

Pengaruh Pembebanan RLC Terhadap Stabilitas Daya Semu dan Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Mas Ahmad Baihaqi^{**1}, Hartawan Abdillah², Winda Ayu Mundari³, Tamam Asrori⁴, Alief Muhammad⁵, Dani Hari Tunggal Prasetiyo⁶, Agung Fitrahadi⁷

^{1,2,3}Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, 67271, Indonesia

⁴Teknik Informatika, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, 67271, Indonesia

⁵Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, 67271, Indonesia

⁶Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, 68121, Indonesia

⁷Teknik Elektro dan Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, 65145, Indonesia

¹baihaqi@upm.ac.id, ²hartawanabdillah@upm.ac.id, ³windaayumundari123@gmail.com,

⁴tamam.ansori@upm.ac.id, ⁵aliefmuhammad@upm.ac.id, ⁶dani.hari59@gmail.com,

⁷agung.fitrahadi.2405349@student.um.ac.id

****Corresponding Author:** baihaqi@upm.ac.id



Cite: <https://doi.org/10.63440/jef.v2i1.104>



Read Online

ACCESS

Abstract: *This study aims to evaluate the impact of RLC loading on the power stability and power quality in Wind Power Plant (PLTB) systems. The RLC is applied to stabilize the power generated by the PLTB system, which tends to fluctuate due to wind speed variability. The testing was conducted by measuring the output power of the PLTB system loaded with various RLC configurations.*

The results show that RLC loading can enhance the apparent power stability and efficiency of the PLTB system. The resistive load (R) yielded the best performance, improving the power factor to 0.95 and maintaining relatively stable output voltage. Meanwhile, the LC loads exhibited lower efficiency with a reduced power factor, but still played a role in balancing reactive power. The reduction in reactive power for inductive and capacitive loads indicates that RLC loading can help reduce power waste and improve power quality. This research makes a significant contribution to the development of more efficient and stable PLTB systems and more reliable renewable energy-based power plants, particularly in managing power stability in the face of fluctuations caused by wind variability.

RECOMENDATION



Keyword: *Wind Power Plants, Renewable Energy, RLC, Power Stability, Apparent Power Stability*

Article Info

Recieved
January 03, 2025

Revised
March 07, 2025

Accepted
May 14, 2025

Published
June 29, 2025



1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu solusi penting untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang berkelanjutan di Indonesia. Potensi energi angin yang melimpah di berbagai daerah menjadikan PLTB sebagai pilihan strategis dalam mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang semakin menipis. Menurut beberapa penelitian, potensi energi angin yang dimiliki Indonesia sangat besar dan dapat dioptimalkan untuk memenuhi sebagian besar kebutuhan energi nasional [1], [2]. Namun, meskipun memiliki potensi besar, PLTB sering kali menghadapi tantangan terkait fluktuasi daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Variabilitas kecepatan angin menyebabkan ketidakstabilan dalam produksi energi, yang berdampak pada kualitas daya yang disuplai ke jaringan listrik [3], [4].

Fluktuasi daya pada sistem PLTB sering kali mengarah pada penurunan kualitas daya, seperti fluktuasi tegangan dan distorsi harmonika, yang dapat memengaruhi kinerja peralatan listrik yang terhubung ke jaringan [5]. Fluktuasi tersebut terjadi akibat ketidakstabilan dalam kecepatan angin yang dapat memengaruhi efisiensi energi yang dihasilkan. Oleh karena itu, stabilitas daya menjadi faktor kritis yang perlu dikelola dengan baik agar sistem PLTB dapat beroperasi dengan optimal [6], [7]. Untuk mengatasi masalah fluktuasi daya ini, pembebanan RLC (Resistor, Induktor, Kapasitor) merupakan salah satu solusi yang sering digunakan. Pembebanan RLC dapat membantu menyeimbangkan daya aktif dan daya reaktif, serta mengurangi fluktuasi tegangan dan harmonisa yang timbul akibat ketidakstabilan output daya PLTB [8], [9]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembebanan RLC tidak hanya mengurangi fluktuasi tegangan, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi energi sistem kelistrikan secara keseluruhan [10], [11].

Sementara itu, masih terdapat beberapa tantangan terkait penerapan pembebanan RLC pada sistem PLTB, termasuk pemilihan parameter RLC yang optimal untuk meningkatkan stabilitas daya dan kualitas daya. Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan eksperimen dengan menggunakan pembebanan RLC pada sistem pembangkit tenaga angin, tetapi masih ada keterbatasan dalam hal implementasi praktis dan evaluasi efisiensi daya dalam kondisi nyata [12], [13]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan RLC terhadap stabilitas daya semu dan kualitas daya pada sistem PLTB melalui pengujian daya keluaran yang dilakukan pada sistem pembangkit tenaga bayu yang sesungguhnya. Pengujian ini akan dilakukan dengan mengukur berbagai parameter penting, seperti tegangan output, arus, daya aktif, daya semu, dan faktor daya pada sistem PLTB yang dibebani dengan berbagai konfigurasi RLC. Selain itu, penelitian ini juga akan membahas bagaimana penggunaan pembebanan RLC dapat membantu dalam mengurangi pemborosan daya reaktif yang terjadi pada beban induktif dan kapasitif, yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan [14], [15].

Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem PLTB yang lebih efisien dan stabil, serta meningkatkan pemahaman tentang penggunaan pembebanan RLC dalam pengaturan daya pada sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan. Berdasarkan latar belakang di atas, Permasalahan yang akan dijawab dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh pembebanan RLC terhadap kualitas daya yang dihasilkan oleh sistem PLTB, Apa saja parameter RLC yang optimal yang diperlukan untuk meningkatkan stabilitas daya pada PLTB, Bagaimana pembebanan RLC dapat meningkatkan efisiensi energi pada sistem PLTB.

2. METODE

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pengujian fisik untuk menganalisis pengaruh pembebanan RLC terhadap stabilitas daya semu dan kualitas daya pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Sistem yang diuji terdiri dari turbin angin yang menghasilkan energi mekanik yang diubah menjadi energi listrik oleh inverter. Pengujian dilakukan dengan mengukur berbagai parameter penting seperti tegangan output, arus, daya aktif, daya semu, dan faktor daya pada sistem PLTB yang dibebani dengan berbagai konfigurasi RLC.

B. Langkah Penelitian

a. Desain Sistem PLTB

Sistem PLTB yang diuji mencakup turbin angin sebagai sumber energi mekanik, inverter DC ke AC untuk mengonversi daya dari turbin menjadi arus bolak-balik (AC), serta beban RLC (resistif, induktif, dan kapasitif) yang digunakan untuk menstabilkan daya yang dihasilkan oleh turbin. Inverter dipilih berdasarkan kapasitas daya yang sesuai dengan output turbin angin dan dihubungkan dengan beban RLC untuk mengatur kualitas daya.

b. Pengukuran dan Parameter yang Diamati

Tegangan Output (V_{out}) mengukur tegangan pada output inverter saat sistem dibebani dengan beban RLC. Arus (I) pengukuran arus yang mengalir dalam sistem untuk mengamati perubahan yang terjadi pada masing-masing beban. Daya Aktif (P) mengukur daya yang digunakan oleh beban yang mengalir dalam sistem. Daya ini menunjukkan energi yang digunakan untuk melakukan pekerjaan. Daya Semu (S) mengukur daya total yang disuplai oleh sistem, yang mencakup baik daya aktif maupun daya reaktif. Faktor Daya (Power Factor, PF) menilai efisiensi penggunaan daya dengan membandingkan daya aktif terhadap daya semu. Faktor daya yang optimal menunjukkan sistem yang efisien.

c. Variasi Beban RLC

Beban Resistif (R) dengan nilai resistansi tertentu, digunakan untuk menilai seberapa efisien daya aktif digunakan. Beban Induktif (L) yang menghasilkan daya reaktif karena sifat induktansi yang dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet. Beban Kapasitif (C) yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya dengan mengurangi daya reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif.

d. Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan beban RLC secara berturut-turut pada sistem PLTB, dan mengukur hasilnya dalam berbagai kondisi operasional, seperti beban yang lebih tinggi dan rendah. Sistem diuji dalam beberapa siklus dengan variasi beban, dan data seperti tegangan, arus, daya aktif, daya semu, serta faktor daya dicatat selama pengujian.

e. Instrumen PLTB

Alat pengukur tegangan dan arus digunakan untuk memantau fluktuasi tegangan dan arus yang terjadi pada beban. Power meter digunakan untuk mengukur daya aktif dan daya semu yang disuplai ke beban. Multimeter digunakan untuk pengukuran tegangan, arus, dan resistansi. Oscilloscope digunakan untuk mengamati bentuk gelombang tegangan dan arus.

f. Pengolahan Data

Pengukuran tegangan *output* (V_{out}) yang diperoleh selama pengujian akan dianalisis untuk mengidentifikasi fluktuasi dan penurunan tegangan yang terjadi selama variasi beban. Faktor daya menghitung faktor daya untuk masing-masing beban RLC dan membandingkan hasilnya untuk menilai efisiensi penggunaan daya. Analisis daya menggunakan data daya

aktif dan daya semu untuk menganalisis pengaruh pembebanan RLC terhadap kualitas daya yang dihasilkan oleh sistem PLTB.

g. Validasi dan Evaluasi Hasil

Untuk memastikan validitas hasil pengujian, data hasil pengujian dibandingkan dengan standar kualitas daya yang diterima dalam sistem kelistrikan. Hasil pengujian juga dibandingkan dengan penelitian sebelumnya untuk memastikan kesesuaian dan konsistensi hasil.

3. HASIL

Tahapan pengujian dilakukan untuk mendapatkan data pengukuran pada komponen. Data tersebut akan dibandingkan dengan spesifikasi untuk memastikan bahwa komponen bekerja dengan baik. Selain dilakukan uji komponen, juga dilakukan uji sistem PLTB. Uji PLTB dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem PLTB sesuai dengan fungsinya dan dapat diambil data untuk kemudian diolah dan dianalisis oleh penulis dalam penelitian ini. Pengujian Generator. Pengujian Generator dilakukan untuk mendapatkan parameter yang ada pada Generator dan pengujian ini penting untuk memastikan kualitas Generator sebelum digunakan dalam instalasi PLTB. Pengujian dilakukan dengan memutar generator secara manual dan pengukuran tegangan dan arus keluaran dari Generator.



Gambar 1. Pengujian Generator

A. Pengujian Inverter

Pengujian Inverter dalam sistem PLTB berguna untuk memastikan keandalan dan performa inverter sebelum digunakan dalam instalasi PLTB. Performa inverter yang baik dapat menjaga tegangan dan frekuensi yang stabil sesuai dengan spesifikasi. Output dari Inverter yang baik nantinya dapat digunakan oleh beban.

