

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Gambaran Umum Implementasi dan Hasil Simulasi Sistem

Subbab ini menyajikan gambaran umum implementasi dan hasil simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) yang dimodelkan pada lingkungan *MATLAB/Simulink* dan dikendalikan menggunakan metode *Fuzzy-PI*. Model sistem yang digunakan terdiri dari generator SEIG, sistem penyimpanan energi berbasis baterai, *inverter*, *DC chopper*, serta kontroler *Fuzzy-PI* yang berfungsi mengatur aliran daya pada sistem.

Implementasi simulasi dilakukan untuk menganalisis kemampuan kontroler dalam menjaga kestabilan frekuensi dan keseimbangan daya saat terjadi perubahan beban. Sistem dirancang agar mampu beroperasi pada kondisi *standalone* dengan mempertahankan frekuensi nominal sebesar 50 Hz meskipun terjadi variasi konsumsi daya pada sisi beban.

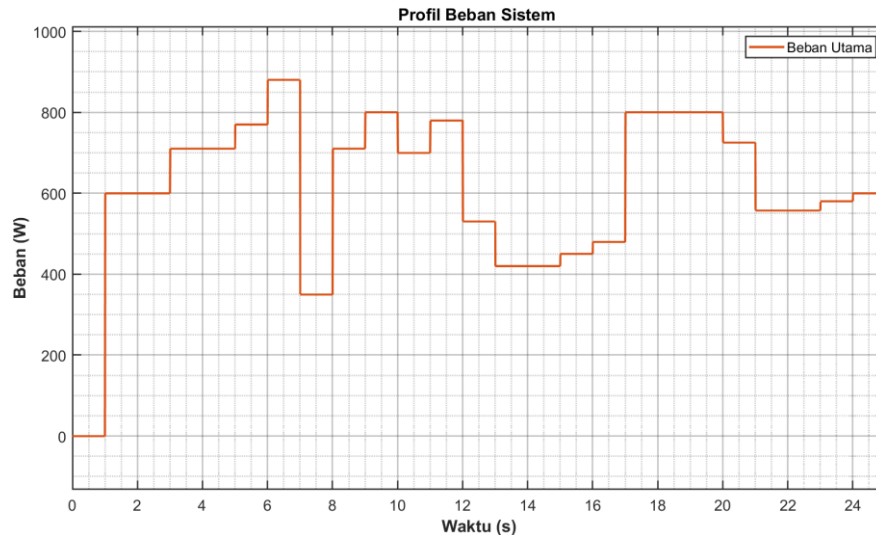
Kontroler *Fuzzy-PI* bekerja dengan memproses nilai *error* daya (ΔP) dan *error* frekuensi (Δf) sebagai variabel masukan untuk menghasilkan sinyal kendali berupa *duty cycle* PWM. Sinyal PWM tersebut digunakan untuk mengatur proses *charging* dan *discharging* pada sistem penyimpanan energi sehingga aliran daya antara generator, baterai, dan beban dapat dijaga tetap seimbang.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kestabilan operasi pada berbagai kondisi pembebanan. Saat terjadi peningkatan beban, kontroler *Fuzzy-PI* memberikan respon dengan menyesuaikan *duty cycle* PWM sehingga sistem penyimpanan energi dapat membantu menjaga kestabilan frekuensi. Sebaliknya, ketika terjadi kondisi kelebihan daya, sistem mengarahkan energi berlebih menuju baterai atau *dummy load* untuk mencegah kenaikan frekuensi yang berlebihan.

Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa metode *Fuzzy-PI* mampu menghasilkan respon kendali yang adaptif, stabil, dan kontinu pada sistem PLTPH, sehingga sistem dapat mempertahankan kualitas daya dan kestabilan frekuensi selama operasi berlangsung.

4.1.1 Profil Beban Harian sebagai Skenario Pengujian Sistem

Pengujian sistem PLTPH dilakukan menggunakan profil beban harian yang merepresentasikan pola konsumsi listrik pada sistem *off-grid*. Profil beban ini dirancang untuk mencerminkan kondisi operasional nyata, di mana beban mengalami variasi sepanjang waktu akibat perubahan aktivitas pengguna, baik pada kondisi beban rendah maupun saat beban puncak.



Gambar 4. 1 Beban Utama Sistem

Grafik pada Gambar 4.1 menunjukkan variasi daya beban terhadap waktu selama satu siklus operasi harian yang digunakan sebagai skenario pengujian sistem. Profil beban ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan kontroler *Fuzzy-PI* dalam menjaga kestabilan frekuensi dan keseimbangan daya pada sistem PLTPH terhadap perubahan beban secara dinamis.

Pada awal simulasi, sistem berada pada kondisi tanpa beban. Kondisi ini merepresentasikan fase *starting* generator sebelum sistem mulai melayani konsumsi daya. Pada fase tersebut, generator bekerja pada kondisi *steady-state* awal sehingga respon dasar sistem dapat diamati tanpa adanya gangguan pembebanan.

Memasuki fase berikutnya, beban mengalami peningkatan secara signifikan hingga mencapai kisaran sekitar 600 W. Perubahan ini merepresentasikan kondisi perubahan beban mendadak yang digunakan untuk menguji respon transien sistem terhadap ketidakseimbangan daya. Pada kondisi ini, kontroler *Fuzzy-PI* mulai memberikan aksi kendali untuk menjaga kestabilan frekuensi sistem.

Setelah fase awal, beban berada pada kondisi relatif stabil pada tingkat menengah sebelum kembali meningkat secara bertahap menuju kondisi beban puncak. Kenaikan beban secara gradual ini menggambarkan meningkatnya aktivitas konsumsi daya pada sistem PLTPH. Nilai beban maksimum dicapai pada rentang waktu tertentu dengan daya mendekati 1000 W yang merepresentasikan kondisi puncak konsumsi energi harian.

Selanjutnya, setelah mencapai kondisi beban maksimum, daya beban mengalami penurunan secara bertahap hingga akhir simulasi. Penurunan tersebut menggambarkan berkurangnya aktivitas konsumsi energi setelah periode beban puncak berakhir.

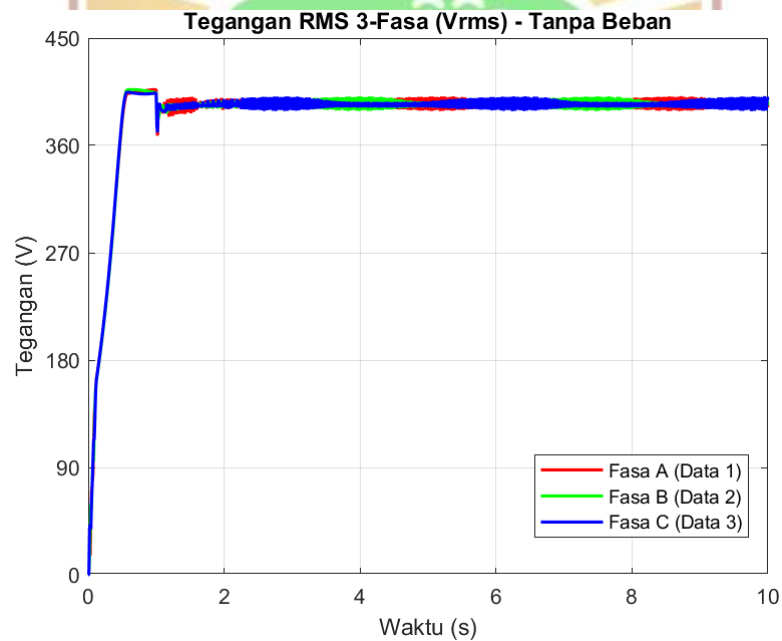
Pola perubahan beban yang ditunjukkan pada grafik dirancang untuk mensimulasikan kondisi operasional nyata pada sistem PLTPH *standalone*, di mana daya beban berubah secara dinamis sepanjang waktu. Dengan asumsi daya

pembangkitan generator relatif konstan, perubahan beban akan menyebabkan ketidakseimbangan daya pada sistem sehingga memengaruhi respon frekuensi dan aliran daya. Oleh karena itu, profil beban ini digunakan untuk menguji kemampuan kontroler *Fuzzy-PI* dalam mempertahankan kestabilan sistem selama operasi berlangsung.

