

# Analisis Pengaruh Integrasi *Renewable Energy* terhadap Profil Tegangan dan Rugi Daya Sistem Tenaga Listrik Menggunakan *PowerWorld Simulator*

Agung Budi Muljono, I Made Ginarsa, Muhammad Rivaldi Harjian\*

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat

\*Koresponden email: rivaldi.harjian97@staff.unram.ac.id

Diterima: 27 Februari 2026

Disetujui: 3 Maret 2026

## Abstract

Renewable Energy (RE) integration in the electric power system has an impact on the network operating characteristics, especially on the voltage profile and power losses. Although RE can improve system efficiency through local power supply, uncontrolled integration can cause voltage and frequency instability. The placement of Renewable Energy (RE) at certain points in the network can modify the pattern and direction of power flow in the transmission line. This study aims to analyze the effect of RE integration on the voltage profile and power losses of the electric power system using the PowerWorld Simulator. The system is modeled based on the IEEE 6-Bus standard test system with the Newton–Raphson power flow method. Simulations are carried out at several levels of RE penetration, namely 10%, 20%, 30%, and 40% of the total system load. The parameters analyzed include the voltage of each bus and the total active and reactive power losses. The simulation results show that RE integration increases the minimum voltage of Bus 5 from 0.9595 pu to 1.0017 pu (PV mode) and 0.9838 pu (PQ mode) at 120 MW penetration. Active power losses decreased from 13.42 MW to 3.07 MW (PV) and 3.81 MW (PQ), or reduced by 77.12% and 71.61%, respectively. However, high penetration caused the voltage to approach the nominal limit, necessitating reactive power control. Quantitatively, RE integration significantly improved the efficiency and stability margin of the system.

**Keywords:** *power world, power loss, power flow, renewable energy, voltage profile*

## Abstrak

Integrasi *Renewable Energy* (RE) pada sistem tenaga listrik memberikan dampak terhadap karakteristik operasi jaringan, khususnya pada profil tegangan dan rugi daya. Meskipun RE mampu meningkatkan efisiensi sistem melalui suplai daya lokal, integrasi yang tidak terkontrol dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan, frekuensi. Penempatan RE pada titik tertentu dalam jaringan dapat memodifikasi pola dan arah aliran daya pada saluran transmisi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh integrasi RE terhadap profil tegangan dan rugi daya sistem tenaga listrik menggunakan PowerWorld Simulator. Sistem dimodelkan berdasarkan sistem uji standar IEEE 6-Bus dengan metode aliran daya Newton–Raphson. Simulasi dilakukan pada beberapa tingkat penetrasi RE yaitu 10%, 20%, 30%, dan 40% dari total beban sistem. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan tiap bus serta total rugi daya aktif dan reaktif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi RE meningkatkan tegangan minimum Bus 5 dari 0,9595 pu menjadi 1,0017 pu (mode PV) dan 0,9838 pu (mode PQ) pada penetrasi 120 MW. Rugi daya aktif menurun dari 13,42 MW menjadi 3,07 MW (PV) dan 3,81 MW (PQ), atau berkurang hingga 77,12% dan 71,61%. Namun, penetrasi tinggi menyebabkan tegangan mendekati batas nominal, sehingga diperlukan pengendalian daya reaktif. Secara kuantitatif, integrasi RE meningkatkan efisiensi dan margin kestabilan sistem secara signifikan.

**Kata Kunci:** *aliran daya, powerworld, energi terbarukan, profil tegangan, rugi daya*

## 1. Pendahuluan

Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem tenaga listrik menjadi solusi terhadap kebutuhan energi berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon [1][2][3]. Integrasi *Renewable Energy* (RE), khususnya berbasis inverter seperti *photovoltaic* (PV), dapat memengaruhi distribusi aliran daya, profil tegangan, serta rugi daya pada jaringan [4][5]. Meskipun RE mampu meningkatkan efisiensi sistem melalui suplai daya lokal, integrasi yang tidak terkontrol dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan, frekuensi [6][7], kualitas daya [8] dan perubahan pola aliran daya [9][10]. Oleh karena itu, diperlukan analisis berbasis simulasi untuk mengevaluasi dampak teknis integrasi RE terhadap kinerja sistem tenaga listrik. Di

sisi lain, perubahan variasi beban merupakan kondisi yang tidak terelakkan dalam operasi sistem tenaga listrik. Variasi beban mempengaruhi aliran daya aktif dan reaktif, serta keseimbangan tegangan pada setiap bus [11].

Penempatan *Renewable Energy* (RE) pada titik tertentu dalam jaringan dapat memodifikasi pola dan arah aliran daya pada saluran transmisi. Dalam kondisi ketika daya yang dibangkitkan pada bus yang sama dengan RE melebihi kebutuhan beban di area tersebut, aliran daya berpotensi berubah menjadi dua arah (*bidirectional power flow*) [12]. Fenomena ini dapat memicu kenaikan tegangan (*overvoltage*) pada sisi bagian ujung saluran maupun sebaliknya menyebabkan deviasi tegangan pada bus lain akibat perubahan distribusi daya reaktif dalam sistem [13].