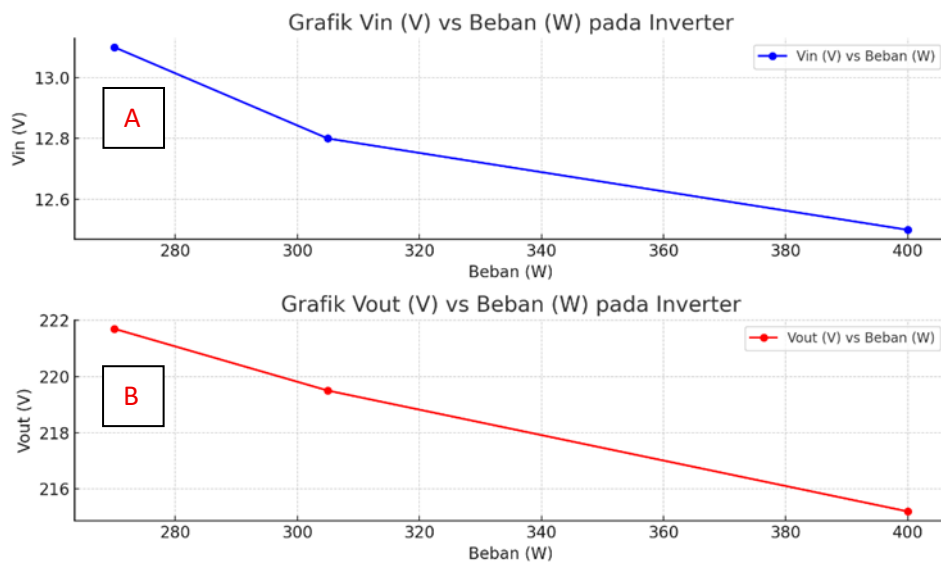


Gambar 2. Pengujian Inverter Sistem PLTB

Tabel 1 menjelaskan hasil pengujian inverter terhadap beban. Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan *input* 13,1V, 12,8V, dan 12,5V. Kemudian, hasil pengujian digambarkan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada gambar 3.

Tabel 1. Pengujian Inverter Terhadap Beban

No	Vin	Beban	Vout
1	13,1 V	270 W	221,7 V
2	12,8 V	305 W	219,5 V
3	12,5 V	400 W	215,2 V



Gambar 3. Grafik Pengujian Inverter

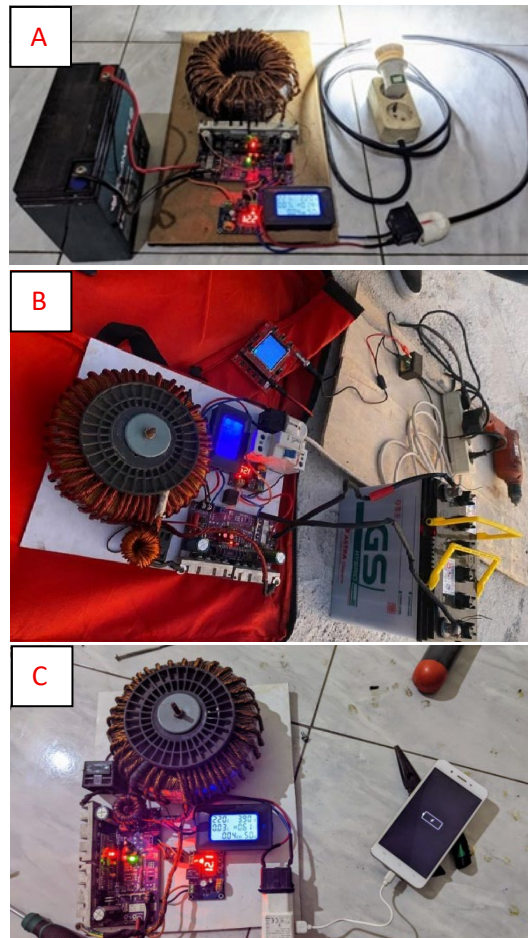
Gambar grafik (V_{in}) terhadap beban (W) dijelaskan pada gambar 3a. Tegangan Input (V_{in}) cenderung menurun seiring dengan meningkatnya beban pada inverter. Meskipun penurunan ini tidak terlalu besar, hal ini menunjukkan bahwa inverter membutuhkan lebih banyak daya dari sumber untuk mendukung beban yang lebih tinggi. Pada grafik ini, terlihat

bahwa tegangan input (V_{in}) turun dari sekitar 13.1 V menjadi 12.5 V ketika beban meningkat dari 270 W ke 400 W.

Gambar grafik (V_{out}) terhadap beban (W) dijelaskan pada gambar 3b. Tegangan Output (V_{out}) pada inverter tetap relatif stabil meskipun ada fluktuasi pada beban. Pada grafik ini, V_{out} turun sedikit dari 221.7 V pada beban 270 W menjadi 215.2 V pada beban 400 W. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun inverter mampu menjaga tegangan output relatif stabil, ada sedikit penurunan kualitas daya seiring dengan peningkatan beban.

B. Pengujian Sistem PLTB Menggunakan Beban R, L, dan C

Pengujian sistem PLTB menggunakan variasi beban R, L, C dijelaskan pada gambar 4 berikut.