4.2 Respon Sistem Pengujian Dalam Kondisi Tanpa Beban

4.2.1 Respon Tegangan Generator Tanpa Beban

Pengujian respon tegangan generator tanpa beban dilakukan untuk mengetahui kemampuan generator PLTPH dalam membangkitkan dan mempertahankan tegangan keluaran pada kondisi tanpa adanya beban utama yang terhubung ke sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati karakteristik transien saat generator mulai beroperasi hingga mencapai kondisi tunak (*steady-state*), serta mengevaluasi kestabilan tegangan pada ketiga fasa. Hasil respon tegangan generator tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 4.2.



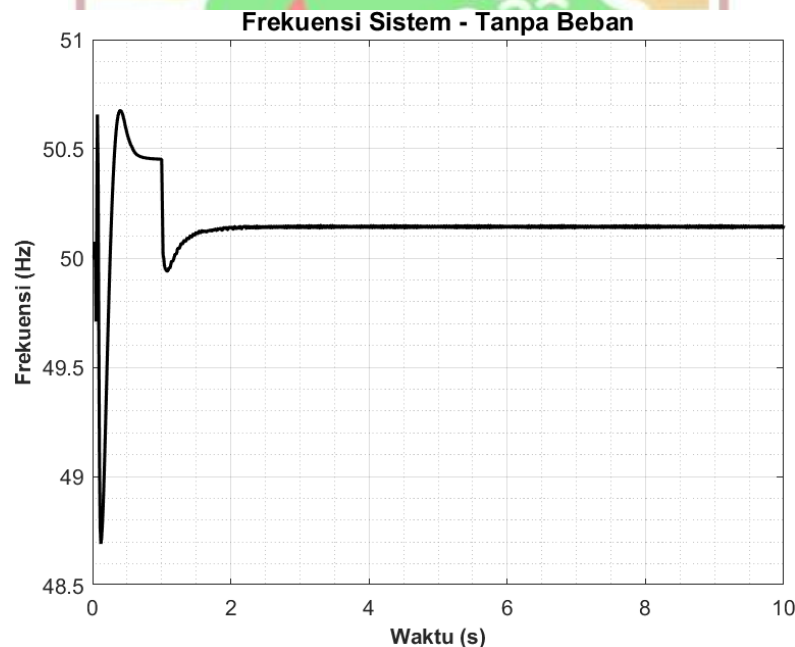
Gambar 4. 2 Respon Tegangan Tanpa Beban

Berdasarkan grafik Pada Gambar 4.2 respon tegangan RMS 3-fasa pada kondisi tanpa beban, terlihat bahwa tegangan generator mengalami kenaikan dari kondisi awal hingga mencapai kondisi operasi pada kisaran 400 V RMS. Pada saat awal simulasi, tegangan meningkat secara cepat dari nilai mendekati 0 V hingga mencapai nilai sekitar 400 V. Respons kenaikan ini menunjukkan adanya proses transien pada saat generator mulai beroperasi dan membangun tegangan. Setelah mencapai kondisi operasi, ketiga tegangan fasa, yaitu Fasa A, Fasa B, dan Fasa C, menunjukkan respons yang relatif berdekatan dan stabil di sekitar nilai nominal 400 V. Pada sekitar $t = 1$ detik, terlihat adanya penurunan tegangan sesaat yang

kemudian diikuti oleh pemulihan menuju kondisi stabil. Setelah transien tersebut, tegangan antar-fasa kembali berada pada kisaran sekitar 390–400 V dengan riak kecil pada ketiga fasa. Perbedaan respons antar-fasa juga relatif kecil, sehingga menunjukkan bahwa sistem pembangkitan tegangan 3-fasa bekerja secara seimbang. Secara keseluruhan, pada kondisi tanpa beban utama, generator mampu mempertahankan tegangan RMS mendekati nilai nominal setelah melewati kondisi transien awal, meskipun masih terdapat sedikit fluktuasi tegangan selama proses operasi.

4.2.2 Respon Frekuensi Sistem Tanpa Beban

Pengujian respon frekuensi sistem tanpa beban dilakukan untuk mengetahui kemampuan generator PLTPH dalam mempertahankan kestabilan frekuensi ketika tidak terdapat beban utama yang terhubung ke sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati karakteristik frekuensi selama kondisi transien awal hingga mencapai kondisi tunak (*steady-state*) serta mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan frekuensi di sekitar nilai nominal 50 Hz. Hasil respon frekuensi sistem tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 4.3.



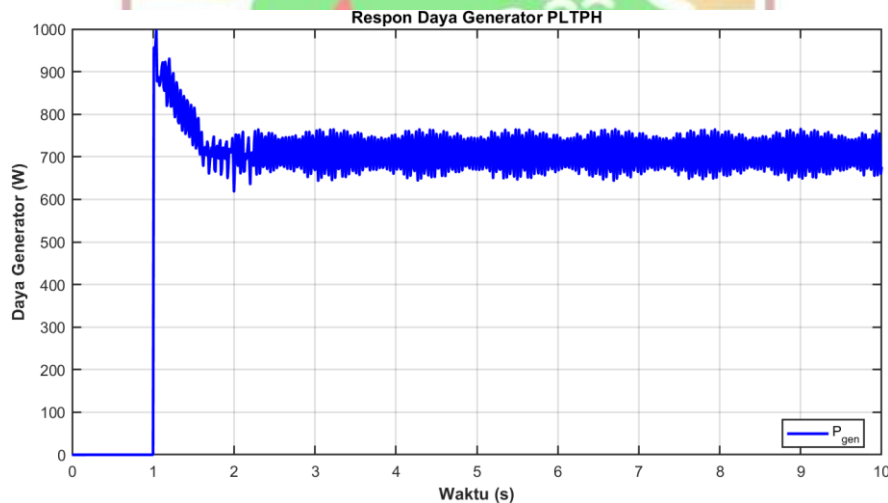
Gambar 4. 3 Respon Frekuensi Tanpa Beban

Berdasarkan Gambar 4.3 frekuensi sistem mengalami respon transien pada awal simulasi akibat proses awal pembangkitan daya oleh generator. Pada saat awal operasi, frekuensi mengalami penurunan hingga sekitar 48,7 Hz, kemudian meningkat hingga mencapai sekitar 50,7 Hz sebelum secara bertahap mendekati kondisi stabil. Respon tersebut menunjukkan adanya fenomena *overshoot* dan *undershoot* yang merupakan karakteristik normal pada saat generator mulai beroperasi dan sistem pengendali melakukan penyesuaian terhadap kondisi operasi. Selanjutnya, pada sekitar $t = 1$ detik, terjadi gangguan kecil yang menyebabkan

frekuensi turun sesaat hingga mendekati 49,9 Hz. Setelah gangguan tersebut, frekuensi kembali meningkat secara bertahap dan mencapai kondisi tunak pada kisaran 50,1 Hz hingga akhir simulasi. Fluktuasi frekuensi yang terjadi setelah kondisi tunak relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa sistem pembangkit mampu mempertahankan frekuensi operasi tetap mendekati nilai nominal. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem PLTPH memiliki karakteristik respon frekuensi yang stabil pada kondisi tanpa beban serta mampu kembali ke kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan transien awal.

4.2.3 Respon Daya Keluaran Generator Tanpa Beban

Pengujian respon daya keluaran generator tanpa beban dilakukan untuk mengetahui karakteristik daya yang dihasilkan generator PLTPH ketika sistem beroperasi tanpa adanya beban utama yang terhubung. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati respon transien daya pada saat generator mulai beroperasi hingga mencapai kondisi tunak (*steady-state*), serta mengevaluasi kestabilan daya keluaran generator selama proses pembangkitan. Hasil respon daya keluaran generator tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 4.4.



