

Sistem SCADA Standar MODBUS pada Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Yusuf Sofyan¹, Sofy Fitriani², Muhamad Irfan Nurdin³

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jalan Geger Kalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat 40559, Indonesia

²Jurusan Teknik Komputer, Politeknik Negeri Bandung

Jalan Geger Kalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat 40559, Indonesia

³Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung

Jalan Geger Kalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat 40559, Indonesia

sofyfitriani@polban.ac.id

Abstrak

Remote Terminal Unit (RTU) adalah alat kontrol yang penting dalam industri ketenagalistrikan, memfasilitasi berbagai pekerjaan termasuk pengendalian Sistem Pembangkit Tenaga Listrik (SPTL). Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan pengendalian Simulator SPTL dengan menggunakan sistem *Supervisory Control And Data Acquisition* dan *Distributed Control System* (SCADA dan DCS). RTU dapat dihubungkan dengan *Master Terminal Unit (MTU)* yang dilengkapi dengan perangkat lunak *Human Machine Interface (HMI)*. Kelebihannya termasuk pemantauan proses secara *real-time*, *alarm history*, keamanan, dan ringkasan yang memungkinkan pemantauan dan analisis yang efisien. RTU yang digunakan adalah jenis Generik (Gecon) dengan pengembangan software HMI menggunakan Visual Studio. Penggunaan RTU dan HMI diharapkan dapat meningkatkan kinerja simulator SPTL. Sistem yang dibangun ini terdiri atas beberapa komponen utama yaitu *Variable Speed Driver (VSD)*, motor elektrik, generator, *Automatic Voltage Regulator (AVR)*, F/V Controller, *dummy load*, sensor dan meter, RTU, dan *communication media*. Hasil pengujian operasi menunjukkan bahwa sistem telah bekerja sesuai dengan rancangan tanpa adanya kendala maupun bug yang terjadi. Kemudian berdasarkan hasil pengujian sistem dengan pembebanan bertahap dari 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% menunjukkan bahwa secara umum sistem telah bekerja dengan baik, di mana transisi dari *dummy load* ke main load berfungsi dengan baik tanpa adanya sisa beban yang tersimpan pada kedua sistem pembebanan. Stabilitas dari nilai frekuensi dan $\cos \phi$ juga menunjukkan nilai yang baik di mana selisih perbedaannya sangat kecil untuk frekuensi (sebesar 0,2 Hz), dan nilai $\cos \phi$ yang konsisten di angka 0,99.

Kata kunci: Sistem Pembangkit Tenaga Listrik, SCADA, DCS, MODBUS, RTU.

Abstract

Remote Terminal Unit (RTU) is a vital control tool in the electricity industry, facilitating various jobs, including controlling Electric Power Generation Systems (SPTL). This research aims to implement SPTL Simulator control using the Supervisory Control and Data Acquisition and Distributed Control System (SCADA and DCS). The RTU can be connected to a Master Terminal Unit (MTU) equipped with Human Machine Interface (HMI) software. The advantages include real-time process monitoring, alarm history, security, and summaries that enable efficient monitoring and analysis. The RTU used is the Generic type (Gecon) with HMI software development using Visual Studio. The use of RTU and HMI is expected to improve the performance of the SPTL simulator. The system consists of several components: Variable Speed Driver (VSD), electric motor, generator, automatic voltage regulator (AVR), F/V Controller, dummy load, sensors, meters, RTU, and communication media. The results of operational testing show that the system has worked according to design without any problems or bugs occurring. Then, based on the results of system testing with gradual loading from 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%, it shows that, in general, the system has worked well, where the transition from dummy load to main load functions well without any residual load stored in both loading systems. The stability of the frequency and $\cos \phi$ values also shows good values, where the difference is minimal for frequency (0.2 Hz), and the $\cos \phi$ value is consistent at 0.99.

Keywords: Electric Power Generation System, SCADA, DCS, MODBUS, RTU.

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi mempunyai dampak yang sangat signifikan dalam berbagai bidang sehingga banyak mempengaruhi sistem kinerja suatu mesin atau sistem di sebuah perusahaan dengan tujuan menghasilkan suatu kinerja yang lebih baik [1], [2]. Salah satu peralatan yang dapat meningkatkan kinerja tersebut adalah RTU, di mana perangkat ini dapat digunakan untuk mengendalikan suatu SPTL [3], [4], [5], [6].