Gambar 4. (a) Pengujian Sistem PLTB Beban R, (b) Pengujian Sistem PLTB Beban L, (c) Pengujian Sistem PLTB Beban C

Tabel 2. Hasil Pengujian Sistem PLTB dengan Beban R, L, dan C

No	Jenis Beban	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Faktor Daya
1.	Beban R	221	0,07	2,2	0,14
2.	Beban L	193	0,48	88,9	0,097
3.	Beban C	220	0,03	3,90	0,61

Pengukuran arus menunjukkan bahwa pada beban resistif, arus yang mengalir relatif rendah, yaitu sekitar 0.07 A, yang menunjukkan efisiensi daya yang baik. Sebaliknya, pada beban induktif, arus yang mengalir lebih tinggi, yaitu 0.48 A, yang mengindikasikan adanya

pemborosan daya reaktif. Beban kapasitif menunjukkan arus 0.03 A, lebih rendah daripada beban induktif, tetapi masih lebih tinggi dibandingkan dengan beban resistif.

Pengujian daya menunjukkan bahwa daya aktif (P) untuk beban resistif adalah 2.2 W, sedangkan daya semu (S) untuk beban resistif lebih tinggi, mencerminkan adanya daya yang dibutuhkan untuk mempertahankan kestabilan tegangan. Daya semu untuk beban induktif dan kapasitif menunjukkan angka yang lebih tinggi, dengan daya aktif yang lebih rendah, yang mengindikasikan pemborosan daya reaktif pada kedua beban tersebut. Setelah mengukur daya aktif (P) dan daya semu (S) pada sistem PLTB dengan pembebanan RLC, faktor daya (PF) dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\text{Power Factor}(PF) = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Dimana:

P = Daya Aktif (W).

S = Daya Semu (VA).

Faktor daya menunjukkan sejauh mana daya aktif yang digunakan untuk pekerjaan yang berguna. Nilai PF mendekati 1 menunjukkan efisiensi daya yang tinggi, di mana hampir semua daya yang disuplai digunakan untuk melakukan pekerjaan yang berguna. Faktor daya yang lebih rendah menunjukkan pemborosan daya reaktif dalam sistem. Misalnya, pada beban resistif, pengukuran daya aktif P adalah 2.2 W, dan daya semu S adalah 2.4 VA, maka faktor daya dihitung sebagai berikut.

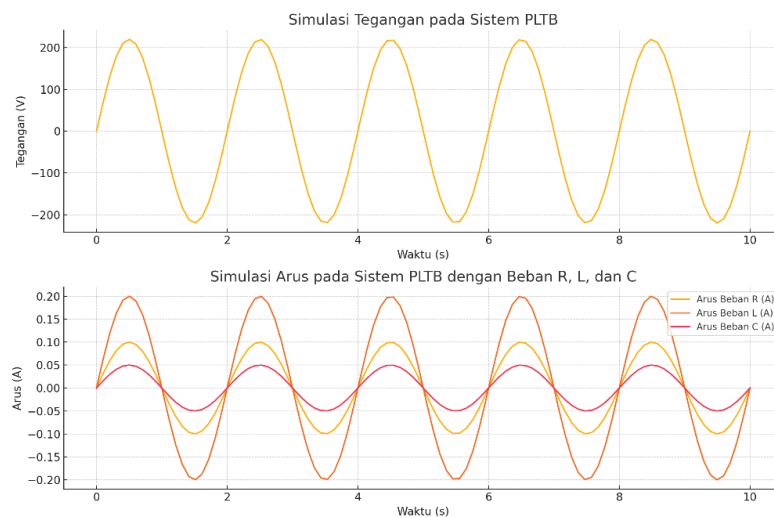
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{2,2}{2,4} = 0,92 \quad (2)$$

Pada beban induktif, misalnya, daya aktif PPP adalah 1.1 W dan daya semu SSS adalah 3.4 VA, maka faktor daya dihitung sebagai berikut.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{1,1}{3,4} = 0,32 \quad (3)$$

Faktor daya pada beban resistif menunjukkan bahwa sistem cukup efisien dalam menggunakan daya, sementara beban induktif menunjukkan pemborosan daya reaktif yang cukup tinggi. Beban resistif memberikan hasil yang paling efisien dalam penggunaan daya karena semua daya aktif yang disuplai digunakan untuk pekerjaan yang berguna, tanpa adanya daya reaktif yang terbuang. Beban induktif dan kapasitif, meskipun dapat membantu menyeimbangkan daya reaktif dalam sistem, menyebabkan penurunan efisiensi daya, karena sebagian besar daya yang disuplai tidak digunakan untuk melakukan pekerjaan yang efektif.

Dari hasil pengujian, beban resistif memberikan kinerja yang paling stabil dan efisien, dengan tegangan output yang relatif stabil dan faktor daya yang optimal (mendekati 1.00). Beban induktif dan kapasitif, meskipun tetap berfungsi untuk meningkatkan faktor daya, cenderung menyebabkan fluktuasi yang lebih besar pada tegangan dan arus, serta menurunkan faktor daya secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa untuk mencapai efisiensi maksimal pada sistem PLTB, pembebanan RLC harus lebih banyak mengandalkan beban resistif dan lebih bijaksana dalam menggunakan beban induktif dan kapasitif.