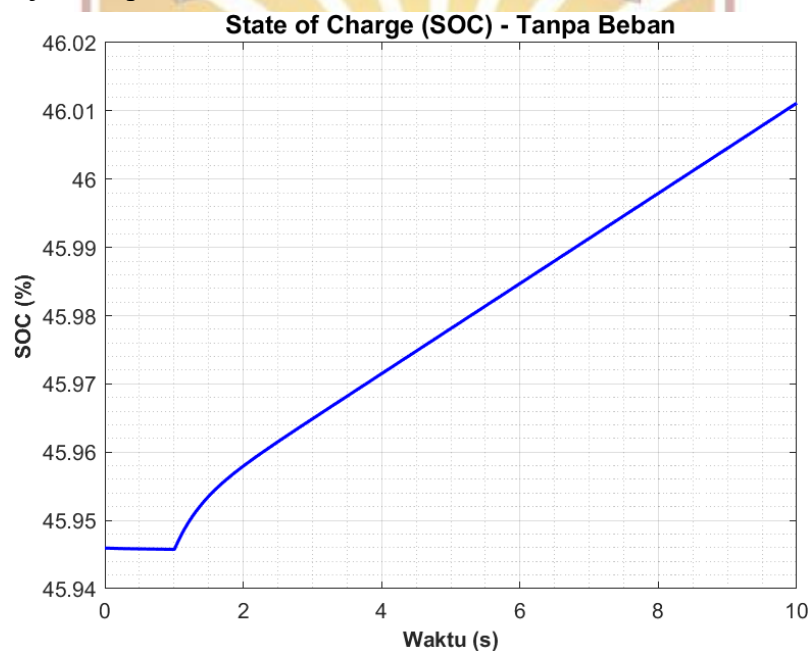
Gambar 4. 4 Respon Frekuensi Sistem Tanpa Beban

Berdasarkan Gambar 4.4, daya keluaran generator bernilai 0 W pada awal simulasi hingga sekitar $t = 1$ detik, yang menunjukkan bahwa generator belum mulai menghasilkan daya listrik. Setelah generator mulai beroperasi, daya keluaran meningkat secara cepat hingga mencapai nilai puncak sekitar 1000 W. Kondisi ini menunjukkan adanya respon transien awal akibat proses pembangkitan dan penyesuaian sistem terhadap kondisi operasi. Setelah mencapai nilai maksimum, daya generator mengalami penurunan secara bertahap disertai osilasi hingga mencapai kondisi tunak pada kisaran 700 W. Fluktuasi daya yang masih terlihat setelah kondisi tunak disebabkan oleh proses pengaturan sistem pembangkit dan karakteristik pembebanan generator yang menghasilkan riak daya (*power ripple*). Meskipun demikian, amplitudo fluktuasi relatif kecil dibandingkan nilai daya rata-

ratanya sehingga daya keluaran generator dapat dikatakan stabil selama operasi. Hasil ini menunjukkan bahwa generator PLTPH mampu mencapai kondisi operasi yang stabil setelah melewati respon transien awal dengan daya keluaran rata-rata sekitar 700 W pada kondisi tanpa beban.

4.2.4 Respon SoC Batrai Tanpa Beban

Pengujian respon *State of Charge* (SoC) baterai tanpa beban dilakukan untuk mengetahui perubahan kapasitas baterai ketika sistem PLTPH beroperasi tanpa adanya beban utama yang terhubung. Pada kondisi ini, energi listrik yang dihasilkan generator dimanfaatkan untuk proses pengisian (*charging*) baterai. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati karakteristik perubahan SoC baterai selama proses pengisian serta mengevaluasi kemampuan sistem manajemen energi dalam memanfaatkan kelebihan daya yang tersedia. Hasil respon SoC baterai tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Respon SoC Batrai Tanpa Beban

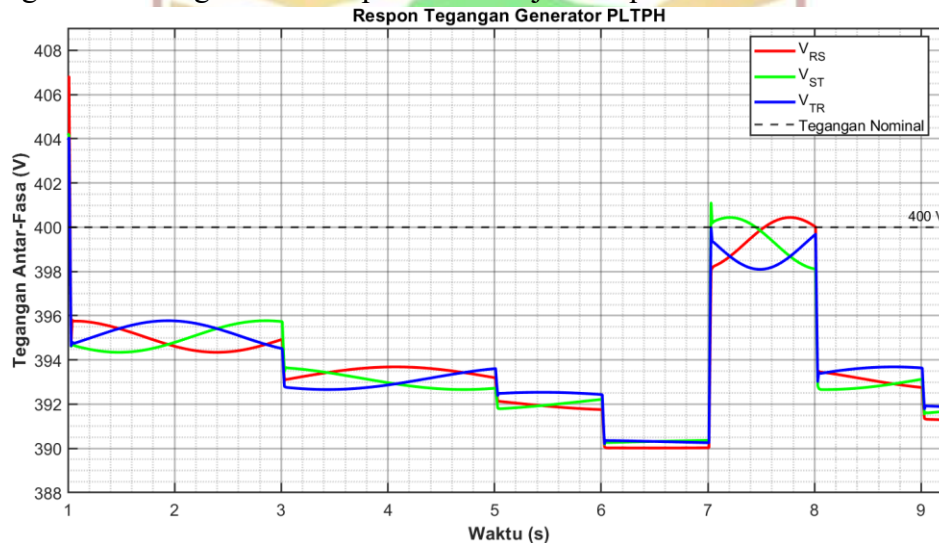
Berdasarkan Gambar 4.5, nilai SoC baterai pada awal simulasi berada pada kisaran 45,95% dan cenderung konstan hingga sekitar $t = 1$ detik. Setelah sistem mulai beroperasi, SoC baterai mengalami peningkatan secara bertahap yang menunjukkan bahwa baterai berada pada kondisi pengisian (*charging*). Kenaikan SoC berlangsung secara kontinu tanpa mengalami penurunan, sehingga menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan generator digunakan untuk mengisi baterai karena tidak terdapat beban utama yang menyerap daya keluaran sistem. Selama interval pengamatan, SoC meningkat dari sekitar 45,95% menjadi sekitar 46,01%. Meskipun peningkatan yang terjadi relatif kecil, kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses pengisian baterai berlangsung secara stabil sesuai dengan daya pengisian yang diberikan oleh sistem. Tidak adanya fluktuasi maupun

penurunan SoC mengindikasikan bahwa sistem manajemen energi bekerja dengan baik dalam mengatur proses pengisian baterai pada kondisi tanpa beban, sehingga energi yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan energi baterai.

4.3 Respon Sistem Pengujian Tanpa ELC

4.3.1 Respon Tegangan Keluaran Generator Tanpa ELC

Sistem PLTPH ini memiliki kemampuan pembangkitan sebesar 1000 Watt dengan Pengujian respon tegangan keluaran generator tanpa *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan generator ketika sistem mengalami perubahan beban tanpa adanya pengaturan daya oleh ELC. Pada kondisi ini, perubahan beban akan langsung memengaruhi kondisi kerja generator sehingga respon tegangan menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kemampuan generator mempertahankan kestabilan tegangan keluaran. Hasil respon tegangan keluaran generator tanpa ELC ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pembangkitan Tegangan PLTPH Tanpa ELC

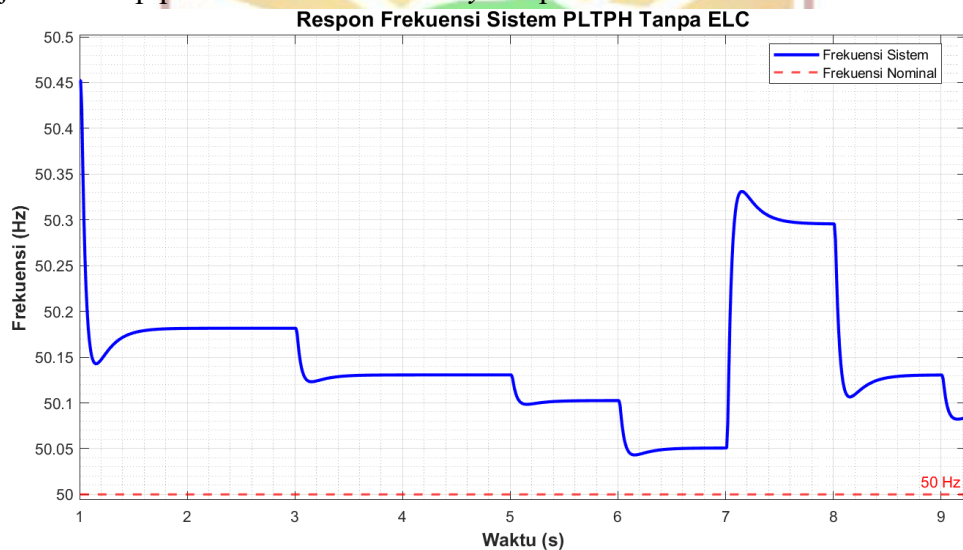
Berdasarkan Gambar 4.6, tegangan keluaran generator pada ketiga fasa (VRS, VST, dan VTR) mengalami perubahan mengikuti variasi pembebanan yang diberikan pada sistem. Pada awal pengamatan, tegangan berada pada kisaran 394–396 V, kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai sekitar 390 V pada interval waktu sekitar 6 detik. Penurunan tegangan tersebut menunjukkan bahwa perubahan beban secara langsung memengaruhi kemampuan generator dalam mempertahankan tegangan keluaran ketika sistem tidak dilengkapi dengan ELC.