Sistem tenaga listrik merupakan salah satu sistem kelistrikan terbesar di dunia [7]. Monitoring, proteksi dan kontrol merupakan hal yang wajib untuk dilakukan agar menghindari kesalahan dan kerugian yang ditimbulkan. Sistem Tenaga Listrik, suatu sistem yang terdiri dari komponen utamanya yaitu sistem Pembangkitan, sistem Transmisi, sistem Distribusi, dan Beban-beban Listrik[8], [9], [10], [11], [12], [13].

Simulator merupakan salah satu perangkat esensial dalam proses belajar mengajar dan pengembangan kemampuan mahasiswa maupun praktisi [14]. Salah satu sistem simulator yang diperlukan adalah SPTL untuk pengajaran di bidang pembangkit Listrik [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]. Fitur SCADA standar MODBUS juga menjadi parameter penting dalam simulator agar sehingga mahasiswa dan praktisi mengetahui bagaimana SPTL dapat saling dapat terhubung dan juga dapat dioperasikan secara remote menggunakan SCADA [6], [18], [21].

Blaabjerg et al, telah melakukan berbagai studi dan pengujian untuk mengetahui karakteristik dan mengevaluasi sistem *distributed power-generation systems and protection* (DPGS) untuk sistem pembangkit listrik tenaga surya (PV) dan pembangkit listrik tenaga angin (WT). Pengaplikasian sistem DPGS dapat meningkatkan ketangguhan juga kemudahan komunikasi dari kedua sistem, sehingga sistem menjadi lebih realibel dan mudah dalam monitoring [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Moreira et al, telah melakukan rancang bangun sebuah *simulator thermoelectric power plant*. Simulator ini menggunakan boiler untuk menghasilkan panas untuk dikonversi menjadi tenaga Listrik. Simulator ini dapat menghasilkan Listrik dari panas yang dihasilkan walaupun dengan efisiensi yang sangat rendah [18].

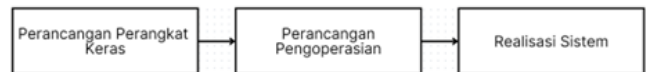
Duair et al, telah melakukan rancang bangun sebuah IoT based SCADA untuk *multi microgrid PV power generation system*. Sistem ini memanfaatkan ESP 32 sebagai RTU SCADA di mana data-data yang dimonitor dikirim ke MTU, Adapun sistem IoT

menggunakan protocol MQTT. Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan bahwa sistem ini menunjukkan hasil yang realibel dan biaya produksi yang terjangkau [21].

Penelitian yang diusulkan berfokus pada Sistem Pembangkit Tenaga Listrik, dimana akan dirancang bangun sebuah miniatur Sistem Pembangkit Tenaga Listrik skala laboratorium di mana dalam penelitian yang diusulkan akan dibuat sistem dari modul simulator SPTL berupa *hardware* sampai sistem monitoring *plant* yang ditampilkan di HMI, sehingga sistem SPTL yang akan dibuat menjadi sebuah sistem yang lengkap dan digunakan sebagai bahan praktik pada laboratorium.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini terbagi menjadi tiga tahapan, setiap tahapan dilakukan secara *linear*, di mana setiap tahapan dilakukan secara berurutan. Setiap tahapan harus melalu proses perancangan yang tepat tanpa kesalahan agar pada tahapan selanjutnya hasilnya menjadi tepat. Berikut adalah Gambar metode penelitian pada penelitian ini seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Metode Penelitian yang Digunakan

Tahapan pertama adalah perancangan perangkat keras di mana sistem SCADA dengan standar MODBUS dirancang untuk mensimulasikan SPTL. Selanjutnya dilakukan perancangan pengoperasian di mana sistem SCADA disusun sedemikian rupa sehingga langkah pengoperasiannya sesuai dengan SPTL pada umumnya. Terakhir adalah realisasi sistem. Pada tahap ini, sistem dibangun sesuai rancangan dan langkah pengoperasiannya.