Oleh karena itu, diperlukan kajian teknis untuk memastikan tingkat integrasi RE tetap berada dalam batas operasi yang diperbolehkan serta memenuhi standar kualitas tegangan. Pada model bus PV, RE beroperasi dengan daya aktif tertentu dan pengaturan tegangan pada nilai yang sudah ditentukan, sehingga daya reaktif akan menyesuaikan secara otomatis untuk mempertahankan kestabilan tegangan bus. Sebaliknya, pada model bus PQ, RE dioperasikan dengan daya aktif dan daya reaktif tetap, tanpa kemampuan regulasi tegangan secara langsung [14]. Untuk menganalisis fenomena tersebut secara kuantitatif, studi aliran daya (*power flow analysis*) menjadi pendekatan utama karena mampu merepresentasikan hubungan nonlinier antara daya, tegangan, sudut fasa, dan parameter jaringan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi penetrasi RE terhadap profil tegangan dan rugi daya menggunakan *PowerWorld Simulator* metode *Newton-Raphson*. Kualitas tegangan dan efisiensi dalam mendistribusikan daya adalah faktor penting untuk mengevaluasi performa sistem tenaga listrik. Masalah penurunan tegangan dan meningkatnya kerugian daya sering kali muncul akibat distribusi beban yang tidak seimbang serta jarak dalam menyalurkan daya yang terlalu jauh. Melalui simulasi aliran daya, dapat dievaluasi perubahan profil tegangan, distribusi daya aktif dan reaktif, serta rugi daya sistem akibat integrasi RE dan variasi beban.

### 1.1 Persamaan Aliran Daya [15]

Daya kompleks pada bus ke- $i$ :

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (1)$$

Dengan arus bus:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2)$$

Sehingga persamaan daya aktif dan reaktif menjadi

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (4)$$

dengan :

$G_{ij}$  dan  $B_{ij}$  adalah elemen matrik admitansi bus ( $Y_{bus}$ )

$$\theta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

$|V_i|$  = magnitude tegangan bus ke- $i$

$\delta_i$  = sudut tegangan bus ke- $i$

Perhitungan aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson* dilakukan dengan membandingkan antara daya yang ditentukan berdasarkan data ( $P_{k, spec}$  dan  $Q_{k, spec}$ ) dengan daya yang diperoleh hasil perhitungan ( $P_{k, calc}$  dan  $Q_{k, calc}$ ) menggunakan persamaan daya. Selisih daya yang ditentukan dan perhitungan ( $\Delta P_k$  dan  $\Delta Q_k$ ) dihitung dengan persamaan (5) dan (6):

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - P_i^{cal} \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - Q_i^{cal} \quad (6)$$

Dalam bentuk matriks persamaan *Newton-Raphson* (7):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta S = J \Delta x$$

dengan :

J = matriks Jacobian

$\Delta x$  = koreksi variabel ( $\Delta \delta, \Delta |V|$ )

### 1.2 Persamaan Pengaturan Tegangan (*Voltage Regulation*)

Pengaturan tegangan pada suatu bus atau sisi beban dinyatakan dalam persamaan (8):

$$VR(\%) = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (8)$$

dalam sistem per unit persamaan (9) :

$$\Delta V(\%) = \frac{V_{ref} - V_i}{V_i} \times 100\% \quad (9)$$

dengan :

$V_s$  = tegangan kirim

$V_r$  = tegangan terima

$V_{ref}$  = tegangan nominal (1,0 pu)

$V_i$  = tegangan pada bus ke-i

### 1.3 Persamaan Rugi Daya Aktif (*Power Loss*) dan Daya Reaktif

Rugi daya aktif pada saluran transmisi :

$$P_{loss} = I^2 R \quad \text{dan} \quad Q_{loss} = I^2 X \quad (10)$$

Dalam bentuk aliran daya dinyatakan dalam persamaan (11) dan (12):

$$P_{loss,ij} = G_{ij}(|V_i|^2 + |V_j|^2 - 2|V_i||V_j| \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

$$Q_{loss,ij} = -B_{ij}(|V_i|^2 + |V_j|^2 - 2|V_i||V_j| \cos \theta_{ij}) \quad (12)$$

Total rugi daya sistem sesuai persamaan (13) dan (14) sebagai berikut :

$$P_{loss} = \sum P_{gen} - \sum P_{load} \quad (13)$$

$$Q_{loss} = \sum Q_{gen} - \sum Q_{load} \quad (14)$$

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi dengan metode analisis aliran daya (*power flow analysis*). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menilai bagaimana variasi dalam penerapan Energi Terbarukan (RE) khususnya PLTB dan PLTS, terhadap profil tegangan dan rugi daya sistem tenaga listrik pada kondisi tunak (*steady state*). Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PowerWorld Simulator, yang berupa analisis aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson. Pendekatan ini dipilih karena analisis aliran daya merupakan teknik yang umum diterapkan dalam evaluasi kondisi operasional sistem kelistrikan pada tahap stabil, terutama dalam memahami distribusi tegangan, arus daya aktif dan reaktif, serta rugi-rugi daya sistem.