Selanjutnya, pada sekitar $t = 7$ detik, terjadi kenaikan tegangan hingga mendekati nilai nominal 400 V, kemudian kembali mengalami penurunan ketika terjadi perubahan kondisi pembebanan berikutnya. Ketiga fasa menunjukkan pola perubahan yang relatif serupa sehingga keseimbangan sistem tiga fasa masih dapat

dipertahankan. Namun demikian, fluktuasi tegangan yang terjadi relatif lebih besar dibandingkan kondisi dengan ELC. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya ELC, tegangan keluaran generator lebih sensitif terhadap perubahan beban karena tidak terdapat mekanisme pengaturan daya yang mampu menjaga keseimbangan antara daya yang dibangkitkan generator dan daya yang diserap oleh beban. Akibatnya, kestabilan tegangan generator menjadi lebih mudah terganggu ketika terjadi perubahan beban pada sistem.

4.3.2 Respon Frekuensi Tanpa ELC

Hubungan antara respon frekuensi dan daya beban dianalisis untuk mengamati karakteristik keseimbangan daya pada sistem PLTPH terhadap perubahan waktu. Analisis ini bertujuan menunjukkan keterkaitan dinamis antara frekuensi sistem dan daya generator sebagai karakteristik dasar sistem pembangkit berbasis *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) sebelum dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap performa kontroler *Fuzzy-PI* pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Respon frekuensi tanpa Menggunakan ELC

Berdasarkan Gambar 4.7, respons frekuensi sistem pada kondisi tanpa ELC menunjukkan bahwa frekuensi generator mengalami perubahan pada saat awal proses simulasi. Frekuensi nominal sistem ditetapkan sebesar 50 Hz, yang ditunjukkan oleh garis putus-putus berwarna merah.

Pada awal simulasi, frekuensi mengalami transien yang cukup besar, yaitu frekuensi turun hingga sekitar 48,5 Hz, kemudian meningkat secara cepat hingga

tidak mencapai sekitar 50,5 Hz. Setelah melewati kondisi transien awal tersebut, frekuensi mulai bergerak mendekati nilai nominal 50 Hz. Kondisi ini menunjukkan bahwa generator membutuhkan waktu untuk mencapai kondisi operasi yang stabil setelah proses awal pembangkitan.

Setelah sekitar 1 detik, frekuensi relatif berada di sekitar nilai nominal 50 Hz. Namun, masih terlihat beberapa perubahan kecil pada respons frekuensi. Pada

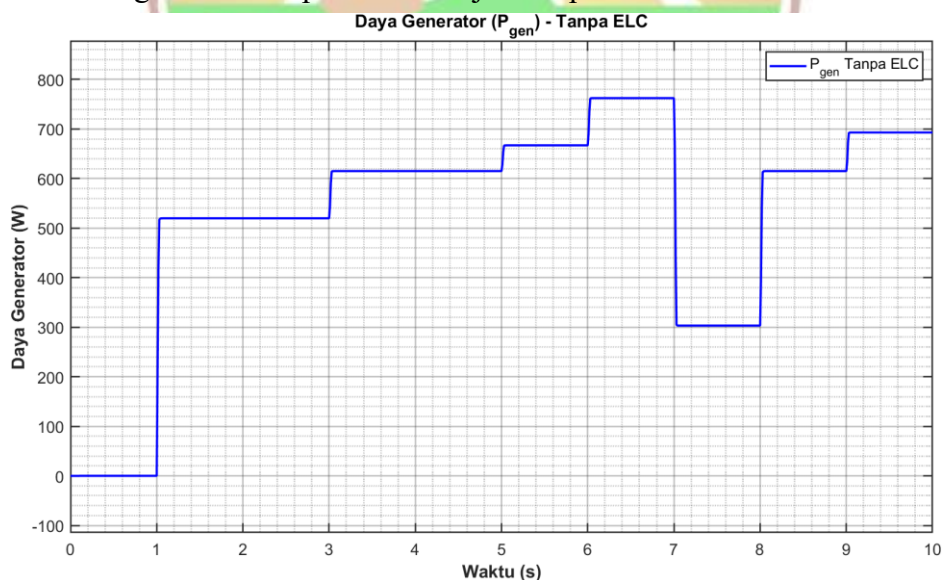
sekitar 3–6 detik, frekuensi sedikit berada di bawah nilai nominal. Kemudian, sekitar 7 detik, frekuensi mengalami kenaikan sesaat hingga sedikit di atas 50 Hz sebelum kembali mendekati nilai nominal.

Secara keseluruhan, respons frekuensi sistem tanpa ELC menunjukkan bahwa sistem memiliki respons transien pada awal simulasi, tetapi setelah kondisi awal terlewati, frekuensi dapat dipertahankan relatif dekat dengan nilai nominal 50 Hz. Fluktuasi yang terjadi setelah kondisi transien awal relatif kecil, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem memiliki kemampuan untuk kembali menuju kondisi operasi normal setelah mengalami perubahan kondisi.

Dengan demikian, pengujian tanpa beban menunjukkan bahwa sistem generator PLTPH mampu mencapai kondisi operasi mendekati frekuensi nominal 50 Hz setelah mengalami transien pada awal simulasi. Respons ini selanjutnya digunakan sebagai kondisi awal untuk menganalisis pengaruh masuknya beban utama serta penerapan *Electronic Load Controller* (ELC) terhadap kestabilan frekuensi sistem.

4.3.3 Respon Daya Keluaran Generator Tanpa ELC

Pengujian respon daya keluaran generator tanpa menggunakan *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengetahui perubahan daya generator ketika sistem hanya melayani beban utama. Pada kondisi ini, generator tidak memiliki mekanisme pengendalian kelebihan daya sehingga seluruh perubahan daya keluaran mengikuti perubahan beban utama secara langsung. Hasil respon daya keluaran generator tanpa ELC ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Daya Generator Tanpa ELC

Berdasarkan Gambar 4.8, daya keluaran generator mengalami perubahan yang mengikuti variasi beban utama selama simulasi. Pada awal pengujian (0–1 s), daya generator masih bernilai 0 W karena sistem belum beroperasi. Setelah

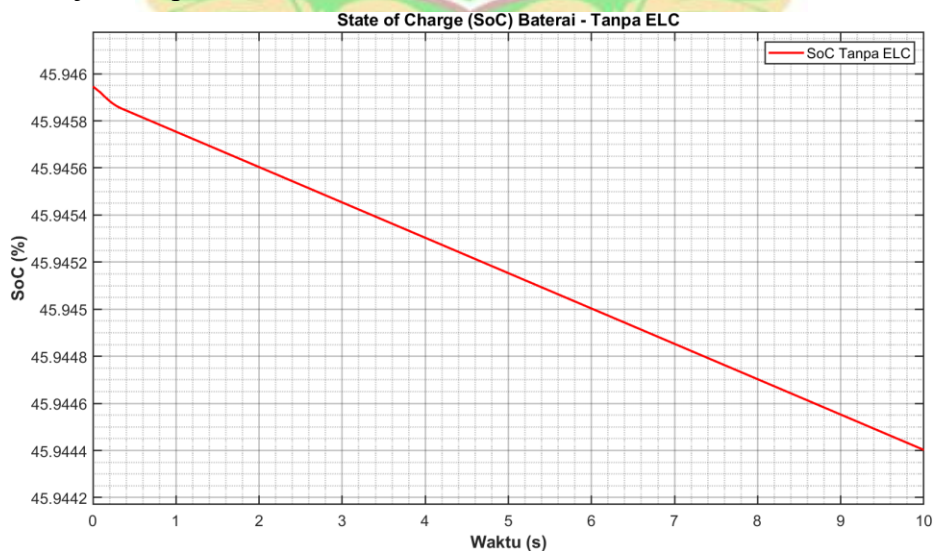
generator mulai bekerja pada sekitar $t = 1$ s, daya meningkat menjadi sekitar 520 W. Selanjutnya, daya generator meningkat secara bertahap menjadi sekitar 620 W pada $t = 3$ s, kemudian naik kembali menjadi sekitar 670 W pada $t = 5$ s, dan mencapai nilai maksimum sekitar 760 W pada $t = 6$ s.

