

Prototype Steam Plant sebagai Penyedia Sumber Daya Listrik pada Sistem Vessel To Grid (V2G)

Ray Vargas¹, Sonhaji², Elly Kusumawati³

¹⁻³ Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal,

Politeknik Pelayaran Surabaya

E-mail: vargasray613@gmail.com^{1*}

Alamat: Jl. Raya Hangtuh No.5, Ujung, Kec. Semampir, Surabaya, Jawa Timur 60155

*Penulis Korespondensi

Abstract. This research aims to develop and evaluate the performance of a steam plant prototype designed as an alternative source of electrical energy to support the Vessel to Grid (V2G) concept. Utilization of backup energy on ships is becoming important as electricity demand increases and demands for a more sustainable electrical system. This system relies on ESP32 microcontroller technology as a control center that functions to monitor and control several key parameters, including steam pressure, combustion temperature, boiler water level, and the generated electrical voltage. The research method used is an experiment with a static and dynamic testing approach. Static testing is carried out to measure the performance of main components such as the boiler, turbine, and generator separately, while dynamic testing focuses on evaluating the overall system by involving the integration of sensors and supporting actuators. The test data is then analyzed quantitatively to determine the system's response to variations in steam pressure, temperature, and other operational conditions. The results show that the steam produced by the boiler is able to rotate the turbine, thereby driving the generator to produce electricity. The maximum voltage achieved is 25.7 volts at a steam pressure of 50 psi. The highest energy conversion efficiency was recorded at 4%, while the lowest efficiency was 0.9%. These findings demonstrate that, despite its relatively low efficiency, the prototype can function as an alternative energy source and emergency backup solution. Thus, this research provides an initial contribution to supporting the implementation of the V2G concept through the development of a small-scale steam plant-based energy conversion system.

Keywords: Steam Plant; Vessel to Grid (V2G); ESP32 Microcontroller; Energy Efficiency; Alternative Energy.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan serta mengevaluasi kinerja sebuah prototipe steam plant yang dirancang sebagai sumber energi listrik alternatif dalam mendukung konsep Vessel to Grid (V2G). Pemanfaatan energi cadangan pada kapal menjadi penting seiring meningkatnya kebutuhan listrik dan tuntutan terhadap sistem kelistrikan yang lebih berkelanjutan. Sistem ini mengandalkan teknologi mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang berfungsi melakukan proses monitoring sekaligus controlling terhadap sejumlah parameter utama, antara lain tekanan uap, suhu pembakaran, ketinggian level air dalam boiler, serta tegangan listrik yang dihasilkan. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan pendekatan pengujian statis dan dinamis. Uji statis dilakukan untuk mengukur performa komponen utama seperti boiler, turbin, dan generator secara terpisah, sedangkan uji dinamis difokuskan pada evaluasi sistem secara keseluruhan dengan melibatkan integrasi sensor dan aktuator pendukung. Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui respons sistem terhadap variasi tekanan uap, suhu, dan kondisi operasional lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa uap yang dihasilkan boiler mampu memutar turbin sehingga menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Tegangan maksimum yang dicapai adalah 25,7 volt pada tekanan uap 50 psi. Efisiensi konversi energi tertinggi tercatat sebesar 4%, sedangkan efisiensi terendah 0,9%. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun efisiensi masih relatif rendah, prototipe mampu berfungsi sebagai sumber energi alternatif dan solusi cadangan darurat. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi awal dalam mendukung implementasi konsep V2G melalui pengembangan sistem konversi energi berbasis steam plant berskala kecil.

Kata kunci: Steam Plant; Vessel to Grid (V2G); ESP32 Mikrokontroler; Efisiensi Energi; Energi Alternatif.

1. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan yang terdapat pada kapal meliputi mesin pembangkit tenaga listrik, sistem distribusi, serta berbagai jenis peralatan listrik (Masringgit Marwiyah Nst, dkk., 2023). Energi listrik yang dihasilkan digunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan, termasuk

sistem penerangan, peralatan navigasi dan komunikasi, sistem alarm dan *monitoring*, pengaturan udara dan sistem refrigerasi, motor pompa, permesinan dek, hingga propulsi kapal. Pada umumnya, kebutuhan daya listrik di kapal dipenuhi oleh generator. Namun, dalam kondisi tertentu seperti *blackout*, beban listrik akan disuplai oleh generator darurat atau baterai yang ditempatkan di ruang *Emergency Source of Electrical Power* (Bobby Demeianto, dkk., 2020).

Generator merupakan salah satu permesinan bantu di kapal yang berfungsi untuk menyediakan kebutuhan listrik bagi seluruh peralatan di atas kapal. Sementara itu, *genset* atau generator *set* adalah perangkat yang berfungsi mengubah energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran menjadi energi mekanik (gerak). Sebagai bahan bakar, *genset* umumnya menggunakan minyak berkadar rendah (solar), yang proses pembakarannya memanfaatkan udara bertekanan tinggi (Danny Faturachman & Shahrin Febrian, 2020). Penentuan kapasitas generator dipengaruhi oleh *load factor* dari setiap peralatan. *Load factor* masing-masing peralatan di kapal berbeda-beda, tergantung pada jenis kapal dan daerah pelayarannya. Faktor-faktor yang memengaruhi di antaranya adalah medan pelayaran, kondisi beban listrik yang berubah-ubah, serta durasi penggunaan yang bervariasi atau tidak konsisten (Djoko Prasetyo, dkk., 2021). Jika terjadi kerusakan pada *auxiliary engine*, maka olah gerak kapal tidak berjalan dengan lancar. Hal tersebut dapat terjadi karena tidak adanya energi listrik untuk menjalankan pesawat bantu lainnya di atas kapal (Muhamad Jefrianto, dkk., 2024). Sehingga bagi peneliti dibutuhkan adanya hal yang dapat dijadikan sebagai opsi darurat jika terjadi kerusakan pada *auxiliary engine* atau generator sebagai tenaga pembangkit listrik.

