analisis Potensi Surya-Angin

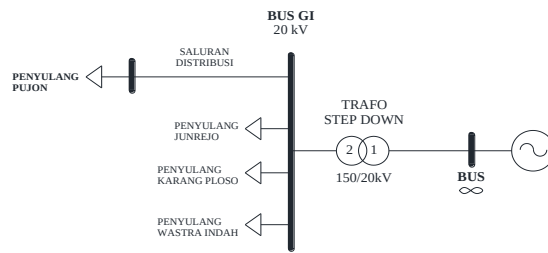
Ada dua jenis potensi sumber energi pembangkit listrik yang akan dilakukan analisis. Pertama adalah radiasi penyinaran matahari. Kemampuan pembangkit listrik energi surya berbanding lurus dengan kemampuan radiasi matahari. Semakin besar radiasi matahari maka semakin besar energi listrik yang dihasilkan. Kedua adalah kecepatan angin. Potensi kecepatan angin sebagai sumber energi listrik perlu dilakukan analisis. Hal ini dilakukan karena Pembangkit Listrik Tenaga Angin sangat bergantung pada kecepatan angin yang akan memutar turbin angin. Semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar pula energi listrik yang dibangkitkannya.

B. Analisis Teknis Sistem

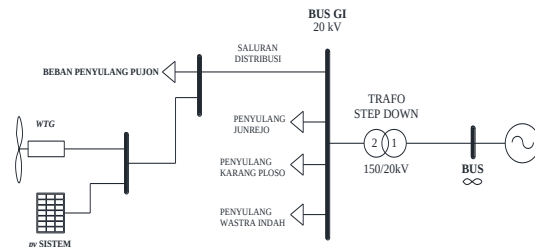
Pembahasan analisis teknis sistem meliputi sistem *steady state*. Terdapat 4 skenario yang dilakukan analisis yaitu:

Skenario 1 adalah skenario sistem eksisting sebelum dilakukan injeksi dengan pembangkit *hybrid* surya-angin. Skenario 1 ditunjukkan pada Gambar.2 *single line diagram* skenario 1.

Skenario 2 adalah skenario sistem eksisting diinjeksi pembangkit *hybrid* surya-angin dengan komposisi suplai listrik 20% total beban penyulang Pujon oleh pembangkit *hybrid* surya-angin dan pembangkit eksisting mensuplai 80% energi listrik. Berikut Gambar.3 *single line diagram* sistem injeksi.



Gambar. 2. Skenario 1: Sistem Eksisting Sebelum Injeksi



Gambar. 3. Sistem Eksisting Diinjeksi Energi Listrik oleh Pembangkit *Hybrid* Surya-Angin

Skenario 3 adalah skenario sistem eksisting diinjeksi pembangkit *hybrid* surya-angin dengan komposisi suplai energi listrik 50% total beban penyulang Pujon oleh pembangkit *hybrid* surya-angin dan pembangkit eksisting mensuplai 50% energi listrik.

Skenario 4 adalah skenario sistem eksisting diinjeksi pembangkit *hybrid* surya-angin dengan komposisi suplai energi listrik 78% total beban penyulang Pujon oleh pembangkit *hybrid* surya-angin dan pembangkit eksisting mensuplai 22% energi listrik.

Analisis teknis sistem dari keempat skenario tersebut dilakukan pada keadaan sistem GI sengkaling penyulang Pujon beban maksimum, rata-rata, dan minimum. Sedangkan injeksi pembangkit *hybrid* diletakkan di bus 18 sistem distribusi 20 kV.