Pada $t = 7$ s, daya generator mengalami penurunan yang cukup besar hingga sekitar 310 W akibat berkurangnya beban utama yang harus dilayani. Setelah itu daya kembali meningkat menjadi sekitar 620 W pada $t = 8$ s dan mencapai sekitar 700 W pada $t = 9$ s hingga akhir simulasi. Perubahan daya yang terjadi menunjukkan bahwa tanpa ELC, daya keluaran generator sepenuhnya mengikuti perubahan beban utama sehingga generator bekerja pada titik operasi yang berubah-ubah sesuai kondisi pembebanan.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem tanpa ELC belum mampu mempertahankan daya keluaran generator pada nilai yang konstan. Setiap perubahan beban utama secara langsung menyebabkan perubahan daya generator, sehingga kondisi operasi generator menjadi kurang stabil dibandingkan sistem yang telah dilengkapi dengan ELC. Hal ini menunjukkan pentingnya penerapan ELC untuk menjaga kestabilan daya generator dengan menyerap kelebihan daya ketika beban utama berubah.

4.3.4 Respon SoC Batrai Tanpa ELC

Pengujian respon *State of Charge* (SoC) baterai tanpa menggunakan *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengetahui perubahan kapasitas baterai pada sistem PLTPH ketika ELC tidak digunakan sebagai pengatur kelebihan daya generator. Pada kondisi ini, proses pengisian (*charging*) maupun pengosongan (*discharging*) baterai hanya dipengaruhi oleh kondisi daya yang tersedia dari generator dan kebutuhan daya sistem. Hasil respon SoC baterai tanpa ELC ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Respon SoC Tanpa ELC

Berdasarkan Gambar 4.9, nilai SoC baterai pada awal simulasi berada pada kondisi awal yang telah ditentukan dan menunjukkan perubahan secara bertahap selama proses simulasi. Ketika generator menghasilkan daya lebih besar daripada kebutuhan sistem, baterai mengalami proses pengisian sehingga nilai SoC meningkat secara perlahan. Sebaliknya, apabila daya yang dihasilkan generator tidak mencukupi kebutuhan beban, baterai akan menyuplai daya ke sistem sehingga nilai SoC mengalami penurunan. Tanpa adanya ELC, perubahan SoC baterai sangat bergantung pada kondisi operasi generator dan variasi beban yang terjadi. Tidak terdapat mekanisme pengaturan kelebihan daya sehingga energi yang tersedia tidak dapat dikelola secara optimal. Akibatnya, proses pengisian baterai menjadi kurang efektif dibandingkan sistem yang telah menggunakan ELC. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanpa ELC, pemanfaatan energi yang dihasilkan generator belum optimal karena tidak seluruh kelebihan daya dapat dimanfaatkan untuk mempertahankan atau meningkatkan kapasitas penyimpanan energi pada baterai.

4.4 Respon Sistem Saat Fase Pengujian Menggunakan ELC

Fase pengujian utama menggunakan ELC merupakan tahap evaluasi utama terhadap kinerja sistem PLTPH setelah sistem melewati fase transien awal dan mencapai kondisi operasi yang lebih stabil. Fase ini dimulai sekitar detik ke-1, ketika generator telah beroperasi pada kondisi nominal dan beban telah terhubung ke sistem.

Pada fase ini, kontroler *Fuzzy-PI* bekerja secara aktif untuk menjaga kestabilan frekuensi dan keseimbangan daya pada sistem. Mekanisme pengendalian dilakukan dengan mengatur *duty cycle* PWM pada sistem penyimpanan energi sehingga aliran daya antara generator, baterai, dan beban dapat dikendalikan secara dinamis sesuai kondisi operasi sistem.

Selama pengujian utama berlangsung, sistem mengalami variasi beban sesuai profil beban harian yang telah dirancang pada tahap simulasi. Variasi beban tersebut menyebabkan perubahan kebutuhan daya yang secara langsung memengaruhi respon frekuensi dan daya generator. Oleh karena itu, kemampuan kontroler dalam meredam deviasi frekuensi dan menjaga kestabilan sistem menjadi fokus utama pada tahap ini.

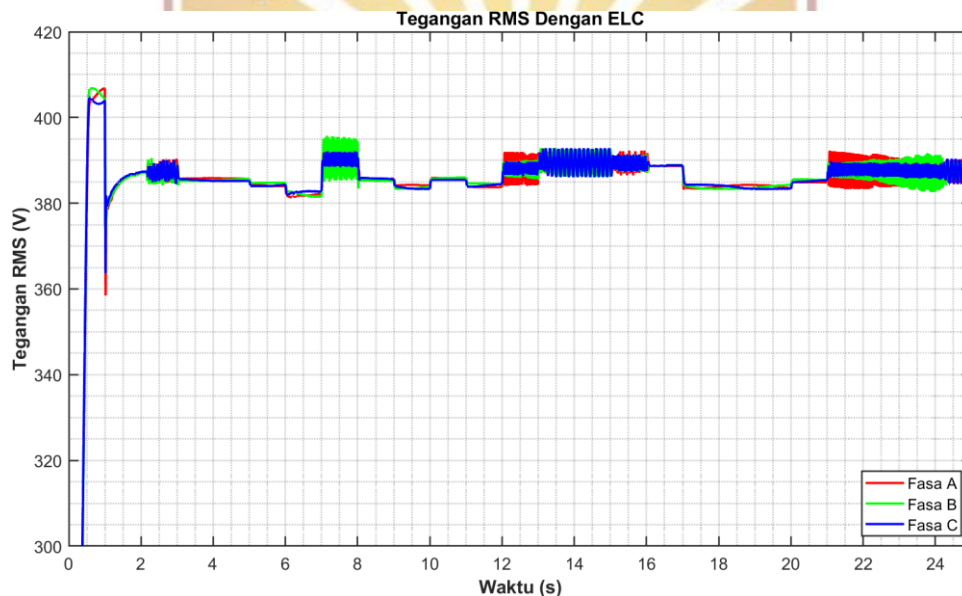
Ketika terjadi peningkatan beban, frekuensi sistem cenderung mengalami penurunan akibat bertambahnya kebutuhan daya pada sisi beban. Sebaliknya, saat beban menurun, sistem berpotensi mengalami kondisi kelebihan daya yang dapat menyebabkan kenaikan frekuensi. Pada kondisi tersebut, kontroler *Fuzzy-PI* memberikan aksi kendali dengan menyesuaikan aliran daya pada sistem penyimpanan energi untuk mempertahankan frekuensi tetap berada di sekitar nilai referensi 50 Hz.

Respon sistem pada fase pengujian utama digunakan sebagai dasar evaluasi performa kontroler, meliputi kemampuan sistem dalam menekan deviasi frekuensi, mempercepat waktu pemulihan (*settling time*), mengurangi *overshoot*, serta

mempertahankan *steady-state error* pada nilai yang kecil. Dengan demikian, fase ini menjadi indikator utama keberhasilan penerapan metode *Fuzzy-PI* pada sistem PLTPH.