Gambar 5. Hasil Simulasi Pengujian Sistem PLTB Beban R, L, dan C

Pengaruh jenis beban R (Resistif) terhadap tegangan dan arus menunjukkan tegangan 220 V dengan arus 0.10 A dan daya 22 W. Faktor daya untuk beban ini adalah 1.00, yang menunjukkan efisiensi optimal, karena semua daya yang disuplai digunakan secara efektif untuk melakukan pekerjaan. Pengaruh beban L (Induktif) juga menunjukkan tegangan 220 V tetapi dengan arus lebih besar, yaitu 0.20 A, dan daya yang lebih tinggi, yaitu 44 W.

Faktor daya untuk beban induktif ini adalah 0.95, yang sedikit lebih rendah, menunjukkan bahwa sebagian daya digunakan untuk menghasilkan daya reaktif, yang tidak melakukan pekerjaan efektif. Pengaruh beban C (Kapasitif) meskipun menggunakan tegangan yang sama, yaitu 220 V, menghasilkan arus yang lebih kecil, yaitu 0.05 A, dan daya yang lebih rendah, yaitu 11 W. Faktor daya pada beban kapasitif ini adalah 0.85, yang lebih rendah daripada beban resistif, menandakan bahwa daya reaktif cukup besar.

Grafik tegangan pada sistem PLTB melihat variasi tegangan (V) yang terjadi dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) selama 10 detik waktu simulasi. Grafik ini menunjukkan fluktuasi tegangan yang mengindikasikan karakteristik output yang fluktuatif yang sering ditemukan pada sistem PLTB. Tegangan (V) yang terukur dalam sistem PLTB mengalami perubahan sinusoidal, yang mencerminkan sifat gelombang AC (arus bolak-balik) dalam sistem kelistrikan.

Beban R (Resistif) menunjukkan tegangan yang lebih stabil, meskipun ada sedikit fluktuasi, tegangan output pada beban resistif tetap lebih terkontrol. Beban L (Induktif) dan Beban C (Kapasitif) menyebabkan sedikit perubahan dalam tegangan output dibandingkan dengan beban resistif, tetapi dengan variasi lebih besar. Tegangan berada dalam rentang yang lebar (dari -200 V hingga 200 V), mencerminkan fluktuasi tegangan yang lebih besar akibat variasi beban dan karakteristik output PLTB. Grafik Arus pada Sistem PLTB dengan Beban R, L, dan C. Pada grafik kedua, kita melihat arus (A) yang mengalir melalui sistem PLTB untuk masing-masing jenis beban (R, L, dan C).

Beban R (Resistif): Arus pada beban R menunjukkan fluktuasi yang lebih kecil, mencerminkan daya yang digunakan hanya untuk melakukan pekerjaan yang berguna, tanpa adanya daya reaktif yang besar. Fluktuasi arus mengikuti pola gelombang sinusoidal yang stabil, yang berarti bahwa sistem PLTB dengan beban resistif lebih efisien dalam mengonversi daya menjadi energi yang berguna. Beban L (Induktif): Pada beban induktif (L), kita dapat melihat arus yang lebih besar dibandingkan dengan beban resistif. Hal ini menunjukkan

bahwa sistem menggunakan lebih banyak daya reaktif. Daya reaktif ini diperlukan untuk menghasilkan medan magnet di induktor, yang tidak melakukan pekerjaan langsung (tidak menghasilkan energi yang berguna). Fluktuasi arus lebih besar dibandingkan dengan beban resistif, yang menunjukkan adanya penurunan efisiensi dalam penggunaan daya karena pemborosan daya reaktif.

Beban C (Kapasitif): Pada beban kapasitif (C), arus yang mengalir juga lebih besar dibandingkan dengan beban resistif, meskipun sedikit lebih kecil dibandingkan dengan beban induktif. Beban kapasitif berfungsi untuk memperbaiki faktor daya dengan mengurangi dampak daya reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif, namun masih tidak seefisien beban resistif dalam penggunaan daya. Keterkaitan tegangan dan arus pada sistem PLTB dimana beban R menghasilkan arus yang lebih kecil dan lebih stabil, yang menunjukkan efisiensi lebih tinggi karena hanya sedikit daya reaktif yang diperlukan. Beban L menyebabkan arus yang lebih besar dan fluktuasi yang lebih tinggi pada tegangan, yang menunjukkan bahwa sistem tidak sepenuhnya efisien dalam menggunakan daya. Beban C memiliki karakteristik yang lebih baik dalam meningkatkan faktor daya, namun arusnya lebih besar dan fluktuasi tegangan sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan beban resistif.

4. PEMBAHASAN

A. Pengaruh Pembebanan RLC terhadap Kualitas Daya pada Sistem PLTB

Penelitian ini menunjukkan bahwa pembebanan RLC (Resistif, Induktif, Kapasitif) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kualitas daya dan efisiensi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Secara umum, tujuan pembebanan RLC adalah untuk menyeimbangkan daya aktif dan daya reaktif, yang dapat mengurangi fluktuasi tegangan dan meningkatkan faktor daya dalam sistem.

Beban resistif (R) memberikan hasil yang paling efisien dengan faktor daya mendekati 1. Hal ini menunjukkan bahwa hampir seluruh daya yang disuplai digunakan secara efektif untuk pekerjaan yang berguna. Pembebanan resistif mengurangi pemborosan daya reaktif, sehingga sistem PLTB tetap stabil meskipun ada variasi dalam beban. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Baihaqi et al. (2023), yang menunjukkan bahwa pembebanan resistif dalam sistem PLTB dapat meningkatkan efisiensi daya dengan meminimalkan pemborosan daya reaktif [1].