Indonesia memiliki berbagai jenis pembangkit listrik, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), serta jenis-jenis pembangkit listrik lainnya (Aulia Vici Yunitasari & Subuh Pramono, 2020). Di antara semua jenis pembangkit tersebut, PLTU merupakan yang paling dominan dalam menghasilkan energi listrik di Indonesia. Pada teknologi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) terdapat sistem pembangkit yaitu *boiler* (Kartika Rahmawati, 2019). Ketel uap atau *boiler* adalah bejana tertutup di mana panas pada pembakaran berputar melalui air lalu menjadi air yang bersifat panas atau uap sebagai energi mekanik (Yuda Saputra, 2023). Energi mekanik digunakan untuk menggerakkan turbin generator yang kemudian akan dikonversi menjadi energi listrik.

Melalui situs *BlueGrid.energy*, *Vessel to Grid* menyelesaikan tantangan besar dengan mengubah kapal laut listrik menjadi pembangkit listrik *virtual* untuk penyimpanan energi dengan kapasitas skala besar. *BlueGrid* menghadirkan teknologi dan kemampuan untuk

mengoptimalkan sistem kapal ke jaringan (*vessel to grid*), memungkinkan kapal listrik tidak hanya mengonsumsi daya secara efisien, tetapi juga mengembalikan daya ke jaringan listrik ketika diperlukan tanpa mengganggu operasional kapal.

Pada penelitian ini, peneliti menerapkan pendekatan model *prototype* pada sistem steam plant sebagai tahap awal dalam pengembangan sistem *Vessel to Grid* yang ditujukan untuk mendukung pembangkit listrik pada jenis lainnya. Model dari *prototype* ini digunakan untuk menggambarkan struktur, fungsi, dan tampilan perangkat secara visual, baik dalam skala sebenarnya, diperbesar, maupun diperkecil. Dalam konteks ini, peneliti merancang suatu alat dalam bentuk *prototype* berbasis *mikrokontroler ESP32* yang diaplikasikan pada sistem *boiler*, yang berfungsi sebagai alternatif penyedia energi listrik darurat di atas kapal.

2. KAJIAN PUSTAKA

Teori

Hukum konversi energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam konteks *prototype steam plant* yang dirancang untuk penyedia sumber daya listrik pada sistem *Vessel to Grid* (V2G), hukum ini sangat relevan. Proses konversi energi dalam sistem ini melibatkan beberapa tahap, mulai dari pemanasan air dalam boiler hingga pengubahan energi mekanik menjadi energi listrik.

Perhitungan Energi

Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan air dalam *boiler* ialah :

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T$$

Ket:

M = massa air (*kg*)

C = kapasitas panas spesifik air ($4.186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$)

ΔT = perubahan suhu ($^\circ\text{C}$)

Boiler

Secara sederhana, *Boiler* adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan uap atau panas dengan cara memanaskan air (Alva Saritua S. Ritonga, 2024). Terdapat tiga jenis *boiler*, yaitu *boiler* pipa api, *boiler* pipa air, dan *boiler* stoker. Pada *boiler* pipa api, gas panas hasil pembakaran mengalir melalui pipa yang dilapisi air di bagian luar, sehingga panas berpindah ke air dan mengubahnya menjadi uap. *Boiler* pipa air memiliki air di dalam pipa dan gas panas di luar pipa, serta dapat beroperasi pada tekanan tinggi (lebih dari 100 *bar*). Sementara itu,

boiler stoker memiliki sistem pembakaran di atas rantai yang bergerak, dengan efisiensi antara 80% hingga 85% (Maidi Saputra & Ari Ferdian Syah, 2020).

NodeMCU ESP32

Pengembangan dari *mikrokontroler ESP8266* ialah *mikrokontroler ESP32* atau yang dikenal sebagai *Espresif System*. *Mikrokontroler ESP32* sangat tepat untuk penggunaan aplikasi yang berhubungan dengan *Internet of Things* dikarenakan spesifikasi yang dimiliki *ESP32* sangat lengkap. *Mikrokontroler* ini bisa berkomunikasi menggunakan *Bluetooth*, *Wi-Fi*, dan *BLE* (Arjun Pratikto Wahyu Hendrawan & Ni Putu Agustini, 2022).

Generator DC

Generator DC dirancang dengan menggunakan magnet *permanent* dengan *regulator* tegangan digital, starter eksitasi, 4 kutub rotor, penyearah, proteksi terhadap beban lebih, *bearing* dan rumah generator atau casis, serta bagian *rotor* (Sri Endah Susilowati dan Arif Budiman, 2023). Menurut Ady Prasetyo dan Hasyim Asy'ari (2023), Prinsip kerja generator ini didasarkan pada induksi elektromagnetik, di mana putaran kumparan dalam medan magnet menghasilkan gaya gerak listrik sehingga proses ini menghasilkan energi listrik searah (DC) yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya untuk komponen-komponen listrik berbasis DC.

Turbin Uap

Turbin uap berperan dalam mengonversi energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik berupa gerakan rotasi. Uap bertekanan dan suhu tinggi dialirkan melalui nosel, yang meningkatkan kecepatannya dan mengarahkan aliran tersebut secara presisi untuk mendorong sudu-sudu turbin yang terhubung ke poros. Hal ini menyebabkan poros turbin berputar, sehingga menghasilkan energi mekanik dalam bentuk putaran (Deny Oky Tambun, 2024).