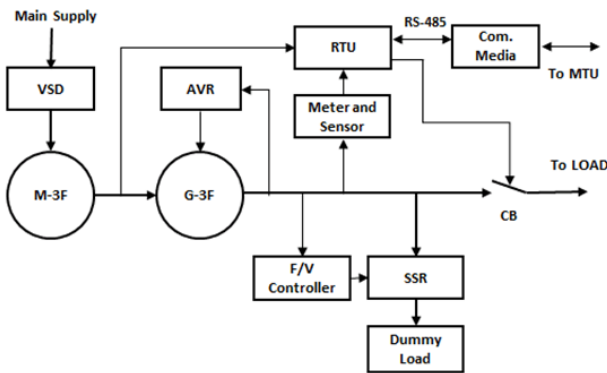
A. Perancangan Perangkat Keras

Sistem SPTL yang dirancang memiliki berbagai perangkat dimulai dari *main supply*, VSD, motor listrik, generator, AVR, F/V Controller, meter dan sensor, SSR, *dummy load*, RTU, dan *communication media*. Diagram blok dari sistem yang di buat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Fungsi-fungsi dari diagram blok sistem pada Gambar 1 adalah sebagai berikut:

1. *Main supply* adalah sumber listrik utama (PLN) untuk menggerakkan motor listrik melalui VSD.
2. *Variable Speed Drive* (VSD) adalah alat untuk mengatur operasi motor listrik dengan kecepatan dapat diatur (variabel).

- Motor listrik (M-3F) berfungsi untuk mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik (perputaran rotor).

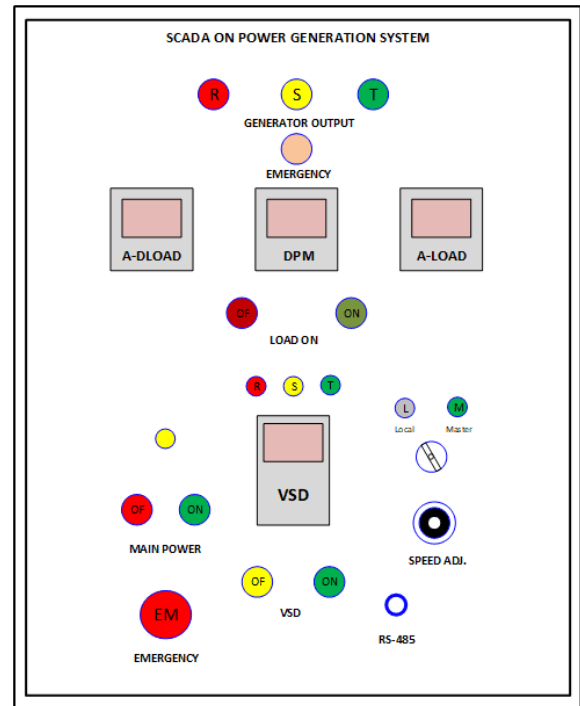


Gambar 2. Diagram blok sistem.

- Generator Listrik (G-3F) berfungsi untuk mengubah tenaga mekanik (perputaran rotor), menjadi tenaga listrik.
- Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah alat untuk mengatur atau stabilisasi tegangan output generator.
- F/V controller adalah alat yang digunakan untuk mengatur pembebanan generator agar rpm nya stabil.
- Solid state relay (SSR) adalah alat untuk mengendalikan (ON/OFF) beban yang diatur oleh F/V Controller.
- Dummy Load* adalah alat yang digunakan untuk pembebanan semu (bukan main load) saat proses stabilisasi rpm.
- Circuit Breaker* (CB) adalah alat yang digunakan untuk ON-OFF aliran daya dari generator ke Main load.
- Meter dan sensor adalah alat yang digunakan untuk proses pengukuran besaran listrik dan mekanik.
- Remote Terminal Unit* (RTU) adalah alat yang digunakan untuk komunikasi data antara SPTL dengan master terminal unit (MTU), saat pilihan mode operasi Remote.
- Communication Media* adalah alat atau komponen yang digunakan untuk menghubungkan secara perangkat keras antara RTU dengan MTU, dengan standar RS-485.

Hubungan dengan MTU menggunakan adapter USB to RS485, dimana alat ini berupa konverter komunikasi data dari USB ke standar RS485, yang berguna untuk menghubungkan secara perangkat keras antara MTU (PC) dengan RTU, sehingga nantinya komunikasi data antara PC dan RTU dapat berlangsung. Adapun perangkat MTU terdiri dari CPU, layar monitor, keyboard dan mouse, digunakan sebagai alat untuk mengembangkan perangkat lunak termasuk HMI dan nantinya digunakan sebagai MTU.