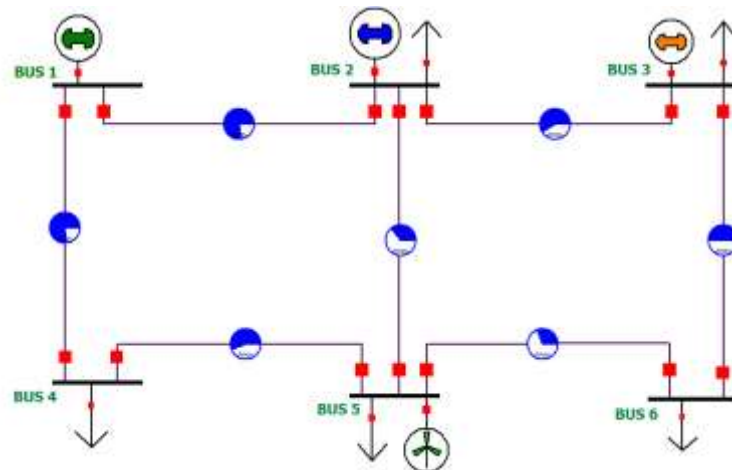
### 2.1 Model Sistem Tenaga Listrik

Dalam penelitian ini, sistem tenaga listrik terdiri dari 6 bus, unit pembangkit yang konvensional, beban, dan saluran transmisi yang semuanya dimodelkan menggunakan satuan per-unit (pu) dengan daya tertentu. Setiap bus dikelompokkan sebagai slack bus, PV bus, atau PQ bus berdasarkan karakteristik operasionalnya, sebagaimana pada **Gambar 1**.

Integrasi *Renewable Energy* (RE) dalam penelitian ini dimodelkan sebagai pembangkit terdistribusi yang terhubung pada bus tertentu dalam sistem. RE direpresentasikan sebagai generator dengan dua pendekatan pemodelan, PV Bus, sebagai pembangkit tenaga angin menggunakan *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) di mana daya aktif ditentukan dan tegangan bus dikontrol pada nilai tertentu dengan batas daya reaktif minimum dan maksimum. Model PQ Bus sebagai PLTS dengan daya aktif sesuai kapasitas dan daya reaktif ditentukan untuk faktor daya *unity*, sedangkan tegangan dihitung sebagai hasil solusi aliran daya sebagai hasil solusi aliran daya.

Sistem tenaga listrik yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 6 bus, 3 unit pembangkit, dan 7 saluran transmisi. Data parameter sistem meliputi data bus, data pembangkit sebagaimana **Tabel 1** dan

parameter impedansi saluran pada **Tabel 2** yang dimodelkan dalam satuan per-unit (pu) pada basis 100 MVA, tegangan 150 kV



**Gambar 1.** Model Sistem Tenaga Listrik

**Tabel 1.** Data Variabel Bus

Bus	Type	V (pu)	Sudut (°)	P <sub>L</sub> (MW)	Q <sub>L</sub> (MVar)	P <sub>G</sub> (MW)
1	Slack	1,02	0	-	-	-
2	PV	1,00	-	20	10	40
3	PV	1,00	-	45	15	30
4	PQ	-	-	80	44	-
5	PQ	-	-	95	45	-
6	PQ	-	-	80	30	-

**Tabel 2.** Data parameter saluran transmisi

Dari	Ke	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)
1	2	0,035	0,060	0,040
2	3	0,025	0,050	0,025
1	4	0,025	0,040	0,030
2	5	0,040	0,060	0,040
4	5	0,035	0,060	0,040
5	6	0,020	0,045	0,030

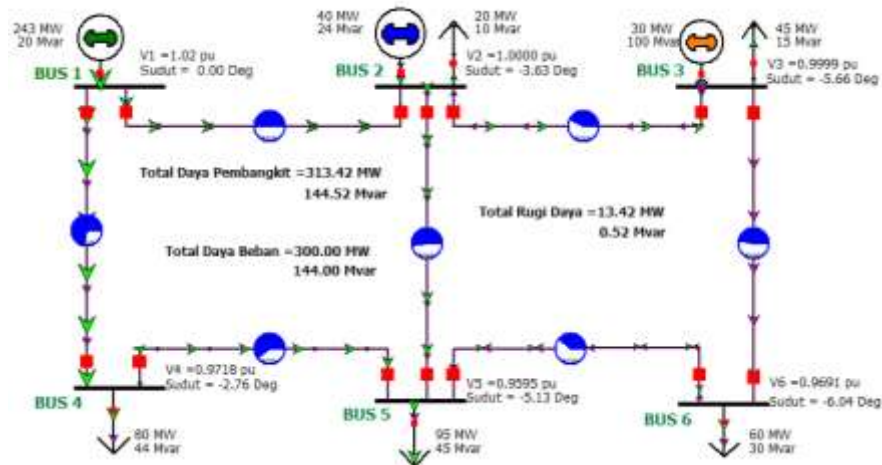
## 2.2 Variasi Integrasi Renewable Energy (RE)