Sensor INA219

Sensor *INA219* adalah sebuah modul sensor yang bekerja dengan *input* daya 3-5,5 Volt DC dan digunakan untuk mengukur arus dan tegangan DC (Deni Wijayanto, 2022). Dengan tingkat akurasi yang tinggi, Sensor ini dirancang untuk mengukur tegangan dan arus listrik serta memiliki kemampuan untuk mengukur arus hingga 3.2A dengan resolusi 0.8mA, tegangan hingga 26 dan resolusi 4mV. Sensor ini dilengkapi dengan fitur-fitur seperti proteksi arus berlebih, proteksi tegangan berlebih, dan deteksi tegangan *input* yang rendah (Akhmad Mursidan Al Farizi, 2023).

Pompa Air

Menurut Okie Yudha Ferdiansah (2023), Pompa air adalah alat yang berfungsi untuk memindahkan cairan dari satu tempat ke tempat lain melalui pipa atau saluran dengan cara menambahkan energi ke cairan tersebut. Alat ini bekerja secara terus menerus dengan menciptakan perbedaan tekanan antara bagian hisap (*suction*) dan bagian tekan (*discharge*). Mekanisme perbedaan tekanan biasanya dihasilkan oleh putaran roda impeler, yang menciptakan kondisi hampir vakum pada sisi hisap. Hal ini memungkinkan cairan terisap dan berpindah dari satu wadah ke tempat lainnya. Air sering disimpan di tower air untuk memanfaatkan gaya gravitasi agar mengalir tanpa bantuan pompa tambahan.

Non-Contact liquid level sensor

Sensor *XKC-Y25-V* merupakan jenis sensor level cairan non kontak yang menggunakan teknologi pemrosesan sinyal berkecepatan tinggi serta chip berpresisi tinggi dalam pengoperasiannya. Instalasi sensor ini tergolong praktis karena tidak memerlukan komponen tambahan untuk mendeteksi keberadaan cairan di dalam wadah. Sensor ini kompatibel dengan berbagai jenis material wadah seperti plastik galon, ember, dan kaca, namun tidak dapat digunakan pada wadah berbahan dasar logam atau besi karena interferensi material terhadap sensor (Muhamad Khoerul Anam, dkk., 2024).

Safety Valve

Safety valve adalah komponen keselamatan yang sangat penting dalam sistem *boiler*, pipa, tangki, atau peralatan lain yang beroperasi dengan tekanan tinggi (Ilham Ramadan & Chrestian Maxi Mamesah, 2024). *Safety valve* diatur sedemikian rupa sehingga saat tekanan uap mencapai titik tertentu, alat ini akan otomatis bekerja untuk melepaskan uap. Hal ini bertujuan mencegah terjadinya ledakan pada *boiler* akibat tekanan yang berlebih (Muh Thohirin, dkk., 2023).

Themocouple tipe k

Thermocouple tipe k adalah jenis sensor suhu yang menimbulkan efek *thermoelektrik* untuk mengukur atau mendeteksi suhu dengan 2 jenis logam konduktor yang materialnya berbeda (Anggi Juliant Hidayat, dkk., 2022).

Motor Servo

Motor servo adalah jenis motor atau aktuator yang dilengkapi dengan sistem kontrol umpan balik (*closed-loop*). Sistem ini memungkinkan motor untuk diatur dan menyesuaikan posisi porosnya sesuai sudut yang diinginkan. Komponen utama *motor servo* meliputi potensiometer, motor DC, *gearbox*, dan rangkaian kontrol. *Gearbox* atau roda gigi yang

terpasang pada poros motor DC berfungsi untuk mengatur kecepatan putaran motor (Moh. Alif Fathoni, dkk., 2024).

Sensor Piezoresistif

Prinsip kerja sensor tekanan didasarkan pada perubahan energi mekanik menjadi energi listrik. Ketika sensor terpapar pada tekanan, terjadi perubahan fisik yang mengubah sifat listrik dari elemen sensor. Perubahan ini dideteksi dan oleh rangkaian elektronik. Proses kalibrasi memastikan keteraturan antara besaran input (tekanan) dan output (sinyal listrik). Sensor memiliki peran penting dalam kontrol proses dan pemantauan kondisi peralatan. (Deny Oky Tambun, 2024).

3. METODE PENELITIAN

Menurut Solso dan MacLin (2002), penelitian eksperimen merupakan jenis penelitian di mana minimal terdapat satu variabel yang dimanipulasi untuk mengamati hubungan sebab-akibat. Metode ini memberikan peneliti kemampuan untuk mengontrol variabel lain yang berpotensi memengaruhi hasil penelitian, sehingga memungkinkan penarikan kesimpulan yang lebih akurat terkait pengaruh langsung dari perlakuan yang diterapkan. *Mikrokontroler ESP32* sebagai pengendali dari sistem *monitoring* dan *controlling* pada *termocouple tipe k*, pompa air, *non contact liquid level sensor*, *motor servo*, sensor *INA219*, dan Sensor *Piezoresistive*. Sebagai perangkat untuk pemantauan dari jarak jauh, penelitian ini menggunakan perantara *MQTT* dengan menggunakan *smartphone*. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan secara dinamis dan statis untuk mengevaluasi kinerja *Prototype Steam Plant* Sebagai Penyedia Sumber Daya Listrik Pada Sistem *Vessel To Grid (V2G)*.