Panel kontrol pada sistem SPTL ini dirancang agar memudahkan pengguna dalam pengoperasian, pembacaan data, dan pemberhentian sistem jika terdapat situasi darurat (*emergency*). Berikut adalah rancangan dan gambar aktualisasi dari panel kontrol SPTL yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 3. Rancangan panel kontrol tampak depan

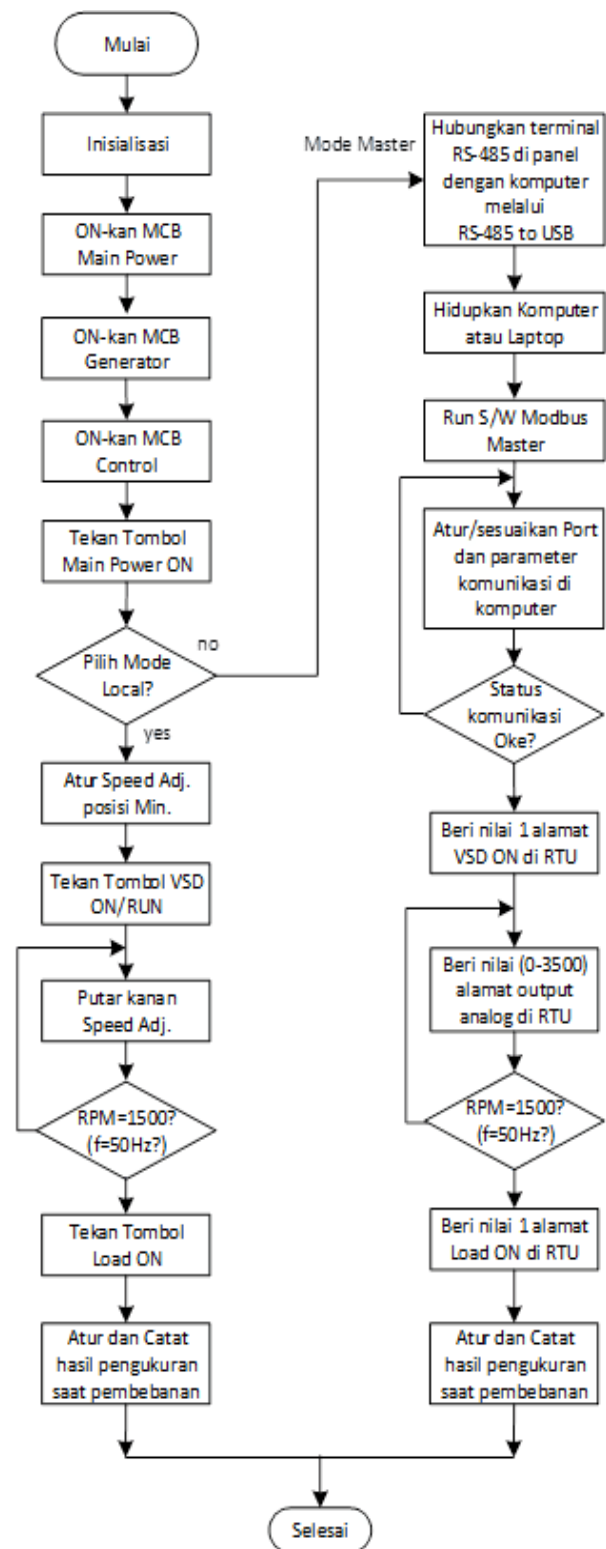
Penjelasan dari komponen-komponen yang terdapat pada panel kontrol SPTL di Gambar 2 adalah sebagai berikut:

- Lampu indikator R, S dan T, adalah lampu indikator 3 fasa untuk mengindikasikan bahwa tegangan *output* generator sudah aktif.
- Indikator *emergency*, adalah lampu indikator plus suara *buzzer* yang akan berfungsi secara teratur saat tombol *Emergency Stop* di aktifkan. Pada kondisi aktif semua proses dihentikan.
- Meter listrik A-Dload, adalah alat ukur arus listrik yang mengalir ke *dummy load*. Pada saat beban kecil atau Nol (No-load), maka arus listrik dari generator akan dialirkan seluruhnya ke *dummy load*, dan apa bila beban penuh (full load), maka arus yang menuju ke *dummy load* akan nol.
- Meter listrik DPM (*digital panel meter*), adalah alat ukur listrik multi fungsi yang dapat menampilkan hasil pengukuran tiga fasa: Tegangan, Arus, Cos phi, Daya nyata, Daya semu, dan Daya reaktif. Meter ini dihubungkan antara *output* generator dengan beban utama.