Integrasi kapasitas dan RE yang divariasikan dalam simulasi untuk mengamati pengaruhnya terhadap sistem. Penetrasi RE dinyatakan sebagai persentase terhadap total beban sistem. Variasi skenario yang digunakan adalah 10%, 20%, 30% dan 40% dari beban total sistem yaitu 30 MW, 60 MW, 60 MW, dan 120 MW. Pembangkit RE ditempatkan pada bus beban untuk mengevaluasi pengaruh lokasi terhadap distribusi aliran daya dan profil tegangan. Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan pemasangan RE pada Bus dengan tegangan terendah menggunakan tipe bus PV (PLTB) dan bus PQ (PLTS). Kapasitas PLTB (PV bus) dan PLTS (PQ bus) disesuaikan proporsional terhadap total penetrasi pembangkit terbarukan. Simulasi analisis aliran daya terikat merupakan parameter yang dianalisis sebagai akibat dari variasi integrasi RE, meliputi Profil Tegangan (pu), Rugi Daya Aktif (MW) dan Rugi Daya Reaktif (MVar) akibat integrasi RE.

## 3. Hasil Dan Pembahasan

### 3.1 Simulasi Skenario Sistem Tanpa RE

Model sistem tenaga listrik yang digunakan dalam penelitian ini direpresentasikan dalam diagram satu garis sebagaimana Gambar 1 dan data variabel serta parameter sistem pada **Tabel 1** dan **2** dilakukan simulasi menggunakan PowerWorld Simulator. Simulasi aliran daya (*power flow analysis*) melalui Simulator ini menggunakan metode Newton Raphson untuk mengetahui tegangan setiap bus dan aliran daya pada saluran transmisi serta rugi-rugi daya sistem. Simulasi awal model sistem terdiri dari 6 bus dengan konfigurasi tanpa pembangkit RE, secara visual dapat dilihat pada **Gambar 2** sebagai berikut:



Gambar 2. Aliran daya model sistem tenaga listrik tanpa RE

Berdasarkan hasil simulasi awal (tanpa *Renewable Energy/RE*), diperoleh bahwa Bus 5 memiliki tegangan terendah sebesar 0,9595 pu mengalami penurunan sebesar 4,95 %, sehingga ditetapkan sebagai lokasi integrasi RE pada seluruh skenario. Total beban sistem yang dilayani oleh sistem sebesar 300 MW, diperlukan daya yang dibangkitkan dari generator sebesar 313,42 MW, sehingga terjadi rugi-rugi daya aktif sebesar 13,42 MW atau sebesar 4,281 %, sudah berada pada batas nilai yang diijinkan 5 %, sesuai SPLN No. 72 Tahun 1987.

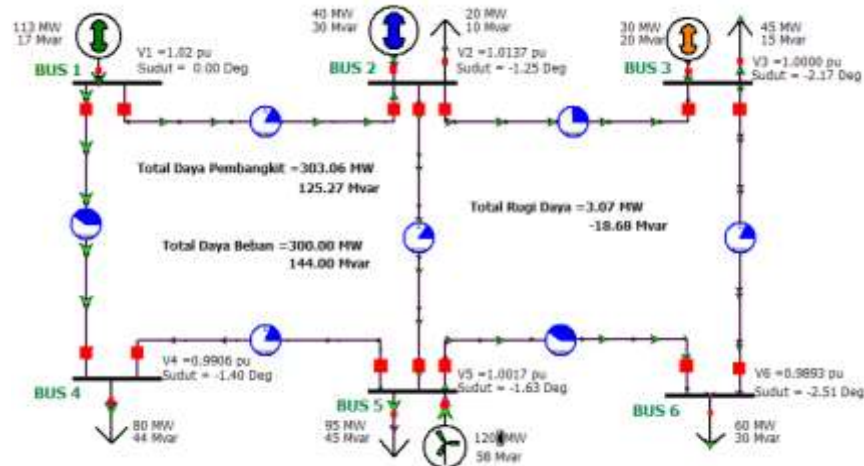
Berdasarkan hasil simulasi awal (tanpa RE), sistem menunjukkan bahwa meskipun nilai rugi-rugi daya aktif sebesar 13,42 MW (4,281%) masih berada dalam batas toleransi 5% sesuai SPLN No. 72 Tahun 1987, profil tegangan pada Bus 5 yang mencapai 0,9595 pu mengindikasikan adanya kecenderungan undervoltage mendekati batas bawah standar operasi (0,95 pu). Penurunan tegangan sebesar 4,95% dari kondisi nominal ini menunjukkan bahwa sistem bekerja pada margin kestabilan tegangan yang relatif terbatas, khususnya pada bus terjauh dari sumber pembangkitan utama.

Upaya untuk perbaikan unjuk kerja sistem dilakukan dengan mengintegrasikan Energi Terbarukan (RE) pada bus dengan tegangan terendah yaitu Bus 5. Dua mode operasi RE disimulasikan untuk memperbaiki profil tegangan, mengurangi arus saluran, dan meningkatkan dukungan untuk daya reaktif secara lokal.