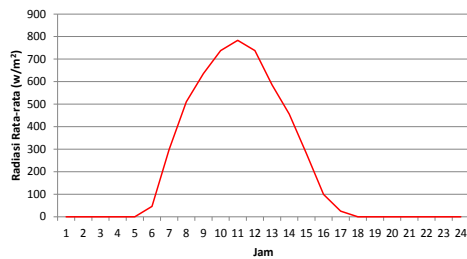
V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Potensi Energi Surya dan Angin

Pengambilan data radiasi surya dilakukan pengukuran secara langsung tiap jam selama 12 jam setiap harinya dalam waktu 90 hari mulai bulan Februari hingga Mei 2014. Pengukuran dilakukan mulai dari jam 06.00 WIB hingga 18.00 WIB. Jam 18.01 WIB hingga jam 05.59 WIB tidak dilakukan pengukuran karena pada jam tersebut matahari tidak ada. Rata-rata setiap harinya radiasi matahari sebesar $5,19 \text{ kWh/m}^2$ atau $0,22 \text{ kW/m}^2$ perjam.

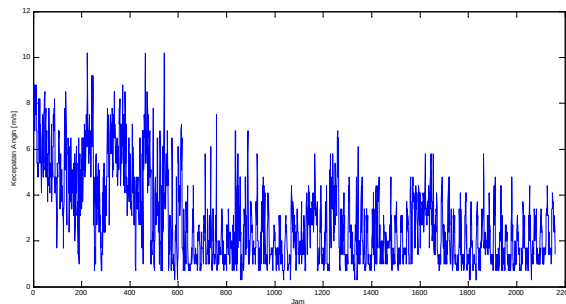
Gambar.4 menunjukkan bahwa mulai jam 18.00 WIB hingga jam 05.00 WIB tidak ada radiasi matahari. Total akumulasi radiasi matahari terbesar selama masa pengukuran terjadi pada jam 11.00 WIB yaitu sebesar $783,23 \text{ kW/m}^2$. Efektif radiasi matahari adalah selama 12 jam mulai jam 06.00 WIB hingga jam 17.00 WIB.

Dari hasil pengukuran tersebut dapat digunakan untuk membangkitkan listrik tenaga surya yang berkapasitas 1,3 MVA dengan kebutuhan panel surya sebanyak 3740 panel surya yang masing masing panel surya berkapasitas 330 Wp.



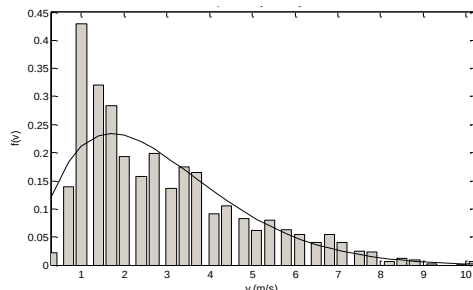
Gambar. 4. Rata-rata Radiasi Surya Selama Pengukuran perjam

Data kecepatan angin diperoleh dari pengukuran langsung selama 2.160 jam pada bulan Februari hingga Mei 2014. Hasil pengukuran kecepatan angin di lokasi observasi ditunjukkan dalam Gambar.5.



Gambar. 5. Kecepatan Angin Hasil Pengukuran perjam

Gambar.5 menunjukkan bahwa kecepatan angin di lokasi penelitian tidak konstan antara 0,3 m/s hingga tertinggi 10,2 m/s, dan kecepatan angin rata-rata 2,9 m/s. Perhitungan frekuensi dan probabilitasnya menggunakan fungsi probabilitas *density Weibull*.



Gambar. 6. Probabilitas Weibull dan Frekuensi Kecepatan Angin

Bentuk kurva pada Gambar.6 ada dua bentuk. Bentuk pertama adalah kurva tipe bar, dan bentuk yang kedua adalah kurva garis. Kurva Bar menunjukkan distribusi frekuensi kecepatan angin. Frekuensi tertinggi pada kecepatan angin 1 m/s sebesar 42,9% dan frekuensi terendah adalah 0,066% terjadi pada kecepatan angin 9,9 m/s². Bentuk kedua kurva garis yang menunjukkan probabilitas *Weibull*. Probabilitas tertinggi sebesar 0,2337 pada kecepatan angin 1,7 m/s. Sedangkan angka probabilitas terendah adalah 0,0021 pada kecepatan angin 10,2 m/s.