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Alat



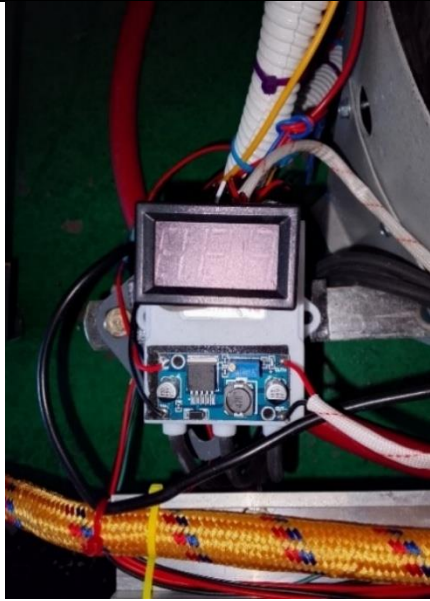
Gambar 1. Prototype steam plant dalam sistem Vessel to Grid (V2G)

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Berikut spesifikasi dari *boiler* :

- a. Tipe *Boiler* : *Vertical water tube*
- b. Jenis hasil uap : Uap basah
- c. Tekanan operasi : 1,3 - 3,4 bar
- d. Tekanan *design* : 5 bar
- e. *Temperature steam* : 100-350°C
- f. *Temperature air* : 30°C
- g. Bahan bakar : Gas LPG
- h. Tinggi keseluruhan : 90cm
- i. Tinggi *Boiler* : 75cm
- j. Diameter badan *boiler* : 35cm
- k. Material badan *boiler* : *Stainless steel*

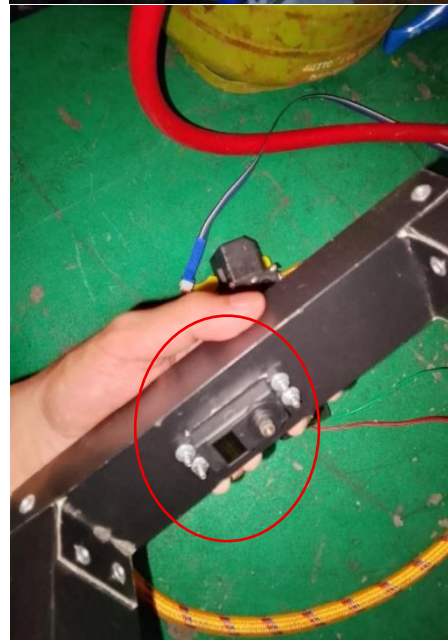
Tabel 1. Part pendukung steam plant

NO	NAMA	PART
1	Sensor INA219	
2	Pompa air	

3 Non contact liquid level



4 Motor servo



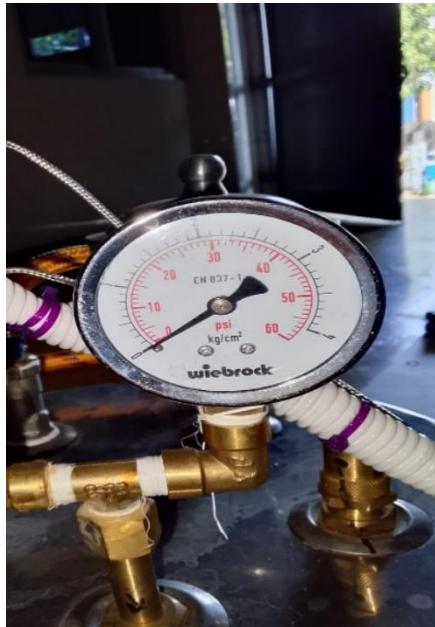
5 Thermocouple tipe k



6 Sensor Piezoresistive



7 Pressure Gauge



8 Turbin Generator



9 Selenoid valve



10 Emergency water filling valve



11 Emergency water draining valve



Sumber: Diolah Oleh Peneliti

Analisa Data

Analisa data *safety valve*

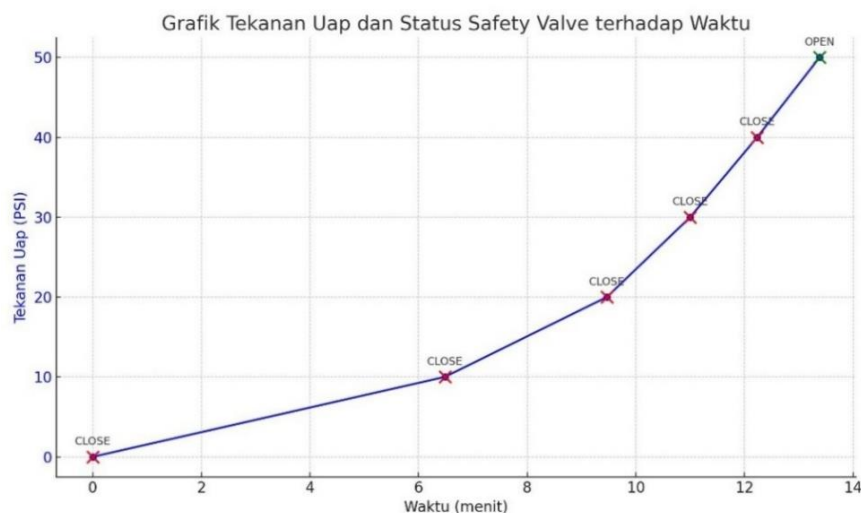
Sistem pengaman tekanan uap pada *steam drum*, digunakan sebuah *safety valve* yang diatur untuk membuka secara otomatis apabila tekanan melebihi ambang batas maksimal sebesar 50 *psi*. Ketika tekanan dalam sistem mencapai lebih dari 50 *psi*, katup tersebut akan bekerja secara mekanis untuk melepaskan tekanan berlebih guna menjaga kestabilan dan keamanan sistem.

Berdasarkan data pada Tabel 1, dilakukan pengujian pembukaan *safety valve* menggunakan sumber tekanan dari *steam drum*. *Water drum* diisi sebanyak 3 liter air *Steam drum*. Pada keadaan ini *steam drum* dihubungkan langsung ke *safety valve* dan diuji secara bertahap dari 0 *psi* hingga mencapai titik setel (*set point*) yaitu 50 *psi*. Pada saat tekanan mencapai titik tersebut, *safety valve* mulai terbuka secara mekanik. Hal ini ditunjukkan secara visual, di mana sehelai kain merah tipis yang didekatkan pada *outlet* katup sebagai indikator bahwa uap berlebih telah dikeluarkan dari sistem.