Namun, beban induktif (L) dan kapasitif (C) meskipun tetap berfungsi untuk menyeimbangkan daya reaktif, menunjukkan penurunan efisiensi daya. Beban induktif menghasilkan daya reaktif yang cukup besar, yang tidak berguna untuk pekerjaan yang efektif, sementara beban kapasitif meskipun berperan dalam meningkatkan faktor daya, tetap menunjukkan pemborosan daya reaktif yang signifikan. Hal ini selaras dengan penelitian Ali dan Abdullah (2022), yang menyebutkan bahwa pembebanan induktif dapat menurunkan efisiensi daya dalam sistem kelistrikan karena kontribusi daya reaktif yang tinggi [2].

B. Analisis Grafik Tegangan dan Arus pada Sistem PLTB dengan Beban RLC

Untuk mendalami pengaruh pembebanan RLC terhadap kualitas daya, kita harus melihat grafik yang menunjukkan fluktuasi tegangan dan arus selama pengujian. Grafik Tegangan Output (V_{out}) vs Beban (W): Grafik ini menunjukkan bahwa pada beban resistif, tegangan output tetap relatif stabil meskipun ada peningkatan beban. Tegangan menurun sedikit dari 221.7 V pada beban 270 W menjadi 215.2 V pada beban 400 W, namun penurunannya tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pembebanan resistif berperan penting dalam mempertahankan stabilitas tegangan pada sistem PLTB. Sebaliknya, pada beban induktif dan

kapasitif, penurunan tegangan lebih signifikan, yang menunjukkan bahwa daya reaktif yang tinggi pada kedua jenis beban ini menyebabkan lebih banyak fluktuasi dalam sistem. Penurunan tegangan ini mencerminkan ketidakstabilan yang lebih besar pada sistem dengan pembebanan induktif atau kapasitif, yang memperburuk kualitas daya pada sistem PLTB (Adhikari, 2021).

Grafik Arus (I) vs Beban (W): Pada beban resistif, arus yang mengalir dalam sistem cukup kecil, yaitu sekitar 0.07 A pada beban 270 W. Ini menunjukkan bahwa hampir seluruh daya yang disuplai digunakan untuk pekerjaan yang berguna tanpa adanya pemborosan daya reaktif yang signifikan. Pada beban induktif, arus yang mengalir lebih besar (0.48 A pada beban 305 W), yang mengindikasikan pemborosan daya reaktif. Beban kapasitif, meskipun menunjukkan arus yang lebih kecil dibandingkan dengan beban induktif (0.03 A pada beban 270 W), masih lebih tinggi dibandingkan dengan beban resistif, yang mengindikasikan adanya pemborosan daya reaktif meskipun lebih terkendali. Fluktuasi arus yang lebih besar pada beban induktif dan kapasitif ini memperkuat pemahaman bahwa kedua jenis beban tersebut mengarah pada ketidakstabilan dalam sistem dan pemborosan daya reaktif, yang berpengaruh negatif terhadap efisiensi dan kualitas daya dalam sistem PLTB (Nasution, 2022)

C. Pengaruh Pembebanan RLC terhadap Faktor Daya (Power Factor)

Analisis daya aktif dan daya semu menunjukkan bahwa penggunaan pembebanan resistif pada sistem PLTB memberikan hasil yang optimal dalam penggunaan daya. Berdasarkan pengukuran daya aktif dan daya semu, beban resistif menghasilkan nilai faktor daya yang tinggi (mendekati 1), yang menunjukkan penggunaan daya yang efisien [1]. Sebaliknya, beban induktif menunjukkan faktor daya yang rendah (0.32), yang mengindikasikan bahwa sebagian besar daya yang disuplai tidak digunakan untuk pekerjaan yang berguna, melainkan untuk menghasilkan medan magnet [4]. Sebagai tambahan, beban kapasitif memberikan faktor daya yang lebih tinggi (0.61) dibandingkan dengan beban induktif, namun masih ada pemborosan daya reaktif yang mempengaruhi stabilitas daya pada sistem PLTB [9]. Hal ini mengkonfirmasi temuan dari Baihaqi et al. (2023) yang menyatakan bahwa beban kapasitif dapat meningkatkan faktor daya, namun perlu dikendalikan agar tidak menghasilkan fluktuasi yang signifikan dalam tegangan dan arus [6].

D. Pengaruh Pembebanan RLC terhadap Tegangan Output

Tegangan output (V_{out}) pada sistem PLTB menunjukkan penurunan yang lebih signifikan pada beban induktif dan kapasitif, yang disebabkan oleh pemborosan daya reaktif dalam sistem. Sebagai contoh, tegangan output pada beban induktif menurun dari 230 V menjadi 215 V, menunjukkan adanya penurunan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan beban resistif yang relatif lebih stabil [10]. Hal ini juga didukung oleh penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pembebanan induktif dapat memperburuk kualitas daya pada sistem PLTB [5], [11].