Hasil perhitungan kecepatan angin dengan pendekatan fungsi probabilitas *Weibull* diatas menggunakan nilai skala parameter k_p 1,5773 dan skala bentuk c 3,2396. Standart deviasinya sebesar 1,9117 dan kecepatan angin rata-rata 2,9 m/s. Total daya spesifik per harinya sebesar 356,33 Wh/m².

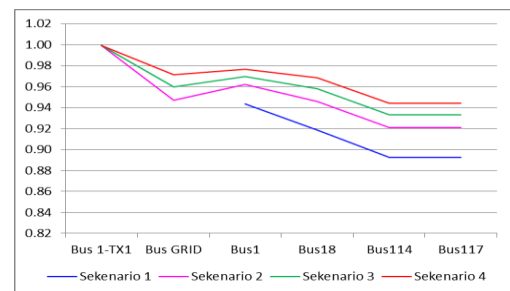
Kecepatan angin akan berubah pada perubahan

ketinggian. Dengan menggunakan Persamaan (11), jika tinggi hub pada turbin angin 70 meter maka didapat kecepatan angin rata-rata sebesar 3,5 m/s dan energi listrik yang dihasilkan rata-rata sebesar 1,5 MWh/hari. Untuk mendapatkan energi listrik yang besar maka diperlukan jenis turbin angin yang berkapasitas besar, kapasitas pembangkit yang akan disimulasikan adalah sebesar 2,5 MVA.

B. Analisis Drop Tegangan Sistem

Simulasi sistem *steady state* menggunakan software PSAT 2.1.8.[9]. Injeksi pembangkit baru di bus 18. Masing-masing skenario disimulasikan dalam kondisi beban maksimum, rata-rata, dan minimum.

Hasil simulasi skenario 1 beban maksimum menunjukkan bahwa *drop* tegangan tertinggi terjadi di bus 114 sebesar 0,892654 p.u. Bus 114 jauh dari sumber pembangkit. Hal sama juga terjadi pada skenario 2, 3, dan 4. Besar *drop* tegangan di bus 114 skenario 2, 3, dan 4 sebesar 0,92069 p.u, 0,93318 p.u, dan 0,9441 p.u. Pada bus 1-TX1, bus 18, bus 114, dan bus 117 mengalami perbaikan tegangan setelah diinjeksi. Besar *drop* tegangan pada bus tersebut dapat dilihat pada Tabel I dan Gambar.7 sebagai berikut.



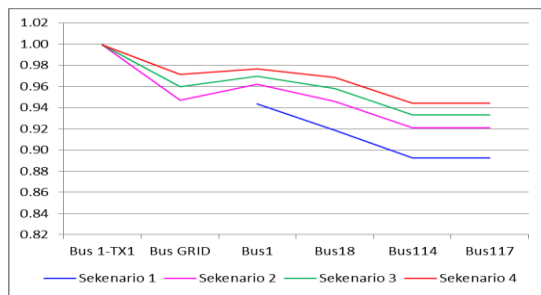
Gambar. 7. Drop Tegangan Sistem Skenario 1, 2, 3, dan 4 Keadaan Beban Maksimum

TABLE I
DROP TEGANGAN PADA SISTEM SKENARIO 1, 2, 3, DAN 4 KEADAAN BEBAN MAKSIMUM

BUS	Drop Tegangan (p.u)			
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4
Bus 1-TX1	0,999	0,999	0,999	0,999
Bus GRID		0,947	0,959	0,971
Bus1	0,943	0,962	0,969	0,976
Bus18	0,918	0,945	0,957	0,968
Bus114	0,893	0,921	0,933	0,9441
Bus117	0,893	0,920	0,933	0,9442