5. Meter listrik A-load, adalah alat ukur arus listrik yang mengalir ke beban utama. Meter ini dipasang untuk memudahkan untuk mengecek arus listrik yang menaglir ke beban utama, dan selanjutnya dibandingkan dengan arus yang mengalir ke *dummy load*.
6. Tombol OFF (merah), adalah tombol untuk meng-OFF-kan aliran listrik ke beban utama.
7. Tombol ON (hijau), adalah tombol untuk meng-ON-kan aliran listrik ke beban utama.
8. Lampu indikator R, S dan T, adalah lampu indikator 3 fasa untuk mengindikasikan bahwa tegangan dari sumber utama (PLN) sudah aktif, dan masuk ke modul VSD.
9. Tombol OFF (merah), adalah tombol untuk meng-OFF-kan aliran listrik ke VSD.
10. Tombol ON (hijau), adalah tombol untuk meng-ON-kan aliran listrik ke VSD, saat kondisi ON maka lampu indikator kuning di atas tombol tersebut akan menyala.
11. Modul VSD, adalah alat yang digunakan untuk mengendalikan motor listrik yang berfungsi sebagai prime mover. Dengan VSD motor yang dikendalikan, maka putarannya dapat di atur sesuai kebutuhan, hal ini diperlukan agar generator yang dikopel dengan motor ini dapat diatur frekuensi nya.
12. Tombol OFF (kuning), adalah tombol untuk meng-OFF-kan VSD.
13. Tombol ON (hijau), adalah tombol untuk meng-ON-kan VSD.
14. Lampu indikator L dan M, adalah indikator untuk menunjukkan posisi mode operasi apakah Local atau Master.
15. Sakelar Local-Master, adalah sakelar pilih yang digunakan untuk memilih mode operasi kontrol Local atau dari Master.
16. Knop Speed Adj, adalah knop putar yang berfungsi untuk mengatur input VSD agar kecepatan motor *prime mover* dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Putar kiri kecepatan akan turun dan putar kanan kecepatan semakin tinggi.
17. Tombol *Emergency Stop*, adalah tombol dipergunakan saat ada keadaan darurat. Dengan menekan tomol ini maka sistem akan berhenti total, dan alarm akan berbunyi. Untuk melakukan Reset, maka bagian depan tombol harus diputar ke kanan.
18. Konektor RS-485, adalah konektor untuk komunikasi data antara panel kontrol dengan komputer atau sistem SCADA lain. Standar komunikasi yang digunakan adalah Modbus RTU.

B. Perancangan Pengoperasian

Sistem pengoperasian SPTL dirancang sedemikian rupa agar proses operasi memenuhi kebutuhan dan dapat mensimulasikan gambaran SPTL skala besar. Berikut adalah proses rancangan operasi dari SPTL yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Diagram alir proses kerja sistem SPTL

C. Realisasi Sistem

Realisasi dari sistem SPTL dibuat berdasarkan rancangan yang diimplementasikan. Berikut adalah gambar panel tampak depan, dalam, modul ELC, dan peralatan pengujian sistem yang dapat dilihat pada Gambar 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. (a) Tampak depan panel, (b) Tampak dalam panel, (c) Modul ELC, dan (d) peralatan pengujian sistem SPTL

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Operasi

Pengujian operasi dilakukan pada dua mode, yaitu mode operasi dari simulator yang berupa Local dan Remote. Mode Local merupakan mode di mana sistem dioperasikan secara langsung melalui tombol dan sakelar yang terdapat pada panel kontrol. Mode Remote merupakan mode di mana sistem dioperasikan secara remote melalui perangkat komunikasi RS-485, PC, dan HMI atau MTU.

*Catatan: Pemilihan mode operasi antara Local dan Remote, secara perangkat keras dilakukan melalui sakelar pilihan mode operasi yang dipasang pada panel kontrol simulator. Hal tersebut dimaksudkan agar menghindari salah operasi, yaitu dioperasikan secara bersamaan baik dari Local maupun dari Remote.