Tabel 2. Data uji *safety valve*

NO	WAKTU (MENIT : DETIK)	TEKANAN UAP (PSI)	SAFETY VALVE STATUS
1	00:00	0	CLOSE
2	06.29	10	CLOSE
3	09.28	20	CLOSE
4	11.00	30	CLOSE
5	12.14	40	CLOSE
6	13.23	50	OPEN

Sumber: Diolah Oleh Peneliti



Gambar 1. Grafik Tekanan uap dan Status *Safety Valve* terhadap waktu

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Analisa data *non contact liquid level sensor* dan pompa air

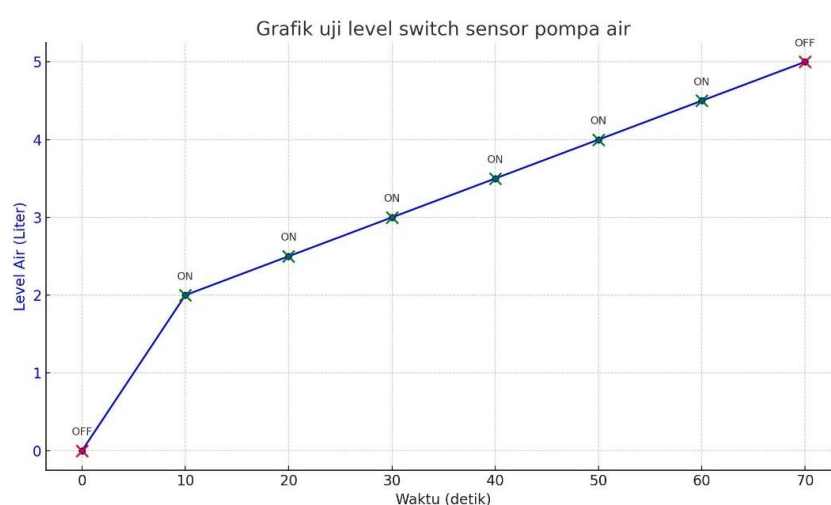
Non contact liquid level sensor dipasang pada area yang ditunjukkan oleh lingkaran merah pada Tabel 1. Sensor tersebut dihubungkan melalui kabel ke *mikrokontroler ESP32* yang terpasang pada panel kontrol. *Mikrokontroler* tersebut berfungsi untuk memberikan sinyal kendali terhadap sistem pengisian air dari *feed water source*.

Pada Tabel 2, Ketika *Non contact liquid level sensor* mendeteksi bahwa volume air dalam *water drum* berada di bawah ambang batas minimum, maka sensor akan mengaktifkan pompa untuk mengisi kembali air ke dalam *water drum*. Sebaliknya, apabila permukaan air telah mencapai titik maksimum yang sesuai dengan posisi *non contact liquid level sensor*, maka sinyal dari sensor akan memerintahkan pompa untuk berhenti beroperasi. Ambang batas maksimal pengisian diatur pada volume 5 liter. Mekanisme ini bertujuan untuk menjaga kestabilan *level* air dalam *water drum* secara otomatis.

Tabel 2. Data uji *non contact liquid level sensor* dan pompa air

NO	WAKTU (DETIK)	LEVEL AIR (LITER)	STATUS POMPA AIR
1	0	0	OFF
2	10	2	ON
3	20	2,5	ON
4	30	3	ON
5	40	3,5	ON
6	50	4	ON
7	60	4,5	ON
8	70	5	OFF

Sumber: Diolah Oleh Peneliti



Gambar 2. Grafik uji *non contact liquid level sensor* terhadap pompa air

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Analisa data motor servo dan thermocouple tipe k

Pada Analisa data ini, peneliti menyediakan data untuk menggambarkan sistem proteksi yang dimanfaatkan pada sensor *thermocouple tipe k* dan *motor servo* sebagai komponen pendeteksi kondisi kritis. Sensor *thermocouple tipe k* dikalibrasi untuk bekerja dalam rentang suhu 0–400°C, sedangkan *motor servo* disesuaikan untuk merespons pada suhu 100°C guna mematikan dan/atau menutup sedikit aliran gas LPG.

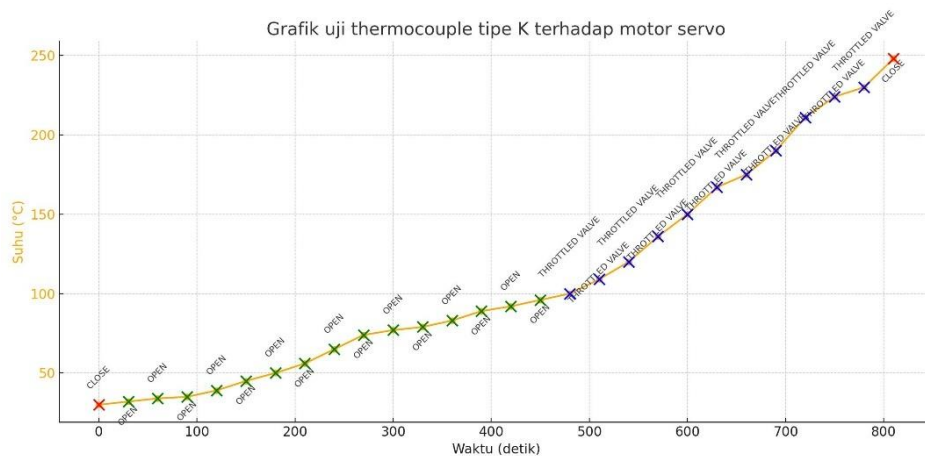
Sensor *thermocouple tipe k* dipasang pada lokasi yang ditunjukkan oleh lingkaran merah pada tabel 4.1., kemudian dihubungkan melalui kabel ke *mikrokontroler ESP32* yang terletak pada panel kontrol. *Mikrokontroler* ini berfungsi mengatur kerja *motor servo* berdasarkan sinyal yang diterima dari sensor *thermocouple*.