Gambar.7 dan Tabel I menunjukkan bahwa terjadi perbaikan *Drop* tegangan di seluruh bus. Pada bus 114 skenario 1 *drop* tegangan sebesar -10,73% dari tegangan nominal 20 kV. *Drop* tegangan sistem skenario 1 tidak sesuai dengan aturan jaringan yang menyatakan bahwa dalam kondisi normal *drop* tegangan harus dipertahankan dalam batasan +5% dan -10% [11]. Sedangkan pada bus yang sama skenario 2, 3, dan 4 terjadi perbaikan tegangan. Perbaikan *drop* tegangan terbaik pada skenario 4.

Drop tegangan pada sistem beban rata-rata skenario 1, 2, 3, dan 4 tertinggi terjadi di bus 114. *Drop* tegangan pada sistem skenario 1 kondisi beban rata-rata sebesar 0,933 p.u. Pada sistem skenario 2, 3, dan 4 kondisi beban rata-rata *drop* tegangan masing-masing sebesar 0,950 p.u, 0,957 p.u, dan 0,965 p.u.



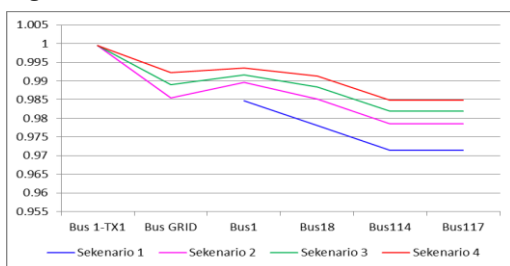
Gambar. 8. Drop Tegangan Sistem Skenario 1, 2, 3, dan 4 Keadaan Beban Rata-rata

TABLE II
DROP TEGANGAN PADA SISTEM SKENARIO 1, 2, 3, DAN 4 KEADAAN BEBAN RATA-RATA

BUS	Drop Tegangan (p.u)			
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4
Bus 1-TX1	0,999	0,999	0,999	0,999
Bus GRID		0,966	0,971	0,982
Bus1	0,965	0,976	0,981	0,985
Bus18	0,949	0,965	0,973	0,980
Bus114	0,934	0,951	0,957	0,965
Bus117	0,933	0,950	0,958	0,965

Gambar.8 dan Tabel II menunjukkan bahwa tegangan di bus 114 mempunyai *drop* tegangan yang paling besar. Setelah dilakukan injeksi dengan sistem skenario 2, 3, dan 4 terjadi perbaikan *drop* tegangan yang besarnya masing-masing adalah 1,68%, 2,43%, dan 3,14% dari tegangan nominal 20 kV. Pada bus 18 merupakan bus titik injeksi mengalami perbaikan tegangan pada masing-masing skenario. Skenario yang terbaik untuk memperbaiki *drop* tegangan sistem beban rata-rata adalah skenario 4.

Keadaan sistem beban minimum pada masing-masing skenario mengalami *drop* tegangan tertinggi di bus 114. Sistem skenario 1 di bus 114 mengalami *drop* tegangan sebesar 0,971487 p.u, skenario 2 sebesar 0,978555 p.u, skenario 3 sebesar 0,981869 p.u, dan skenario 4 sebesar 0,984827 p.u. Pada bus 18 mengalami perbaikan tegangan setelah dilakukan injeksi dengan pembangkit *hybrid* tenaga surya-angin. Hal yang sama terjadi pada bus Grid, bus 1-TX1, bus 1, bus 18, dan bus 117. Berikut Gambar.11 dan Tabel III *drop* tegangan masing-masing skenario keadaan beban minimum.



Gambar. 9. Drop Tegangan Bus 114 Sistem Skenario 1, 2, 3, dan 4 Keadaan Beban minimum

Gambar.9 menunjukkan perbaikan *drop* tegangan pada beban minimum sistem skenario 2, 3, dan 4. Tegangan pada bus 1-TX1, bus Grid, bus 1, bus 18, dan bus 117 masing-masing skenario mengalami perbaikan tegangan. Besarnya *drop* tegangan pada bus-bus tersebut dapat dilihat pada Tabel III. Dan Skenario terbaik untuk memperbaiki *drop* tegangan sistem beban minimum adalah skenario 4.