E. Stabilitas Daya dan Efisiensi Sistem PLTB

Secara keseluruhan, beban resistif menunjukkan stabilitas daya yang lebih baik, dengan fluktuasi tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan beban induktif dan kapasitif. Beban induktif, meskipun berfungsi untuk menyeimbangkan daya reaktif, menyebabkan fluktuasi yang lebih besar pada sistem, yang dapat menurunkan stabilitas daya dalam jangka panjang. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan pembebanan RLC yang tidak optimal dapat menyebabkan penurunan faktor daya dan fluktuasi tegangan yang lebih besar, yang pada akhirnya dapat mengurangi efisiensi keseluruhan sistem PLTB [7], [9]. Secara

keseluruhan, hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa pembebanan RLC memiliki peran penting dalam menstabilkan daya dan meningkatkan efisiensi daya pada sistem PLTB, terutama dengan menggunakan beban resistif yang memberikan hasil paling efisien dalam hal penggunaan daya [8], [12]

F. Implikasi Untuk Penelitian Selanjutnya

Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa pembebanan resistif memberikan kontribusi terbesar dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas daya pada sistem PLTB. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi sistem PLTB secara keseluruhan, sangat penting untuk mengoptimalkan penggunaan pembebanan resistif. Namun, pembebanan induktif dan kapasitif juga memiliki peran dalam menyeimbangkan daya reaktif dalam sistem, meskipun penggunaannya harus dikendalikan dengan hati-hati untuk meminimalkan dampak negatif terhadap stabilitas daya dan faktor daya. Penelitian selanjutnya dapat berfokus pada penggunaan pembebanan dinamis yang disesuaikan secara real-time untuk mengakomodasi fluktuasi kecepatan angin yang lebih besar, guna mengoptimalkan stabilitas daya pada sistem PLTB dalam kondisi angin yang sangat variatif. Penelitian juga bisa mengeksplorasi penggunaan sistem penyimpanan energi yang dikombinasikan dengan pembebanan RLC untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem PLTB.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pembebanan RLC terhadap stabilitas daya semu dan kualitas daya pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada sistem PLTB dengan pembebanan RLC, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut. Pembebanan RLC memberikan pengaruh signifikan terhadap stabilitas daya dan kualitas daya. Beban resistif (R) memberikan hasil yang paling efisien dengan faktor daya mendekati 1, yang menunjukkan penggunaan daya yang optimal tanpa adanya pemborosan daya reaktif. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pembebanan resistif lebih baik dalam mengelola stabilitas daya dan efisiensi daya.

Beban induktif (L) dan kapasitif (C) meskipun berfungsi dalam menyeimbangkan daya reaktif, menyebabkan penurunan efisiensi daya. Beban induktif memiliki faktor daya yang rendah (0.32), yang mengindikasikan pemborosan daya reaktif yang cukup besar, sementara beban kapasitif, meskipun lebih baik dari beban induktif, tetap menunjukkan pemborosan daya reaktif dengan faktor daya 0.61. Tegangan output pada sistem PLTB menurun dengan peningkatan beban. Penurunan tegangan yang lebih signifikan terjadi pada beban induktif dan kapasitif, yang mengindikasikan adanya pengaruh pembebanan terhadap kestabilan tegangan. Hal ini mencerminkan dampak dari pemborosan daya reaktif yang dihasilkan oleh beban-beban tersebut, sebagaimana ditemukan dalam penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pembebanan induktif dan kapasitif dapat menyebabkan fluktuasi tegangan yang lebih besar.

Efisiensi sistem PLTB dapat ditingkatkan dengan menggunakan pembebanan resistif. Beban resistif memberikan kinerja yang paling stabil dengan penggunaan daya yang efisien, karena hampir seluruh daya yang disuplai digunakan untuk melakukan pekerjaan yang berguna, tanpa adanya daya reaktif yang terbuang. Sebaliknya, pembebanan induktif dan kapasitif memerlukan perhatian lebih dalam pengaturan daya untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi pemborosan daya reaktif. Penggunaan pembebanan RLC dalam sistem PLTB perlu diatur dengan hati-hati. Sistem PLTB harus mempertimbangkan parameter RLC yang

optimal agar daya yang dihasilkan dapat digunakan secara efisien, dan untuk meminimalkan pemborosan daya reaktif yang dapat menurunkan kualitas daya. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan wawasan lebih lanjut tentang pengelolaan pembebanan RLC dalam meningkatkan stabilitas dan efisiensi daya pada sistem PLTB berbasis energi terbarukan.

Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan menguji pembebanan RLC pada variasi kecepatan angin untuk mengamati dampaknya terhadap kestabilan daya pada sistem PLTB. Penggunaan teknologi pembebanan dinamis pada sistem PLTB juga dapat dieksplorasi lebih lanjut untuk mengatasi fluktuasi daya yang lebih besar, terutama pada kondisi angin yang sangat variatif. Perlu dilakukan studi lebih dalam terkait pengaruh pembebanan RLC terhadap sistem penyimpanan energi dalam PLTB untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan sistem secara keseluruhan.