### 3.2 Simulasi Skenario Sistem Integrasi Dengan RE Mode PV Bus (PLTB)

Mode PV Bus (PLTB), di mana RE beroperasi dengan pengaturan tegangan konstan dan daya aktif tertentu, serta daya reaktif menyesuaikan untuk menjaga setpoint tegangan. Mode ini secara teoritis mampu memberikan dukungan regulasi tegangan yang lebih baik. Variasi RE jenis PLTB yang dianalisis adalah 30 MW, 60 MW, 90 MW, dan 120 MW diintegrasikan pada Bus 5. PLTB dimodelkan sebagai PV bus karena pembangkit angin modern menggunakan inverter atau sistem kontrol yang mampu mengatur tegangan pada titik interkoneksi. Karakteristik pemodelan PV Bus (PLTB): daya aktif (P) ditentukan sesuai kapasitas penetrasi, tegangan (V) dikontrol pada nilai referensi 1,00 pu dan daya reaktif (Q) dihitung oleh simulator dengan batas  $Q_{min}$  dan  $Q_{max}$ . Pendekatan ini memungkinkan PLTB berkontribusi dalam pengendalian tegangan sistem.

Simulasi aliran daya pada mode RE dengan PV bus yang ditempatkan pada bus tegangan kritis sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Hasil simulasi dengan nilai variasi RE memberikan nilai unjuk kerja sistem berdasarkan profil tegangan dianalisis berdasarkan nilai tegangan maksimum dan minimum. Pengaturan terhadap tegangan nominal ( $\pm 5\%$ ) seperti pada Tabel 3 dan total rugi daya aktif dihitung dari seluruh saluran transmisi berdasarkan hasil simulasi aliran daya seperti pada Tabel 4.



Gambar 3. Aliran daya model sistem tenaga listrik pada dengan RE mode PV bus

Tabel 3. Profil tegangan setiap bus sebelum dan setelah integrasi RE jenis PV bus (pu)

Bus	Tanpa RE	30 MW	60 MW	90 MW	120 MW
1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0137
3	0,9999	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,9718	0,9852	0,9878	0,9895	0,9906
5	0,9595	0,9918	0,9969	1,00	1,0017
6	0,9691	0,9844	0,9871	0,9885	0,9893

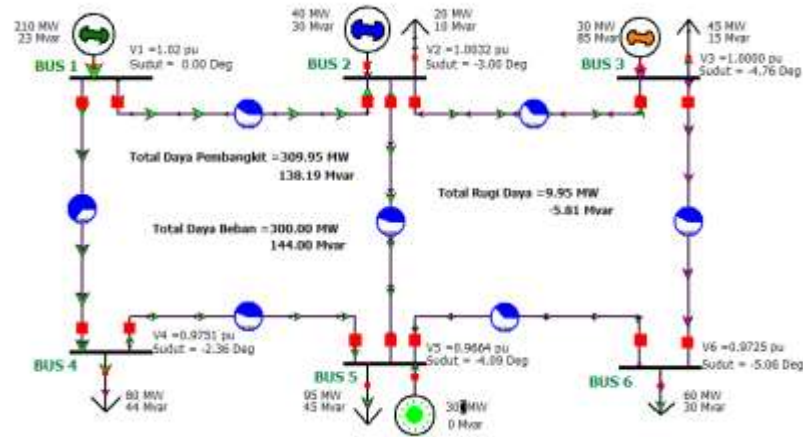
Tabel 4. Total rugi daya hasil simulasi aliran daya setelah integrasi RE jenis PV bus

Skenario	$P_g$ (MW)	$Q_g$ (MVar)	$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVar)
Tanpa RE	313,42	144,52	13,42	1,27
30 MW	309,28	136,47	9,28	-7,53
60 MW	306,64	131,73	6,66	-12,20
90 MW	304,65	128,24	4,65	-15,76
120 MW	303,06	125,27	3,07	-18,68

### 3.3 Simulasi Skenario Sistem Integrasi Dengan RE Mode PQ Bus (PLTS)

Mode RE PLTS dimodelkan sebagai PQ bus, dalam hal ini daya aktif dan daya reaktif ditentukan, sedangkan tegangan dihitung sebagai hasil solusi aliran daya, dalam skenario ini diintegrasikan pada sistem. Karakteristik pemodelan mode ini adalah daya aktif (P) sesuai kapasitas integrasi RE, daya reaktif (Q) ditentukan pada  $Q = 0$  Var untuk *unity power factor*, tegangan (V) dihitung oleh sistem. Pendekatan ini merepresentasikan PLTS yang beroperasi tanpa kontrol tegangan aktif (*fixed power injection*), sehingga dampaknya terhadap profil tegangan dapat diamati secara langsung.

Sebagaimana skenario sebelumnya integrasi PQ bus ditempatkan pada bus 5 yaitu bus pada tegangan kritis, dengan variasi 10%, 20%, 30% dan 40% dari total beban sistem, memberikan hasil aliran daya seperti pada Gambar 4. Nilai performansi profil tegangan serta rugi-rugi daya sistem diberikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.