TABLE III
DROP TEGANGAN PADA SISTEM SKENARIO 1, 2, 3, DAN 4 KEADAAN BEBAN MINIMUM

BUS	Drop Tegangan (p.u)			
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4
Bus 1-TX1	0,999	0,999	0,999	0,999
Bus GRID		0,985	0,989	0,992
Bus1	0,985	0,989	0,992	0,993
Bus18	0,978	0,985	0,988	0,991
Bus114	0,972	0,978	0,982	0,984
Bus117	0,972	0,979	0,982	0,985

Secara keseluruhan bahwa sistem skenario 4 dapat memperbaiki *drop* tegangan yang terbaik pada keadaan beban maksimum, rata-rata, dan minimum.

C. Analisis Aliran Daya Sistem

Hasil simulasi skenario 1 menunjukkan aliran daya aktif sistem keadaan beban maksimum di saluran di saluran terdekat dengan bus 18 (injeksi) yaitu dari bus 17 ke bus 18 (*line* 29) sebesar 3,28 MW. Setelah dilakukan injeksi aliran daya aktif di *line* 29 mengalami perubahan. Aliran daya di *line* 29 pada skenario 2, 3, dan 4 masing-masing sebesar 2,44 MW, 1,21 MW, dan 0,06 MW. Sedangkan Aliran daya reaktif di *line* 29 pada skenario 1, 2, 3 dan 4 masing-masing sebesar 2,04 MVAR, 0,58 MVAR, 1,08 MVAR, dan 1,54 MVAR. Total daya aktif yang dibangkitkan masing-masing skenario 1, 2, 3, dan 4 sebesar 13,13 MW, 12,96 MW, 12,89 MW, dan 12,87 MW. Total daya reaktifnya masing-masing sebesar 8,21 MVAR, 8,18 MVAR, 8,25 MVAR, 8,38 MVAR.

Aliran daya aktif di *line* 29 sistem skenario 1, 2, 3 dan 4 kondisi beban rata-rata masing-masing sebesar 2,09 MW, 1,56 MW, 0,76 MW, dan 0,02 MW. Sedangkan daya reaktifnya sebesar 1,29 MVAR, 0,367 MVAR, 0,69 MVAR, dan 0,97 MVAR. Total daya aktif yang dibangkitkan oleh skenario 1, 2, 3, dan 4 masing-masing sebesar 10,24 MW, 10,18 MW, 10,16 MW, dan 10,15 MW. Total daya reaktifnya sebesar 6,38 MVAR, 6,37 MVAR, 6,48 MVAR, dan 6,50 MVAR.

Sistem skenario 1, 2, 3 dan 4 kondisi beban minimum di *line* 29 aliran daya aktifnya masing-masing sebesar 0,92 MW, 0,69 MW, 0,33 MW, dan 0,0054 MW. Sedangkan daya reaktifnya sebesar 0,57 MVAR, 0,16 MVAR, 0,29 MVAR, dan 0,42 MVAR. Total daya aktif yang dibangkitkan oleh skenario 1, 2, 3, dan 4 masing-masing sebesar 6,76 MW, 6,744 MW, 6,739 MW, dan 6,74 MW. Total daya reaktifnya sebesar 4,197 MVAR, 4,196 MVAR, 4,21 MVAR, dan 4,25 MVAR. Total daya aktif dan daya reaktif yang dibangkitkan dapat dilihat pada Tabel IV.