4.4.1 Respon Tegangan PLTPH yang sudah Terintegrasi ELC

Pengujian respon tegangan PLTPH yang telah terintegrasi dengan *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan keluaran generator selama terjadi perubahan beban pada sistem. Pada kondisi ini, ELC berfungsi mengatur daya yang diserap sehingga keseimbangan antara daya yang dibangkitkan generator dan daya yang dikonsumsi beban tetap terjaga. Dengan demikian, fluktuasi tegangan akibat perubahan beban diharapkan dapat diminimalkan. Hasil respon tegangan generator setelah diintegrasikan dengan ELC ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Respon Tegangan PLTPH dengan ELC

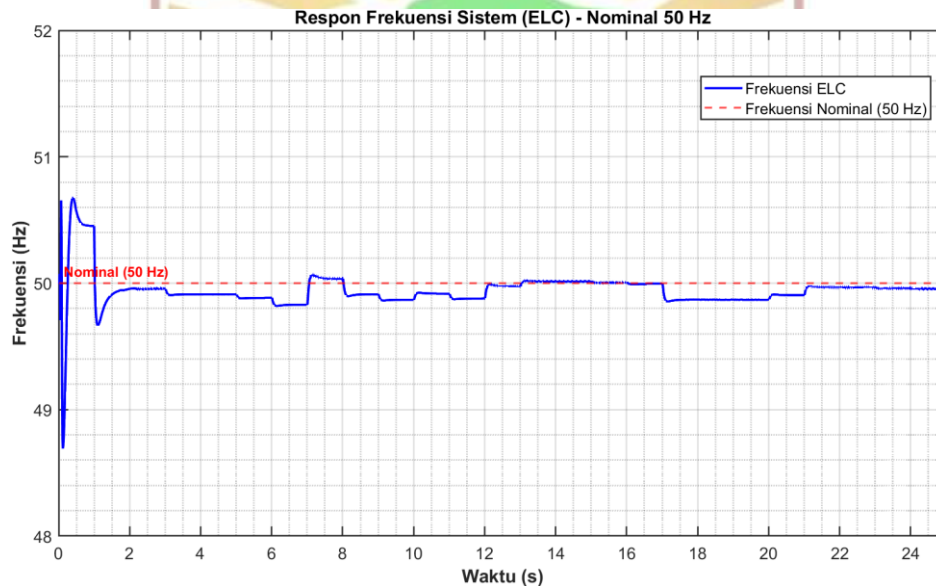
Berdasarkan Gambar 4.10, tegangan RMS ketiga fasa (Fasa A, Fasa B, dan Fasa C) mengalami respon transien pada awal simulasi sebelum mencapai kondisi operasi. Setelah sistem mulai bekerja, tegangan sempat mengalami penurunan sesaat hingga sekitar 380 V, kemudian secara bertahap kembali menuju kondisi stabil. Selama proses perubahan beban pada beberapa interval waktu, seperti sekitar 7 s, 13 s, 15 s, 21 s, dan 24 s, tegangan mengalami fluktuasi kecil yang menunjukkan adanya respon sistem terhadap perubahan daya yang terjadi.

Meskipun terjadi perubahan beban selama simulasi, tegangan keluaran generator tetap dapat dipertahankan pada kisaran 385–390 V dengan penyimpangan yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa ELC mampu mengatur penyerapan daya secara cepat sehingga perubahan beban tidak menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan. Selain itu, ketiga fasa tetap menunjukkan pola respon

yang hampir seimbang, sehingga kualitas tegangan sistem tetap terjaga. Dibandingkan kondisi tanpa ELC, integrasi ELC memberikan respon tegangan yang lebih stabil karena mampu mengurangi fluktuasi tegangan akibat perubahan beban dan menjaga kontinuitas operasi generator PLTPH.

4.4.2 Respon Frekuensi PLTPH dengan ELC

Pengujian respon frekuensi sistem yang telah terintegrasi dengan *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan ELC dalam menjaga kestabilan frekuensi generator ketika terjadi perubahan beban pada sistem PLTPH. Pada kondisi ini, ELC bekerja dengan menyerap atau mengurangi daya secara otomatis sehingga keseimbangan antara daya yang dibangkitkan generator dan daya yang dikonsumsi beban tetap terjaga. Dengan demikian, frekuensi sistem diharapkan tetap berada di sekitar nilai nominal 50 Hz meskipun terjadi perubahan beban selama operasi. Hasil respon frekuensi sistem dengan ELC ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Respon Frekuensi dengan ELC

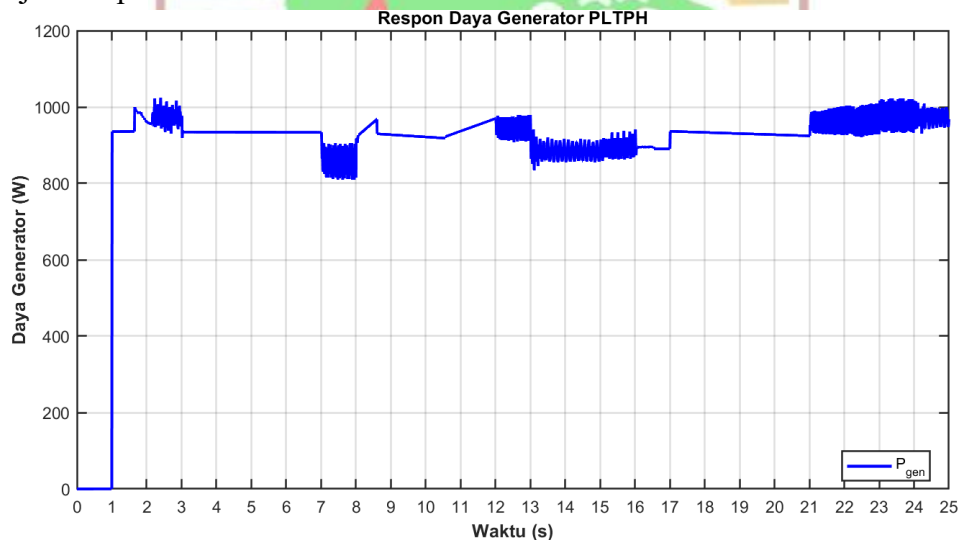
Berdasarkan Gambar 4.11, frekuensi sistem mengalami respon transien pada awal simulasi akibat proses awal pembangkitan daya generator. Frekuensi sempat turun hingga sekitar 48,7 Hz, kemudian meningkat mencapai sekitar 50,7 Hz sebelum secara bertahap menuju kondisi yang lebih stabil. Respon tersebut merupakan karakteristik awal sistem sebelum ELC mulai mengatur keseimbangan daya pada generator.

Setelah kondisi transien berlalu, frekuensi sistem mampu dipertahankan sangat dekat dengan frekuensi nominal 50 Hz, meskipun terjadi beberapa perubahan beban pada interval waktu sekitar 3 s, 6 s, 7 s, 8 s, 12 s, 17 s, dan 20 s. Setiap perubahan beban hanya menyebabkan deviasi frekuensi yang relatif kecil, yaitu berkisar antara 49,85 Hz hingga 50,05 Hz, dan frekuensi kembali menuju nilai

nominal dalam waktu yang singkat. Hal ini menunjukkan bahwa ELC mampu merespons perubahan beban secara efektif dengan menjaga keseimbangan daya generator, sehingga fluktuasi frekuensi menjadi lebih kecil dibandingkan sistem tanpa ELC. Dengan demikian, integrasi ELC terbukti meningkatkan kestabilan frekuensi operasi PLTPH serta mempertahankan kualitas daya sesuai standar sistem tenaga listrik.