Berikut adalah metode pengujian operasi yang dilakukan:

1. Urutan pengoperasian OFF mode Local :
 - OFF-kan pemutus tenaga Load.
 - Turunkan rpm generator secara perlahan, hingga = 0 (berhenti).
 - OFF-kan pemutus tenaga yang menuju VSD.
2. Urutan pengoperasian ON mode Remote:
 - Matikan semua pemutus tenaga pada simulator.

- Putar saklar mode operasi pada posisi Remote.
 - Periksa indikator main power apa sudah ON, bila ya berarti daya listrik sudah masuk dan operasi selanjutnya bisa dilaksanakan dan lanjutkan langkah no.4.
 - ON-kan MTU dan running HMI, dan melalui HMI lakukan langkah selanjutnya.
 - ON-kan pemutus tenaga VSD.
 - Atur rpm generator secara perlahan melalui tombol/knop di HMI hingga terbaca = 1500 rpm atau frekuensi = 50Hz.
 - Amati pengukuran tegangan, arus dan frekuensi sistem dan yang menuju dummy load.
 - ON-kan pemutus tenaga Load,
3. Urutan pengoperasian OFF mode Remote:
- OFF-kan pemutus tenaga Load.
 - Turunkan rpm generator secara perlahan dari tombol/knop, hingga = 0 (berhenti).
 - OFF-kan pemutus tenaga yang menuju VSD.

Catatan:

- 1) Catat semua parameter penting selama pengoperasian sistem
- 2) Untuk mengembalikan mode operasi dari Remote ke Local, maka harus dilakukan dari panel kontrol, dengan memutar saklar pilih ke posisi Local.

Berikut adalah hasil gambar hasil pengujian operasi pada sistem SPTL seperti yang terlihat pada Gambar 5.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Nilai ampere pada operasi *Dummy Load*, (b) Nilai ampere pada operasi *Main Load*, (c) Monitoring parameter *No-Load* dengan SCADA, dan (d) Monitoring Parameter *Full-Load* dengan SCADA

Berdasarkan hasil pengujian mode Local dan Remote dari sistem beroperasi sebagaimana mestinya. Selain itu langkah-langkah pengoperasian yang telah direncanakan telah sesuai dengan hasil pengujian, sehingga sistem SPTL ini berfungsi dengan baik.

B. Pengujian Sistem

Pengujian sistem SPTL dilakukan dengan melakukan pembebanan pada main load untuk mengetahui karakteristik dan performa dari sistem. Pengujian dilakukan dengan main load berupa lampu yang diberi saklar seri berjenjang di mana secara berturut-turut jika saklar 0 aktif; 1 aktif; 2 aktif; 3 aktif; 4 aktif, menunjukkan daya yang masuk kedalam sistem sebesar 0%; 25%; 50%; 75%; 100%. Pengujian secara bertahap dilakukan untuk mengetahui apakah sistem bekerja secara baik pada setiap tingkat beban dan apakah terdapat anomali pada setiap tingkatan tersebut. Berikut adalah hasil pengujian sistem yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian Sistem SPTL dengan Beban 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%

L O A D (watt)						
No.		0%	25%	50%	75%	100%
1	Vr	222,00	221,00	219,00	216,00	211,00
2	Vs	222,00	219,00	218,00	217,00	214,00
3	Vt	222,00	221,00	220,00	218,00	212,00
4	Ir-d_load	1.48	0.85	0.32	0.01	0,00
5	Is-d_load	1.50	0.90	0.35	0.01	0,00
6	It-d_load	1.21	0.82	0.31	0.01	0,00
7	Ir-load	0,00	0.43	0.63	0,86	1.25
8	Is-load	0,00	0.42	0.62	0,86	1.24
9	It-load	0,00	0.43	0.63	0,86	1.25
10	Frekuensi	50,20	50,20	50,10	50,10	50,00
11	Cos phi r	0,00	0.99	0.99	0.99	0.99
12	Cos phi s	0,00	0.99	0.99	0.99	0.99
13	Cos phi t	0,00	0.99	0.99	0.99	0.99
14	Pr	0,00	94.08	135.97	183.90	261.11
15	Ps	0,00	91.07	133.80	184.75	262.71
16	Pt	0,00	94.08	137.21	186.60	262.35
17	Sr	0,00	95.03	137.34	185.76	263.75
18	Ss	0,00	91.99	135.15	186.62	265.36
19	St	0,00	95.03	138.60	188.48	264.99
20	Qr	0,00	2.84	4.12	5.52	7.83
21	Qs	0,00	2.71	4.10	5.54	7.88
22	Qt	0,00	2.84	4.12	5.60	7.87