TABLE IV
TOTAL DAYA YANG DIBANGKITKAN OLEH SISTEM SKENARIO 1, 2, 3, DAN 4 PADA BEBAN MAKSIMUM, RATA-RATA, DAN MINIMUM

Deskripsi	Skenario			
	1	2	3	4
Beban Maksimum				
Total Daya Aktif [MW]	13,13	12,96	12,89	12,87
Total Daya Reaktif [MVAR]	8,21	8,18	8,25	8,38
Beban Rata-rata				
Total Daya Aktif [MW]	10,24	10,18	10,16	10,15
Total Daya Reaktif [MVAR]	6,38	6,37	6,48	6,50
Beban Minimum				
Total Daya Aktif [MW]	6,76	6,744	6,739	6,74
Total Daya Reaktif [MVAR]	4,197	4,196	4,21	4,25

Tabel IV menunjukkan bahwa skenario 4 merupakan pemodelan sistem yang terbaik diantara skenario

lainnya. Pada skenario 4 total daya aktif yang dibangkitkan paling kecil.

D. Analisis Rugi-rugi Daya Sistem

Hasil simulasi menunjukkan bahwa rugi-rugi daya aktif tertinggi pada keadaan sistem beban maksimum, rata-rata, dan minimum skenario 1, 2, 3, dan 4 terjadi di saluran *line* 1. Rugi-rugi daya aktif di *line* 1 skenario 1, 2, 3, dan 4 keadaan sistem beban maksimum masing sebesar 0,24 MW, 0,12 MW, 0,07 MW, dan 0,05 MW. Pada keadaan beban rata-rata sebesar 0,09 MW, 0,05 MW, 0,03 MW, dan 0,02 MW. Pada beban minimum sebesar 0,02 MW, 0,0085 MW, 0,0047 MW, 0,0034 MW.

Rugi-rugi daya reaktif terbesar pada sistem beban maksimum skenario 1 dan 2 terjadi di *line* 1 sebesar 0,18 MVAR dan 0,09 MVAR, skenario 3 di trafo *pv* sistem, dan skenario 4 terjadi di trafo WTG sebesar 0,22 MVAR. Rugi-rugi daya reaktif terbesar pada sistem keadaan beban rata-rata skenario 1 dan 2 terjadi di *line* 1 sebesar 0,07 MVAR dan 0,035 MVAR, skenario 3 dan 4 terjadi di trafo *pv* sistem sebesar 0,02 MVAR dan 0,014 MVAR.

Pada sistem beban minimum skenario 1 rugi-rugi daya reaktif di *line* 1 tertinggi yaitu sebesar 0,013 MVAR, skenario 2 tertinggi di trafo penyulang sebesar 0,0066 MVAR, skenario 3 dan 4 terjadi di trafo *pv* sistem sebesar 0,023 MVAR dan 0,065 MVAR.

Total rugi-rugi daya aktif dan reaktif sistem keadaan beban maksimum, rata-rata, dan minimum pada masing-masing skenario ditunjukkan pada Tabel V sebagai berikut.

Deskripsi	Skenario			
	1	2	3	4
Beban Maksimum				
Total Rugi Daya Aktif [MW]	0,40	0,23	0,16	0,15
Total Rugi Daya Reaktif [MVAR]	0,33	0,297	0,37	0,49
Beban Rata-rata				
Total Rugi Daya Aktif [MW]	0,15	0,089	0,068	0,061
Total Rugi Daya Reaktif [MVAR]	0,13	0,12	0,23	0,247
Beban Minimum				
Total Rugi Daya Aktif [MW]	0,0285	0,017	0,012	0,013
Total Rugi Daya Reaktif [MVAR]	0,0284	0,027	0,04	0,079

Tabel V menunjukkan bahwa pada beban maksimum dan rata-rata rugi-rugi daya aktif terendah terjadi pada skenario 4 dengan nilai prosentase sebesar 1,15% dan 0,6% dari total daya aktif yang dibangkitkan sistem skenario 4. Sedangkan pada beban minimum rugi-rugi daya aktif terendah terjadi pada skenario 3 dengan nilai prosentase sebesar 0,18% dari total daya aktif yang dibangkitkan sistem skenario 3.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai analisis injeksi pembangkit *hybrid* tenaga surya-angin pada sistem GI Sengkaling penyulang Pujon, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. potensi enegi matahari untuk pembangkit surya

sebesar 0,22 kW/m² setiap jamnya. Sedangkan potensi kecepatan angin di lokasi penelitian sebesar rata-rata 2,9 m/s pada pengukuran 10 meter di atas permukaan tanah yang datar dan halus.