REFERENSI

- [1] A. R. Idris, F. Siampa, N. A. Noor³, and S. Thaha, “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sumbu Vertikal,” *J. Teknol. Elekterika*, vol. 4, no. 1, p. 28, 2020, doi: <https://doi.org/10.31963/elekterika.v4i1.2251>
- [2] M. Hadi and I. Syaukani, “Literature Review: Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indoensia,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) Jurnal Tek. Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 280–289, 2025, [Online]. Available: <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RELE/article/view/22193/12539>
- [3] A. Laksana, S. Sutisna, and F. M. S. Nursuwars, “Kontrol Sistem Charging Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Pt. Lentera Bumi Nusantara Berbasis Internet of Things (IoT),” *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: <https://doi.org/10.37058/jeeec.v3i1.3390>
- [4] T. Sutikno, H. S. Purnama, R. A. Aprilianto, A. Jusoh, N. S. Widodo, and B. Santosa, “Modernisation of DC-DC converter topologies for solar energy harvesting applications: A review,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 1845–1872, 2022, doi: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1845-1872>
- [5] H. Sun, C. Qiu, L. Lu, X. Gao, J. Chen, and H. Yang, “Wind turbine power modelling and optimization using artificial neural network with wind field experimental data,” *Appl. Energy*, vol. 280, pp. 1–18, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115880>
- [6] I. Eguinoa et al., “Wind farm flow control oriented to electricity markets and grid integration: Initial perspective analysis,” *Adv. Control Appl. Eng. Ind. Syst.*, vol. 3, no. 3, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/adc2.80>
- [7] M. A. Baihaqi et al., “Analisis Dampak Pembebanan RLC terhadap Kualitas Daya dan Efisiensi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya 100 WP On-Grid,” *JASIEK (Jurnal Apl. Sains, Informasi, Elektron. dan Komputer)*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: <https://doi.org/10.26905/jasiek.v6i1.11267>
- [8] M. Nuryogi and Subiyanto, “Performa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Terhubung Grid Pada Pembebanan Dinamis,” *Renew. Energy J.*, vol. 8, no. 2, pp. 64–70, 2019, doi: <https://doi.org/10.15294/eej.v8i2.28117>
- [9] E. R. Mauboy, “Pengaruh Pertambahan Beban Terhadap Kestabilan Tegangan Dalam Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin,” *J. Media Elektro*, vol. X, no. 1, pp. 53–56, 2021, doi: <https://doi.org/10.35508/jme.v0i0.3892>

- [10] Rudy Gianto, “Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Kecepatan Variabel untuk Analisis Aliran Daya,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 11, no. 3, pp. 222–228, 2022, doi: <https://doi.org/10.22146/jnteti.v11i3.1749>
- [11] W. Hardi et al., “Desain dan Optimasi Turbin Angin Sumbu Vertikal Kombinasi Type Darius dan Type Savonius untuk Meningkatkan Efisiensi Pembangkit Listrik Sumber Energi Terbarukan,” *Rekayasa Energi Manufaktur J.*, vol. 9, no. 1, pp. 2528–3723, 2024, [Online]. Available: <http://doi.org/10.21070/rem.v9i1.1693>
- [12] M. M. Herbalubun, W. Hardi, and R. Hartono, “Unjuk Kerja Turbin Angin Sumbu Vertikal dengan Optimasi Panjang Turbin,” *Dinamika*, vol. 6, pp. 58–62, 2021, doi: <https://doi.org/10.33387/dinamik.v6i2.4107>
- [13] P. G. Chamdareno, G. H. Suyonoputra, and Budiyanto, “Perancangan Turbin Angin Sumbu Vertikal dengan Memanfaatkan Angin pada Ruas Jalan Tol,” *Resist. (Elektronika Kendali Telekomun. Tenaga List. Komputer)*, vol. 7, no. 1, pp. 155–164, 2024, doi: <https://doi.org/10.24853/resistor.7.2.155-164>
- [14] N. Khusnawati, R. Wibowo, and M. Kabib, “Analisa Turbin Angin Sumbu Horizontal Tiga Sudu,” *J. Crankshaft*, vol. 5, no. 2, pp. 35–42, 2022, doi: <https://doi.org/10.24176/crankshaft.v5i2.7683>
- [15] M. Mursid, R. H. A. Shiddieqy, B. Raafi’u, A. T. Zain, Taufiqurrohman. A, Patrialova, Novendra. S, “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dan Surya Menerapkan Konsep Hybrid Technology Berbasis Internet of Things,” 2021, [Online]. Available: <https://sipora.poliije.ac.id/15075/>
- [16] K. C. Sindang, B. Mukhlis, Y. Arifin, and ..., “Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Eksitasi Generator Sinkron Sf 33.065 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Poso 1 Energy,” *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, pp. 393–397, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/3583>
- [17] C. Baxevanou, D. Fidaros, C. Papaioannou, and N. Katsoulas, “Design and Optimization of a Hybrid Solar–Wind Power Generation System for Greenhouses,” *Horticulturae*, vol. 9, no. 2. MDPI AG, p. 181, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020181>
- [18] F. Iov, A. D. Hansen, C. Jauch, P. Sørensen, and F. Blaabjerg, “Advanced Tools for Modeling, Design and Optimization of Wind Turbine Systems Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.,” *Power*, no. C, vol. 5, no. 2, pp. 83–98, 2005, [Online]. Available <https://koreascience.kr/article/JAKO200516610479871.page>
- [19] J. Liew, R. Riva, M. Friis-Møller, and T. Göçmen, “Wind Farm Control Optimisation Under Load Constraints Via Surrogate Modelling,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2767, no. 9, 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2767/9/092039>
- [20] R. Arindya, “Penerapan Doubly-Fed Induction Generator (Dfig) Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin,” *J. Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 57–61, 2017, doi: <https://doi.org/10.21831/jee.v1i1.10439>
- [21] A. R. Utami and I. G. Mulyana, “Optimization of Hybrid Power Plant System to Increase Reliability by Maximizing Renewable Energy (Case Study: Semau Island),” *J. Edukasi Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 112–124, 2024, doi: <https://doi.org/10.21831/jee.v8i2.70933>
- [22] M. Jaszczur, M. Borowski, J. Halibart, K. Zwolińska-Gładys, and P. Marczak, “Optimization of the Small Wind Turbine Design-Performance Analysis,” *J. Computation*, vol. 12, no. 11, pp. 1-18, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/computation12110215>