4.4.3 Respon Daya Keluaran Generator dengan ELC

Pengujian respon daya keluaran generator setelah diintegrasikan dengan *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan keseimbangan daya ketika terjadi perubahan beban utama. Pada kondisi ini, ELC berfungsi menyerap kelebihan daya generator ketika beban utama menurun dan mengurangi daya yang diserap ketika beban utama meningkat. Dengan mekanisme tersebut, daya yang dihasilkan generator tetap berada pada kisaran operasi yang stabil sehingga perubahan beban tidak langsung memengaruhi kondisi kerja generator. Hasil respon daya keluaran generator dengan ELC ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Respon Daya Generator dengan ELC

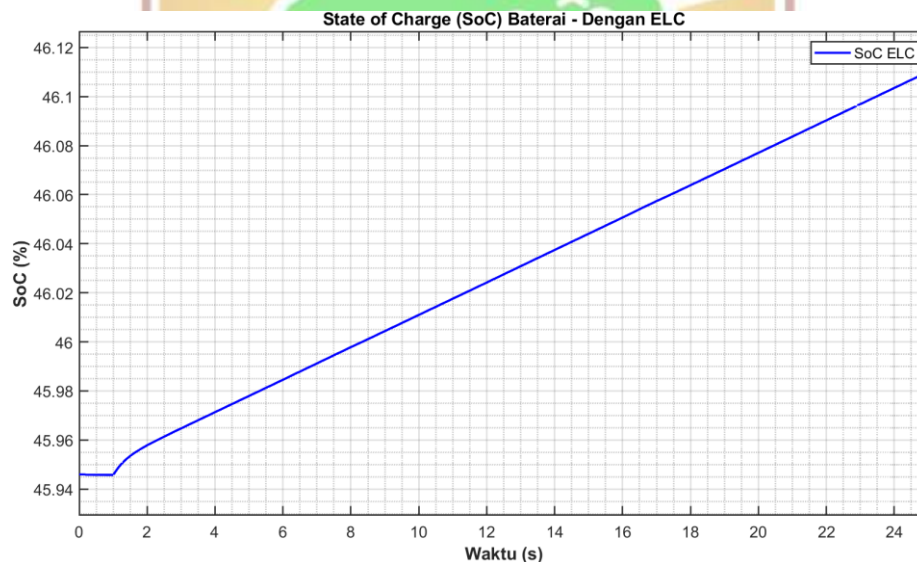
Berdasarkan Gambar 4.12, daya keluaran generator meningkat hingga sekitar 930 W pada awal operasi ketika generator mulai menghasilkan daya. Selanjutnya, daya generator mengalami beberapa perubahan mengikuti variasi beban utama yang terjadi selama simulasi. Pada interval sekitar 2–3 s, 7–8 s, 12–16 s, dan 21–25 s, terlihat adanya fluktuasi daya yang merupakan respon generator terhadap perubahan beban serta proses pengaturan daya oleh ELC. Meskipun demikian, perubahan tersebut tetap berada pada kisaran yang relatif stabil dibandingkan perubahan daya yang terjadi pada sistem tanpa ELC.

Selama pengujian, daya generator mampu dipertahankan pada kisaran 900–1000 W, dengan nilai rata-rata mendekati 950 W. Hal ini menunjukkan bahwa ELC

berhasil menjaga generator tetap bekerja pada daya yang relatif konstan meskipun terjadi perubahan beban pada sistem. Fluktuasi yang masih terlihat merupakan respon dinamis pengendalian ELC dalam menyesuaikan penyerapan daya secara cepat agar keseimbangan daya tetap terjaga. Dengan demikian, integrasi ELC mampu meningkatkan kestabilan daya keluaran generator, mengurangi perubahan daya yang signifikan akibat variasi beban, serta menjaga operasi PLTPH tetap stabil dan andal.

4.4.4 Analisis Respon SoC dengan ELC

Pengujian respon *State of Charge* (SoC) baterai pada sistem PLTPH yang telah terintegrasi dengan *Electronic Load Controller* (ELC) dilakukan untuk mengetahui perubahan kapasitas baterai selama sistem beroperasi dengan pengaturan daya oleh ELC. Pada kondisi ini, kelebihan daya yang tidak digunakan oleh beban akan dimanfaatkan untuk proses pengisian (*charging*) baterai, sehingga energi yang dihasilkan generator dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Hasil respon SoC baterai dengan ELC ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Respon SoC Batrai dengan ELC

Berdasarkan Gambar 4.13, nilai SoC baterai pada awal simulasi berada pada kisaran 45,95% dan relatif konstan hingga sekitar $t = 1$ detik. Setelah sistem mulai beroperasi, SoC baterai meningkat secara bertahap yang menunjukkan bahwa baterai berada pada kondisi pengisian (*charging*). Peningkatan SoC berlangsung secara kontinu tanpa mengalami penurunan selama proses simulasi, yang menandakan bahwa daya berlebih dari generator berhasil dimanfaatkan untuk mengisi baterai melalui mekanisme pengaturan ELC.

Selama waktu simulasi, nilai SoC meningkat dari sekitar 45,95% menjadi sekitar 46,11%. Meskipun kenaikan SoC relatif kecil, peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses pengisian berlangsung secara stabil dan

berkesinambungan. Tidak adanya fluktuasi maupun penurunan SoC mengindikasikan bahwa sistem manajemen energi yang terintegrasi dengan ELC mampu mengatur aliran daya menuju baterai secara optimal. Dengan demikian, integrasi ELC tidak hanya menjaga kestabilan tegangan, frekuensi, dan daya generator, tetapi juga meningkatkan efektivitas pemanfaatan energi dengan menyimpan kelebihan daya ke dalam baterai sehingga mendukung keandalan operasi sistem PLTPH.

4.5 Analisis Perubahan Daya dan Frekuensi pada Sistem PLTPH

Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis hubungan antara perubahan daya beban dengan respon frekuensi sistem PLTPH yang telah terintegrasi dengan *Electronic Load Controller* (ELC). Pada pengujian ini, variasi daya beban diberikan secara bertahap untuk mengetahui kemampuan ELC dalam mempertahankan frekuensi sistem tetap berada di sekitar nilai nominal 50 Hz. Hasil perbandingan antara perubahan daya beban dan respon frekuensi sistem ditunjukkan pada Gambar 4.X.



Gambar 4. 14 Perbandingan Beban Utama dan Frekuensi PLTP

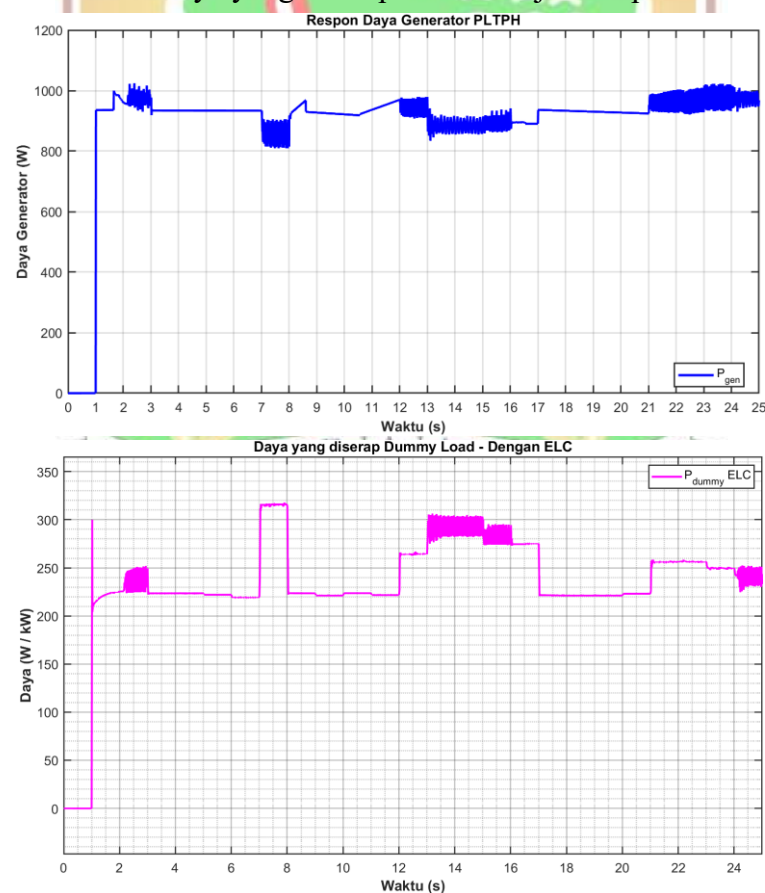
Berdasarkan Gambar 4.14, perubahan daya beban menyebabkan respon frekuensi sistem berubah mengikuti kondisi pembebanan. Pada awal simulasi, frekuensi mengalami respon transien dengan penurunan hingga sekitar 48,7 Hz dan kenaikan mencapai sekitar 50,7 Hz sebelum sistem mencapai kondisi operasi. Setelah ELC mulai bekerja, frekuensi secara bertahap kembali mendekati nilai nominal 50 Hz. Setiap perubahan daya beban, baik kenaikan maupun penurunan, hanya menghasilkan deviasi frekuensi yang relatif kecil, kemudian frekuensi kembali stabil dalam waktu yang singkat.