2. Sistem eksisting (skenario 1) pada pembebanan maksimum, *drop* tegangan yang terjadi belum memenuhi syarat aturan jaringan yang berlaku.
3. Injeksi pembangkit *hybrid* tenaga surya-angin dapat memperbaiki *drop* tegangan sistem. Perbaikan *drop* tegangannya hingga sebesar 5,15% dari tegangan nominal yang terjadi pada sistem skenario 4 keadaan beban maksimum.
4. Total rugi-rugi daya aktif pada sistem skenario 1 kondisi beban maksimum adalah 3,07%. Sedangkan pada skenario 2, 3, dan 4 Rugi-rugi daya aktif masing-masing sebesar 1,78%, 1,26% dan 1,15%.
5. Sistem skenario 4 pada sistem beban maksimum, rata-rata, dan minimum dapat memperbaiki profile tegangan dan ruggi-rugi daya aktif. Sedangkan untuk pembebanan pada sistem *pv* sistem dan WTG terbaik adalah masing sebesar 78 % dan 22% dari beban maksimum.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Undang-undang No. 30 Tahun 2007 Tentang *Energi Pasal 20 Ayat 1(d)*, <http://jdih.esdm.go.id/peraturan/uu-30-2007.pdf>.
- [2] Indonesia Energy Outlook (IEO) 2010. www.esdm.go.id/publikasi/indonesia-energy-outlook/cat_view/58-publikasi/332-indonesia-energy-outlook/339-ringkasan-eksekutif.html.
- [3] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lu Lin, Fang Zhaohong. 2008. *Optimal Sizing Method for Stand-Alone Hybrid Solar-Wind System With LPSP Technology by Using Genetic Algorithm*, ELSEVIER, Journal Solar Energy 82, 354-367.
- [4] Hadi Suyono and Muammar Zainuddin, *Injection Impact of Photovoltaic Distributed Generations (PVDG) on Power Distribution System Stability*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications ©(2015), Switzerland, ISSN: 1662-7482, Vol. 758 (2015), pp 403-408 doi:10.4028.www.scientific.net/AMM.785.403.
- [5] Patel Mukend R. 2006. *Wind and Solar Power System Design, Analysis, and Operation, Second Edition*, U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, CRC Press LLC.
- [6] K. H. Chao, C. J. Li, and S. H. Ho. 2008. *Modeling and Fault Simulation of Photovoltaic Generation Systems Using Circuit-Based Model*. IEEE ICSET in Proc. pp. 290-294
- [7] Liu Xiong, P. Wang, and P.C. Loh. 2011. *A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Cordination Control*, IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 2, No. 2.
- [8] Zhou Wei. 2007. *Simulation and Optimum Design of Hybrid Solar-Wind and Solar-Wind-Diesel Pwer Generation System*, The Hong Kong Polytechnic University Departement of Building and Sevice Engineering, A Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy. <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/2124/2/b21900486.pdf>.
- [9] Milano, F.; Vanfretti, L.; Morataya, J.C., *An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case and Experience*, IEEE Transactions on Education, Year: 2008, Volume: 51, Issue: 1, Pages: 17 - 23, DOI: 10.1109/TE.2007.893354
- [10] Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. No. 03 tahun 2007. <http://jdih.esdm.go.id/peraturan/permen-esdm-03-2007.pdf>