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, dapat diketahui bahwa terdapat penurunan nilai Vr, Vs, dan Vt seiring dengan peningkatan beban pada dummy load dengan rentang 222 V – 211 V. Hal ini sama dengan nilai Ir-d load, Is-d load, dan It-d load di mana rentang penurunannya dari rentang 1,5 A – 0 A. Sebaliknya, nilai dari (Ir-load, Is-load, It-load); (Pr, Ps, Pt); (Sr, Ss, St); (Qr, Qs, Qt) mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan beban dengan

rentang secara berurutan adalah 0 A – 1,25A; 0 W – 262,71 W; 0 W – 265,36 W; 0 A – 7,88A. Selanjutnya pada nilai frekuensi dan cos phi menunjukkan nilai yang cenderung stabil yang nilainya secara berurutan berada pada rentang 50 Hz – 50,2 Hz; 0,99.

C. Pembahasan

Mengacu pada hasil pengujian pengoperasian, diperoleh bahwa operasi dari sistem SPTL telah sesuai dengan desain dari pengoperasian yang telah di buat. Proses pengoperasian juga menunjukkan tidak adanya bug atau error yang terjadi pada sistem pengoperasian. Berdasarkan hasil pengujian sistem dengan pembebanan bertahap dari 0%,25%,50%,75%, dan 100% menunjukkan bahwa secara umum sistem telah bekerja dengan baik, di mana transisi dari dummy load ke main load berfungsi dengan baik tanpa adanya sisa beban yang tersimpan pada kedua sistem pembebanan. Stabilitas dari nilai frekuensi dan cos phi juga menunjukkan nilai yang baik di mana selisih perbedaannya sangat kecil untuk frekuensi (sebesar 0,2 Hz), dan nilai cos phi yang konsisten di angka 0,99.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil dalam merancang bangun sistem SPTL yang dirancang dengan dua mode operasi yaitu Local dan Remote. Sistem SCADA yang dibuat dengan menggunakan standar komunikasi MODBUS juga berfungsi dengan baik tanpa ada masalah. Hasil pengujian di mulai dari pengujian pengoperasian dan pengujian performa menunjukkan hasil yang baik, di mana sistem beroperasi sesuai dengan desain dan bekerja dengan baik pada setiap tingkat beban tanpa adanya anomali pada suatu tingkat beban tertentu.

REFERENSI

- [1] Kamal and A. Kumar, "Impact of Technology Advancement on Human Resource Performance," *Int. J. Arts, Manag. Humanit.*, 2013.
- [2] N. M. Gayathri and A. Kannbhiran, "Power electronics for renewable energy systems," in *Renewable Energy for Sustainable Growth Assessment*, 2022. doi: 10.1002/9781119785460.ch12.
- [3] Fransiscus Xaverius Ariwibisono and Widodo Pudji Muljanto, "IMPLEMENTASI SISTEM MONITORING PRODUKSI ENERGI PLTS BERBASIS PROTOKOL MODBUS RTU DAN MODBUS TCP," *NUANSA Inform.*, 2023, doi: 10.25134/ilkom.v17i2.28.
- [4] Salahuddin, Bakhtiar, Yusman, and Fadhli, "Development of a High Performance Remote