Pada saat daya beban meningkat hingga mendekati 800–900 W, frekuensi sistem mengalami sedikit penurunan akibat bertambahnya daya yang harus disuplai generator. Sebaliknya, ketika daya beban menurun, frekuensi cenderung mengalami

kenaikan kecil karena terdapat kelebihan daya pada generator. Namun, melalui mekanisme pengaturan ELC, kelebihan daya tersebut segera diserap sehingga frekuensi kembali berada di sekitar 50 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa ELC mampu menjaga keseimbangan antara daya yang dibangkitkan generator dan daya yang dikonsumsi beban, sehingga perubahan daya beban tidak menyebabkan fluktuasi frekuensi yang signifikan. Dengan demikian, sistem PLTPH yang telah terintegrasi dengan ELC memiliki kemampuan yang baik dalam mempertahankan kestabilan frekuensi meskipun terjadi variasi beban selama proses operasi.

4.5.1 Analisis Daya Keluaran Generator dan Daya yang diserap Oleh ELC

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara daya keluaran generator dengan daya yang diserap oleh *Electronic Load Controller* (ELC) selama terjadi perubahan beban pada sistem PLTPH. Pada kondisi ini, ELC berfungsi sebagai beban semu (*dummy load*) yang akan menyerap kelebihan daya generator ketika daya yang dibutuhkan oleh beban utama berkurang. Sebaliknya, ketika beban utama meningkat, daya yang diserap ELC akan dikurangi sehingga daya generator dapat dialihkan untuk memenuhi kebutuhan beban utama. Hasil respon daya keluaran generator dan daya yang diserap ELC ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Respon Hubungan Daya Generator dan Daya yang diserap ELC

Berdasarkan Gambar 4.15, daya keluaran generator selama pengujian berada pada kisaran 900–1000 W dengan perubahan yang relatif kecil meskipun terjadi variasi beban. Pada awal simulasi, daya generator meningkat hingga sekitar 930 W dan selanjutnya mengalami beberapa perubahan mengikuti kondisi pembebanan sistem. Namun demikian, perubahan tersebut tidak terlalu signifikan sehingga menunjukkan bahwa generator tetap bekerja pada daerah operasi yang relatif konstan.

Sementara itu, berdasarkan perbandingan yang terlihat bahwa daya yang diserap oleh ELC berubah secara dinamis mengikuti perubahan beban utama. Ketika kebutuhan daya beban utama menurun, daya yang diserap ELC meningkat hingga mencapai sekitar 300 W, sedangkan ketika beban utama meningkat, daya yang diserap ELC berkurang hingga berada pada kisaran 220–250 W. Perubahan daya yang diserap ELC tersebut menunjukkan bahwa ELC secara aktif menyesuaikan besarnya daya yang dibuang ke *dummy load* untuk menjaga keseimbangan antara daya yang dibangkitkan generator dan daya yang digunakan oleh beban.

Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa perubahan daya yang diserap oleh ELC berbanding terbalik dengan kebutuhan daya beban utama, sedangkan daya keluaran generator tetap dipertahankan pada nilai yang relatif konstan. Hal ini membuktikan bahwa ELC mampu mengendalikan kelebihan daya generator secara efektif sehingga generator tidak mengalami perubahan pembebanan yang besar. Dengan demikian, integrasi ELC mampu meningkatkan kestabilan operasi PLTPH, menjaga daya keluaran generator tetap konstan, serta mendukung kestabilan tegangan dan frekuensi sistem selama terjadi perubahan beban.

4.5.2 Konsep *Quasi Steady State* Pada Sistem PLTPH

Pada operasi jangka panjang, sistem PLTPH tidak mencapai kondisi *steady-state* absolut, melainkan berada pada kondisi *quasi steady-state*. Pada kondisi ini, frekuensi sistem terus mengalami fluktuasi kecil di sekitar nilai referensi 50 Hz sebagai respon terhadap perubahan beban yang berlangsung secara dinamis dan terus-menerus selama operasi sistem.

Kondisi *quasi steady-state* merupakan karakteristik umum pada sistem pembangkitan skala kecil, terutama pada sistem *off-grid* yang melayani beban rumah tangga dengan pola konsumsi daya yang berubah-ubah. Variasi beban menyebabkan keseimbangan daya antara generator dan beban selalu mengalami perubahan, sehingga frekuensi sistem tidak dapat berada pada nilai konstan secara absolut seperti pada sistem dengan beban tetap.

Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa fluktuasi frekuensi yang terjadi tetap berada dalam rentang toleransi yang diperbolehkan. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PI* mampu menjaga kestabilan daya sistem secara berkelanjutan dengan mengatur aliran daya pada sistem penyimpanan energi sesuai kondisi operasi yang terjadi.

Pada kondisi beban meningkat, kontroler memberikan aksi kendali untuk membantu menjaga keseimbangan daya sehingga penurunan frekuensi dapat diminimalkan. Sebaliknya, ketika terjadi kondisi kelebihan daya, kontroler mengalihkan energi berlebih agar frekuensi sistem tidak mengalami kenaikan yang berlebihan. Mekanisme ini menyebabkan frekuensi sistem tetap berosilasi kecil di sekitar nilai referensi tanpa menunjukkan kecenderungan ketidakstabilan.

Dengan demikian, evaluasi kestabilan sistem pada operasi jangka panjang tidak didasarkan pada tercapainya frekuensi yang benar-benar konstan, melainkan pada kemampuan sistem dalam mempertahankan frekuensi tetap berada pada rentang toleransi selama periode operasi yang panjang. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem PLTPH yang dikendalikan menggunakan metode *Fuzzy-PI* memiliki karakteristik operasi yang stabil dan adaptif terhadap perubahan beban secara kontinu.

4.5.3 Evaluasi Kestabilan daya dan peran kontroler *Fuzzy – PI*

Pada operasi jangka panjang, kontroler *Fuzzy-PI* berperan sebagai sistem manajemen daya yang bekerja secara kontinu untuk menjaga keseimbangan daya antara pembangkitan, sistem penyimpanan energi, dan beban pada sistem PLTPH.

Ketika terjadi perubahan beban, kontroler *Fuzzy-PI* secara adaptif menyesuaikan sinyal kendali berupa *duty cycle* PWM untuk mengurangi ketidakseimbangan daya pada sistem. Mekanisme ini memungkinkan sistem untuk meredam fluktuasi frekuensi tanpa menghasilkan osilasi yang berlebihan maupun ketidakstabilan selama operasi berlangsung.

Berdasarkan hasil simulasi, frekuensi sistem secara dominan tetap berada di sekitar nilai referensi 50 Hz dan masih berada dalam rentang toleransi yang diperbolehkan. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PI* mampu menjaga kestabilan daya sistem secara konsisten meskipun sistem bekerja di bawah variasi beban yang berlangsung secara terus-menerus.

Selain itu, kontroler *Fuzzy-PI* tidak hanya mampu merespons gangguan sesaat, tetapi juga mampu mempertahankan kestabilan sistem dalam operasi jangka panjang. Karakteristik ini menunjukkan bahwa metode *Fuzzy-PI* memiliki kemampuan adaptif yang baik terhadap perubahan kondisi operasi sistem PLTPH.

Frekuensi sistem yang tetap stabil tanpa adanya kecenderungan drift atau penyimpangan berkepanjangan menunjukkan bahwa proses penyeimbangan daya berlangsung dengan baik. Dengan demikian, kontroler *Fuzzy-PI* berhasil menjalankan fungsi pengendalian secara efektif dalam menjaga kestabilan daya dan frekuensi sistem selama operasi berkelanjutan.