Gambar 4. Aliran daya model sistem tenaga listrik pada dengan RE mode PQ bus

Tabel 5. Profil tegangan setiap bus sebelum dan setelah integrasi RE jenis PQ bus (pu)

Bus	Tanpa RE	30 MW	60 MW	90 MW	120 MW
1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
2	1,0032	1,0032	1,0050	1,0067	1,0082
3	0,9999	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,9718	0,9751	0,9780	0,9807	0,9833
5	0,9595	0,9664	0,9724	0,9782	0,9838
6	0,9691	0,9725	0,9752	0,9781	0,9808

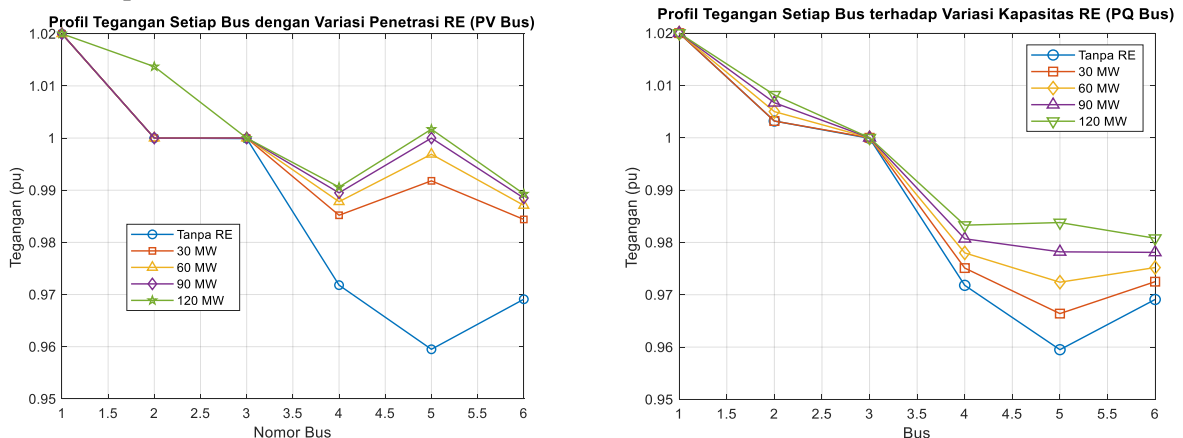
Tabel 6. Total rugi daya hasil simulasi aliran daya setelah integrasi RE jenis PV bus

Skenario	P <sub>g</sub> (MW)	Q <sub>g</sub> (MVar)	P <sub>loss</sub> (MW)	Q <sub>loss</sub> (MVar)
Tanpa RE	313,42	144,52	13,42	1,27
30 MW	309,93	138,13	9,95	-5,81
60 MW	307,21	133,18	7,23	-10,76
90 MW	305,18	128,46	5,19	-14,48
120 MW	303,80	126,91	3,81	-17,03

### 3.4 Analisis Perbandingan Profil Tegangan Mode PV Bus dan PQ Bus

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 3 (mode PV) dan Tabel 5 (mode PQ), terlihat adanya perbedaan karakteristik peningkatan tegangan pada setiap variasi penetrasi daya. Kedua scenario memberikan hasil perbaikan tegangan pada bus kritis (Bus 5) merupakan bus dengan tegangan terendah pada kondisi awal, yaitu 0,9595 pu.

Mode PV Bus, menunjukkan profil tegangan meningkat signifikan menjadi 0,9918 pu (30 MW) dan mencapai 1,0017 pu (120 MW). Kenaikan total sebesar 0,0422 pu (~4,40%). Tegangan berhasil dipulihkan hingga mendekati bahkan sedikit melebihi 1,00 pu. Mode PQ Bus: tegangan meningkat menjadi 0,9664 pu (30 MW) dan 0,9838 pu (120 MW). Kenaikan total sebesar 0,0243 pu (~2,53%). Nilai tegangan belum mencapai 1,00 pu pada penetrasi maksimum, dengan perbandingan profil tegangan seperti pada karakteristik pada Gambar 5.



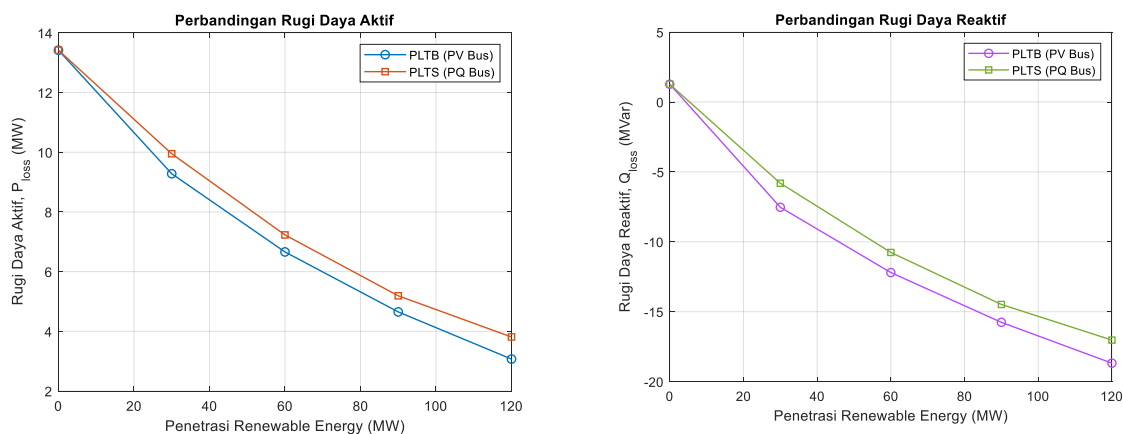
Gambar 5. Grafik perbandingan profil tegangan untuk integrasi PLTB (PV Bus) dan PLTS (PQ Bus)

Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi RE dapat meningkatkan tegangan pada bus beban. Dalam kondisi awal, nilai tegangan terkecil yang terukur adalah 0,958 pu. Pada tingkat integrasi RE 30%, terjadi kenaikan tegangan yang hampir mencapai 1 pu. Namun, ketika tingkat integrasi mencapai 40%, terdapat kemungkinan tegangan meningkat hampir mendekati batas atas dari standar operasional (1,05 pu), yang menunjukkan potensi terjadinya *overvoltage*. Mode PV menghasilkan kenaikan tegangan hampir dua kali lipat dibandingkan mode PQ pada bus yang kritis, yang menunjukkan bahwa kontrol daya reaktif sangat efektif dalam mempertahankan tingkat tegangan. Mode PV menampilkan distribusi tegangan yang lebih rata dan lebih mendekati kondisi ideal (1 pu), sedangkan mode PQ hanya memberikan peningkatan yang relatif terbatas. Mengacu SPLN No. 72 Tahun 1987 standar operasional dalam sistem listrik berkisar antara 0,95 hingga 1,05 pu, dan kedua skenario tersebut tetap dalam batas yang diperbolehkan. Namun, mode PV memberikan margin kestabilan tegangan yang lebih besar karena tegangan minimum sistem meningkat lebih signifikan.

### 3.5 Analisis Perbandingan Rugi Daya Sistem

Evaluasi dilakukan terhadap rugi daya aktif ( $P_{\text{loss}}$ ) dan rugi daya reaktif ( $Q_{\text{loss}}$ ) pada setiap variasi penetrasi RE. Pada kondisi awal (tanpa RE), rugi daya aktif sistem sebesar:  $P_{\text{loss}} = 13,42$  MW (4,281%) Integrasi RE menurunkan rugi daya aktif secara signifikan baik mode PV maupun PQ bus sampai pada injeksi RE pada 120 MW, memberikan rugi daya aktif mode PV: 3,07 MW dan mode PQ: 3,81 MW.

Rugi daya reaktif  $Q_{\text{loss}} = 1,27$  MVar, setelah integrasi RE, nilai  $Q_{\text{loss}}$  menjadi negatif pada kedua skenario, yang menunjukkan adanya suplai daya reaktif dari lokasi integrasi RE. Nilai rugi daya aktif ( $P_{\text{loss}}$ ) dan rugi daya reaktif ( $Q_{\text{loss}}$ ) integrasi PLTB (PV Bus) dan PLTS (PQ Bus) seperti grafik pada **Gambar 6**.



**Gambar 6.** Grafik perbandingan rugi daya untuk integrasi PLTB (PV Bus) dan PLTS (PQ Bus)

Mengacu dari **Gambar 6**, pada skenario integrasi RE mode PV, rugi daya aktif menurun secara nyata seiring peningkatan daya. Pada pemasukan daya 30 MW, rugi daya aktif turun menjadi 9,28 MW, dan terus menurun hingga 3,07 MW pada penambahan kapasitas daya RE 120 MW. Penurunan ini menunjukkan reduksi sebesar 77,12% dibandingkan kondisi awal. Sementara itu, pada skenario mode PQ, penurunan rugi daya aktif juga terjadi namun dengan nilai yang lebih besar dibanding mode PV pada setiap tingkat penetrasi. Pada penetrasi 120 MW, rugi daya aktif tercatat sebesar 3,81 MW atau mengalami penurunan sebesar 71,61% dari kondisi awal.

Dari sisi rugi daya reaktif, kedua skenario menunjukkan perubahan nilai menjadi negatif setelah integrasi RE, yang mengindikasikan adanya suplai daya reaktif ke sistem. Namun, mode PV menghasilkan kompensasi daya reaktif yang lebih besar dibanding mode PQ pada seluruh variasi penetrasi, sehingga memberikan kontribusi yang lebih signifikan terhadap peningkatan efisiensi dan stabilitas sistem.

### 4. Kesimpulan

Sistem tenaga listrik standar 6 bus yang direpresentasikan dalam single line diagram dan dianalisis menggunakan simulasi aliran daya menunjukkan bahwa pada kondisi awal tanpa integrasi *Renewable Energy (RE)*, tegangan minimum sistem berada pada Bus 5 sebesar 0,9595 pu dengan rugi daya aktif sebesar 13,42 MW (4,281%). Nilai tersebut masih memenuhi batas SPLN No. 72 Tahun 1987, namun menunjukkan margin kestabilan tegangan yang relatif terbatas. Integrasi RE pada Bus 5 sebagai bus kritis terbukti meningkatkan unjuk kerja sistem secara kuantitatif. Peningkatan penetrasi daya menghasilkan perbaikan profil tegangan dan penurunan rugi daya aktif secara nyata didapatkan pada kedua skenario.