- Terminal Unit (RTU) of Wireless SCADA System for Monitoring Performance of Micro Hydro Power Plant,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/854/1/012009.
- [5] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, “Low-cost, open source IoT-based SCADA system design using thinger.IO and ESP32 thing,” *Electron.*, 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- [6] R. Mu’ammam, P. Nugroho, and L. Multa Putranto, “Design of SCADA based solar power plant for clean water irrigation system in remote areas,” *Int. J. Eng. Technol.*, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.44.26867.
- [7] B. Madonsela, I. E. Davidson, and C. Mulangu, “Advances in Telecontrol and Remote Terminal Units (RTU) for Power Substations,” in *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2018*, 2018. doi: 10.1109/PowerAfrica.2018.8521181.
- [8] J. P. Lahti, A. Shamsuzzoha, and T. Kankaanpää, “Web-based technologies in power plant automation and SCADA systems: A review and evaluation,” in *Proceedings - 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2011*, 2011. doi: 10.1109/ICCSCE.2011.6190537.
- [9] M. C. Magro, M. Giannettoni, P. Pinceti, and M. Vanti, “Real time simulator for microgrids,” *Electr. Power Syst. Res.*, 2018, doi: 10.1016/j.epr.2018.03.018.
- [10] J. Ma, L. Peng, and X. Dong, “Design and Practice of Data Replay in DCS Simulator of Nuclear Power Plants,” *Hedongli Gongcheng/Nuclear Power Eng.*, 2019, doi: 10.13832/j.jnpe.2019.02.0129.
- [11] D. F. Larios, E. Personal, A. Parejo, S. García, A. García, and C. Leon, “Operational simulation environment for SCADA integration of renewable resources,” *Energies*, 2020, doi: 10.3390/en13061333.
- [12] P. Neis, M. A. Wehrmeister, M. F. Mendes, and J. R. Pesente, “Applying a model-driven approach to the development of power plant SCADA/EMS software,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109336.
- [13] T. Hashiguchi, M. Saito, T. Terunuma, and T. Kawahara, “Wide-area integrated SCADA system designed to improve availability and flexibility - SCADA and operation training simulator system supplied to Electric Power Development Co., Ltd.,” *Hitachi Rev.*, 2011.
- [14] F. Dudyrev and O. Maksimenkova, “Training Simulators in Vocational Education: Pedagogical and Technological Aspects,” *Vopr. Obraz. / Educ. Stud. Moscow*, 2020, doi: 10.17323/1814-9545-2020-3-255-276.
- [15] Sutanto, F. R. Iskandar, and P. I. Wahyono, “Design of power control system for automatic operation of the Kartini reactor,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012066.
- [16] T. Meisner, N. Brose, D. Lehmann, H. Schwarz, K. Pfeiffer, and M. Kotte, “Combined simulation of grid and power plant operation with a pairing to a real MicroGrid,” in *Proceedings of the 2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2022*, 2022. doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814154.
- [17] M. Čepin, “Use of Simplified Nuclear Power Plant Simulator,” *J. Energy - Energ.*, 2022, doi: 10.37798/2019682-3198.
- [18] A. H. J. Moreira, R. Freitas, and J. S. Esteves, “Miniature thermoelectric power plant,” in *Hands-on Science (HSCI)*, 2006.
- [19] H. Seifi and A. R. Seifi, “An intelligent tutoring system for a power plant simulator,” *Electr. Power Syst. Res.*, 2002, doi: 10.1016/S0378-7796(02)00047-0.
- [20] H. Firdaus, D. Suryadi, and M. Nurhayati, “SIMULATOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKO HIDRO UNTUK MODUL PRAKTIKUM DI LABORATORIUM KONVERSI ENERGI,” *Semin. Teknol. MAJALENGKA*, 2022, doi: 10.31949/stima.v6i0.744.
- [21] J. J. Duair, A. I. Majeed, and G. M. Ali, “Design and Implementation of IoT-Based SCADA for a Multi Microgrid System,” *ECS Trans.*, 2022, doi: 10.1149/10701.17345ecst.
- [22] A. Timbus, M. Liserre, R. Teodorescu, P. Rodriguez, and F. Blaabjerg, “Evaluation of current controllers for distributed power generation systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2012527.
- [23] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang, “Distributed Power-Generation Systems and Protection,” *Proceedings of the IEEE*. 2017. doi: 10.1109/JPROC.2017.2696878.
- [24] P. Rodriguez, A. V. Timbus, R. Teodorescu, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.899914.
- [25] A. V. Timbus, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, “Grid monitoring for distributed power generation systems to comply with grid codes,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2006. doi: 10.1109/ISIE.2006.295712.
- [26] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, “Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. doi: 10.1109/TIE.2006.881997.
- [27] A. Timbus, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and M. Liserre, “Synchronization methods for three phase distributed power generation systems. An overview and evaluation,” in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2005. doi: 10.1109/PESC.2005.1581980.
- [28] A. V. Timbus, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and

F. Blaabjerg, "Adaptive resonant controller for grid-connected converters in distributed power generation systems," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2006. doi:

10.1109/apec.2006.1620754.