Pengujian sistem keselamatan berbasis suhu dilakukan melalui simulasi kondisi ekstrem secara terkendali untuk memastikan bahwa sistem dapat merespons sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Data hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk tabel 4.10. dan data dikaji oleh peneliti sesuai pembacaan suhu dari sensor *thermocouple* melalui tampilan perantara berbasis *MQTT* pada aplikasi *boiler smart IOT system*, dengan interval pengambilan data setiap 30 detik.

Tabel 3. Analisa data motor servo dan thermocouple tipe k

NO	WAKTU (DETIK)	SUHU (°C)	MOTOR SERVO STATUS
1	0	30	CLOSE
2	30	32	OPEN
3	60	34	OPEN
4	90	35	OPEN
5	120	39	OPEN
6	150	45	OPEN
7	180	50	OPEN
8	210	56	OPEN
9	240	65	OPEN
10	270	74	OPEN
11	300	77	OPEN
12	330	79	OPEN
13	360	83	OPEN
14	390	89	OPEN
15	420	92	OPEN
16	450	96	OPEN
17	480	100	THROTTLED VALVE
18	510	109	THROTTLED VALVE
19	540	120	THROTTLED VALVE
20	570	136	THROTTLED VALVE
21	600	150	THROTTLED VALVE
22	630	167	THROTTLED VALVE
23	660	175	THROTTLED VALVE
24	690	190	THROTTLED VALVE
25	720	211	THROTTLED VALVE
26	750	224	THROTTLED VALVE
27	780	230	THROTTLED VALVE
28	810	248	CLOSE

Sumber: Diolah Oleh Peneliti



Gambar 3. Grafik uji *thermocouple* tipe *k* terhadap *motor servo*

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Gambar 4.6., sistem menunjukkan bahwa *motor servo* akan menutup sebesar 70% katup dari aliran gas apabila suhu terdeteksi melebihi 100°C. Alhasil, aliran gas LPG berkurang sehingga nyala api melemah, dan suhu mulai naik sampai 248°C. Setelah itu, *Motor servo* akan menutup penuh aliran gas LPG apabila sistem telah berhenti dan pompa air mengisi air menuju *water drum* kembali.

Analisa data akan perbandingan pengaturan titik tekanan uap terhadap Tegangan

Berdasarkan data yang diperoleh pada tabel 4.11., dari enam belas kali pengujian terlihat adanya kecenderungan bahwa peningkatan rentang *set point* tekanan uap secara proporsional memengaruhi naiknya tegangan keluaran sistem.

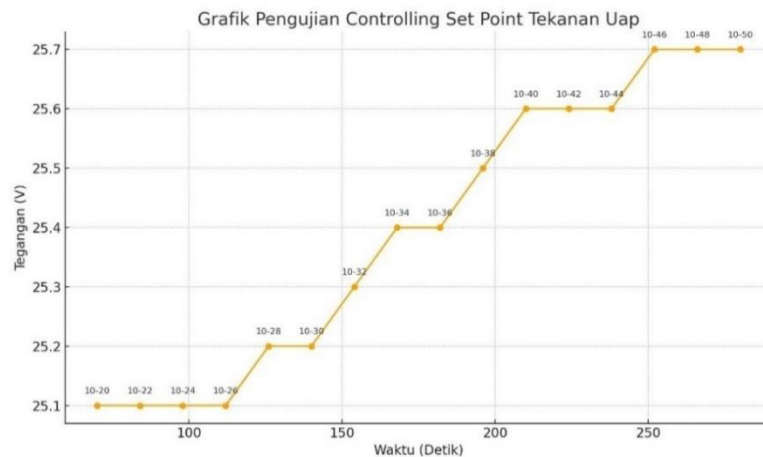
Pada percobaan ke-1, dengan *set point* 10–20 *psi* dan durasi pengujian selama 70 detik, sistem menghasilkan tegangan sebesar 25,1 *Volt*. Seiring bertambahnya rentang tekanan pada percobaan ke-6 (10–30 *psi*) hingga ke-16 (10–50 *psi*), terjadi peningkatan tegangan berturut-turut sebesar 25,2 *Volt*, 25,5 *Volt*, dan 25,7 *Volt*. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar tekanan yang ditetapkan sebagai *set point*, maka sistem pengendali menghasilkan respon tegangan yang lebih tinggi untuk menjaga kestabilan proses pengukuran.

Tabel 4. Data pengujian controlling set point tekanan uap

PERCOBAAN	SET POINT TEKANAN UAP (PSI)	WAKTU (DETIK)	TEGANGAN (V)
1	10-20	70	25,1
2	10-22	84	25,1
3	10-24	98	25,1
4	10-26	112	25,2
5	10-28	126	25,2
6	10-30	140	25,2
7	10-32	154	25,3
8	10-34	168	25,4
9	10-36	182	25,4
10	10-38	196	25,5
11	10-40	210	25,5
12	10-42	224	25,6
13	10-44	238	25,6
14	10-46	252	25,7
15	10-48	266	27,7
16	10-50	280	25,7

Sumber: Diolah Oleh Peneliti

Kecenderungan linier pada gambar 4 menunjukkan bahwa sistem kontrol mampu menyesuaikan *output* terhadap perubahan *set point* dengan respons yang stabil. Tegangan yang meningkat secara bertahap menandakan tidak adanya lonjakan ekstrem, yang menegaskan bahwa sistem bekerja dalam kondisi optimal dan adaptif terhadap parameter tekanan uap.