Mode PV menunjukkan kinerja lebih optimal dibanding mode PQ. Pada penetrasi 120 MW, tegangan Bus 5 pada mode PV mencapai 1,0017 pu, sedangkan pada mode PQ sebesar 0,9838 pu. Dari sisi rugi daya aktif, mode PV menurunkan rugi daya hingga 3,07 MW, lebih rendah dibanding mode PQ sebesar 3,81 MW, atau berkurang hingga 77,12% dan 71,61%. Secara teknis, mode PV lebih unggul karena kemampuan regulasi daya reaktif yang menekan arus saluran dan rugi I<sup>2</sup>R, sehingga meningkatkan efisiensi dan margin kestabilan sistem dibanding mode PQ.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] F. M. Noor and A. F. Rahman, "Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 14, no. 1, pp. 526–532, 2023, doi: 10.35313/irwns.v14i1.5440.
- [2] K. Wibowo, "Kontribusi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan dalam Mengurangi Emisi Karbon," *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 5140–5153, 2024, doi: 10.31004/innovative.v4i6.16043.
- [3] Sinaga, Denny Haryanto, Riz Rifai Oktavianus Sasue, and Harvei Desmon Hutahaeen. "Pemanfaatan Energi Terbarukan Dengan Menerapkan Smart Grid Sebagai Jaringan Listrik Masa Depan: Pemanfaatan Energi Terbarukan Dengan Menerapkan Smart Grid Sebagai Jaringan Listrik Masa Depan." *Journal Zetroem* 3.1 (2021): 11-17.
- [4] Priyana, Fahrur Riza. *Analisa Dampak Pemasangan Static Var Compensator (Svc) Pada IPP PLTBG 2X1, 5MW PT. Gree Energy Hamparan Terhadap Sistem Distribusi 20kV Penyulang Rambutan*. Diss. Universitas Lampung, 2022.
- [5] S. J. Yeboah, S. Nunoo, J. C. Attachie, W. D. Asihene, and E. Y. Asuamah, "Impact and integration techniques of renewable energy sources on smart grid operations: A systematic review," *Sci. African*, vol. 29, 2025, doi: 10.1016/j.sciaf.2025.e02845.
- [6] Toding, Alfian Daniel, I. Made Wartana, and Awan Uji Krismanto. "Analisis Pengaruh Integrasi PV Terhadap Kestabilan Statis Tegangan Pada Sistem Kelistrikan Lombokudul Sesuai Kebutuhan." *Magnetika: Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro* 8.1 (2024): 184-199.
- [7] Davis, Vincentius, Abraham Lomi, and Irrine Budi Sulistiawati. "The Frequency Stability Analysis Due to the Integration of 100 MW Solar Power Plant in the 150 kV Power System: A Case Study on the Impact of Large-Scale Solar PV Penetration on Grid Frequency Stability." *SinarFe7* 7.1 (2025): 514-523.
- [8] M. I. Romadhon, "Kualitas Daya pada Microgrid Gangguan, Standar, dan Studi Kasus," *KONSULI Knowl. Sustain. Innov. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 18–38, 2025.
- [9] M. A. Zdiri, B. Dhouib, B. Khan, J. M. Guerrero, and H. H. Abdallah, "Impact assessment of photovoltaic and wind energy integration on low voltage distribution networks in Tunisia," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–24, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-93488-2.
- [10] M. Fikri, F. Riza Priyana, R. Akbar Setiawan, M. Nur Khawarizmi, and J. Teknik Elektro, "Dampak Pemasangan PLTS pada Sistem Distribusi terhadap Kualitas Tegangan dan Rugi-rugi Daya," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, pp. 2830–7062, 2025, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v13i3S1.7574>
- [11] Mashudi, Mochamad Ifan, Awan Uji Krismanto, and Ni Putu Agustini. "Analisa Pengaruh Variasi Beban Terhadap Profil Tegangan Pada Feeder GI Polehan Distribusi 20 kV PLN Kota Malang." *SinarFe7* 3.1 (2020).
- [12] H. R. Brito *et al.*, "Impact of distributed generation on distribution systems with cascaded bidirectional step voltage regulators," *2018 13th IEEE Int. Conf. Ind. Appl. INDUSCON 2018 - Proc.*, pp. 1252–1258, 2018, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627230.
- [13] A. S. Akinyemi, K. Musasa, and I. E. Davidson, "Analysis of voltage rise phenomena in electrical power network with high concentration of renewable distributed generations," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–22, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11765-w.
- [14] Y. T. Tan, "Impact on the power system with a large generation of photovoltaic generation," *Electr. Eng. Electron.*, vol. PhD, no. February, pp. 1–8, 2004.
- [15] J. D. Glover, T. J. Overbye, A. B. Birchfield, and M. S. Sarma, *Power System Analysis & Design*, 7th ed. Cengage, 2023.