Gambar 4. Grafik uji controlling set point tekanan uap

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Analisa perhitungan energi

Berdasarkan data pada tabel 2 dan tabel 3, diperoleh data dengan air yang diisi pada *water drum* sebesar 5 liter atau dikonversi menjadi satuan *Kilogram (Kg)* sebesar 5Kg. Perubahan suhu terjadi dengan suhu akhir 248°C dan suhu awal 30°C.

Pada tabel 4, data terendah tekanan uap yang dihasilkan sebesar 20 *psi* dan tekanan uap terbesar yang dihasilkan sebesar 50 *psi*. Dari hasil tekanan terendah dan tertinggi tersebut pun

menghasilkan tegangan sebesar 25,1 *volt* dalam waktu 70 detik dan 25,7 *volt* dalam waktu 280 detik.

Sementara itu, pada pembahasan analisa perhitungan energi, peneliti akan membuat permisalan keluaran hambatan yang dihasilkan pada *steam plant* sebesar 10 Ω dikarenakan penelitian ini tidak berfokus untuk mengetahui besaran hambatan yang dikeluarkan oleh *steam plant*.

Ket:

Q = Kalor jenis (*Joule* atau *J*)

M = massa air (*kg*)

C = kapasitas panas spesifik air ($4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$)

ΔT = perubahan suhu ($^\circ\text{C}$)

P = Daya listrik (*watt*)

R = Hambatan (Ω atau *ohm*)

V = Tegangan (*volt*)

E = Energi

t = Waktu (detik atau *det*)

η = Efisiensi konversi energi

Perhitungan 1 :

- a. Maka, energi panas yang diberikan untuk memanaskan air sebesar:

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T; (\Delta T = 248^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 218^\circ\text{C})$$

Konversi Energi Uap ke Energi Mekanik:

$$Q = 5\text{ kg} \times 4.168 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 218^\circ\text{C} = 4.543.120 \text{ J}$$

- b. Maka, energi listrik yang dihasilkan:

$$1) P = V^2 \div R$$

$$P = (25,7)^2 \div 10 = 66,05 \text{ watt}$$

$$2) E. \text{ Listrik} = P \times t$$

$$E. \text{ Listrik} = 66,05 \text{ watt} \times 280 \text{ det}$$

$$E. \text{ Listrik} = 18.493,72 \text{ J}$$

- c. Analisis Hubungan tekanan uap dan tegangan listrik

$$1) \text{ Energi panas total yang masuk: } 146.510 \text{ J}$$

$$2) \text{ Energi listrik yang keluar: } 18.494 \text{ J}$$

$$3) \text{ Efisiensi konversi energi:}$$

$$\eta = E. \text{ Listrik} \div Q \times 100\%$$

$$\eta = 18.493,72 \div 4.543.120 \times 100\%$$

$$\eta = 4\%$$

Perhitungan 2 :

- a. Maka, energi panas yang diberikan untuk memanaskan air sebesar:

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = 248^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 218^{\circ}\text{C}$$

Konversi Energi Uap ke Energi Mekanik:

$$Q = 5\text{kg} \times 4.168 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 218^{\circ}\text{C} = 4.543.120 \text{ J}$$

- b. Maka, energi listrik yang dihasilkan:

$$1) P = V^2 \div R$$

$$P = (25,1)^2 \div 10 = 63 \text{ watt}$$

$$2) E. \text{ Listrik} = P \times t$$

$$E. \text{ Listrik} = 63 \text{ watt} \times 70 \text{ det}$$

$$E. \text{ Listrik} = 4.410 \text{ J}$$

- c. Analisis Hubungan tekanan uap dan tegangan listrik

$$1) \text{ Energi panas total yang masuk: } 4.543.120 \text{ J}$$

$$2) \text{ Energi listrik yang keluar: } 4.410 \text{ J}$$

- 3) Efisiensi konversi energi:

$$\eta = E. \text{ Listrik} \div Q \times 100\%$$

$$\eta = 4.410 \div 4.543.120 \times 100\%$$

$$\eta = 0,9\%$$

Peningkatan tekanan uap pada sistem termal secara langsung berkontribusi terhadap akumulasi energi panas yang lebih besar dalam medium kerja, dalam hal ini air. Energi panas yang terbentuk digunakan untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi, yang kemudian diarahkan untuk menggerakkan komponen mekanis seperti turbin atau dinamo mini. Gerakan mekanis ini selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik pada generator. Oleh karena itu dari perhitungan 1 dan 2 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tekanan uap yang dihasilkan, maka semakin besar pula energi kinetik yang tersedia untuk mendorong sistem mekanik tersebut, yang pada akhirnya meningkatkan tegangan listrik pada keluaran sistem. Namun demikian, tidak seluruh energi panas yang masuk dapat dikonversi secara sempurna menjadi energi listrik, karena sebagian energi hilang akibat proses perpindahan panas, gesekan mekanis, serta keterbatasan efisiensi dari komponen konversi itu sendiri. Hal ini menjelaskan bahwa hubungan antara tekanan uap dan tegangan

keluaran bersifat proporsional, tetapi tetap dipengaruhi oleh faktor efisiensi sistem secara keseluruhan.

Kajian Produk Akhir

Evaluasi Kinerja Sistem Keseluruhan

Fungsionalitas dan Stabilitas pada *prototype steam plant* yang telah dirancang dan diuji menunjukkan kapabilitas dalam menyediakan sumber daya listrik. Pengujian dinamis dan statis mengonfirmasi bahwa setiap komponen, mulai dari *boiler* hingga generator, berfungsi secara terintegrasi dan stabil. Sistem mampu menghasilkan uap bertekanan tinggi yang efektif menggerakkan turbin dan generator, menghasilkan energi listrik yang dapat disimpan dalam aki.

Responsivitas Sistem dari *controlling* dan *monitoring* terhadap integrasi *mikrokontroler ESP32* dengan berbagai sensor (*INA219*, *Non contact liquid level*, *thermocouple tipe k*, dan *piezoresistive*) serta aktuator (*motor servo* dan pompa air) menunjukkan responsivitas yang baik. Sistem dari *monitoring* dan *controlling* mampu memantau parameter kritis seperti tekanan uap, suhu, dan *level* air, serta melakukan tindakan korektif secara otomatis, seperti pengaturan pembakaran dan pengisian air, untuk menjaga kondisi operasional yang optimal dan aman. Sistem secara *controlling* manual untuk melakukan *setting point* batas maksimal pada tekanan uap yang akan dihasilkan sebelum sistem dijalankan pun berjalan dengan baik.

Analisis Hasil Pengujian Spesifik

Safety Valve: Pengujian *safety valve* membuktikan kemampuannya dalam mencegah tekanan uap berlebih. *Safety valve* secara otomatis terbuka pada *set point* 50 *psi*, melepaskan tekanan berlebih dan menjaga integritas sistem, yang merupakan aspek krusial untuk keselamatan operasional. Akurasi Pengukuran Tegangan: Perbandingan data dari *sensor INA219* dengan *multitester digital* menunjukkan tingkat akurasi yang hampir memadai dalam pengukuran *output* tegangan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem *monitoring* tegangan dapat diandalkan untuk memantau produksi energi listrik. Kontrol Suhu dan Pembakaran: Implementasi *thermocouple tipe k* dan *motor servo* berhasil mengendalikan proses pembakaran dari gas LPG.

Motor servo secara presisi mengatur aliran gas LPG berdasarkan pembacaan suhu, memastikan suhu operasional tetap dalam batas aman dan efisien, serta secara otomatis menutup aliran gas saat suhu melebihi ambang batas yang ditentukan. Manajemen *Level* Air Otomatis: *Non-contact liquid level sensor* dan pompa air bekerja secara sinergis untuk menjaga *level* air dalam *steam drum*. Sistem ini secara efektif mengaktifkan dan menonaktifkan

pompa untuk mempertahankan *level* air yang stabil, mencegah kondisi kekurangan atau kelebihan air yang dapat mengganggu kinerja *boiler*.

Potensi dan Keterbatasan Produk

Potensi Aplikasi: *Prototype* ini memiliki potensi besar sebagai opsi darurat penyedia energi listrik di kapal atau pelabuhan, terutama dalam skenario *blackout* atau kegagalan *generator* utama. Konsep *Vessel to Grid* yang diusung memungkinkan integrasi dengan sistem kelistrikan kapal untuk optimasi konsumsi dan penyediaan daya. Keterbatasan dan Pengembangan Lanjutan: Meskipun fungsional, *prototype* ini masih dalam skala laboratorium. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan kapasitas daya, mengoptimalkan efisiensi konversi energi, serta menguji ketahanan dan keandalan sistem dalam kondisi operasional maritim yang lebih ekstrem. Integrasi dengan sistem *Vessel to Grid* secara penuh dan pengujian dalam lingkungan nyata akan menjadi langkah berikutnya untuk validasi produk.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa *prototype steam plant* yang dirancang berhasil berfungsi sebagai penyedia sumber daya listrik alternatif dalam sistem *Vessel to Grid* (V2G) dengan menggunakan *mikrokontroler ESP32*. Sistem ini mampu mengkonversi energi panas dari LPG menjadi energi listrik melalui proses uap yang digerakkan oleh *boiler*, turbin dengan efisiensi konversi energi tertinggi sebesar 4% dan terendah sebesar 0,9%. Tegangan yang mampu dihasilkan sebesar 25,7 volt berdasarkan pengukuran yang dilakukan oleh sensor *INA219* dengan tekanan uap sebesar 50 psi.

Saran

Pengembangan Skala: Diperlukan pengembangan lebih lanjut dalam skala sistem yang lebih besar agar dapat diaplikasikan secara nyata di atas kapal dengan beban listrik yang lebih tinggi. Integrasi Keamanan Tambahan: Perlu ditambahkan sistem keamanan berlapis, seperti alarm tekanan tinggi atau sistem *shutdown* otomatis, guna meningkatkan keselamatan operasional alat. Efisiensi Energi dan Optimasi Bahan Bakar: Penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan dan efisien dapat dipertimbangkan agar lebih sesuai dengan prinsip keberlanjutan di sektor maritim. Koneksi dengan Sistem Listrik Utama: Integrasi *prototype* ini dengan sistem listrik utama kapal perlu dikaji lebih lanjut agar mampu menjadi *back-up power* yang responsif dalam kondisi darurat. Uji Lapangan dan Validasi

Jangka Panjang: Disarankan untuk melakukan uji coba *prototype* dalam skenario nyata di kapal selama periode waktu yang lebih panjang guna memperoleh data performa yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Anam, M. K., Hikmah, I., & Purnama, S. I. (2024). Prototipe sistem pemantau dan pengendali volume air pada tangki berbasis Internet of Things. *Jurnal Teodolita: Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik*, 24(1), 20–31.
- Arif, R. Y., Syamsuri, H., & Maulani, S. I. (2023). Rancang bangun prototype pembangkit listrik tenaga uap menggunakan sistem torak pada silinder. *Jurnal Mahasiswa Mesin Galuh*, 1(2).
- Demeianto, B., Ramadani, R. P., Musa, I., & Priharanto, Y. E. (2020). Analisa pembebanan pada generator listrik kapal penangkap ikan studi kasus pada KM. Maradon. *Aurelia Journal*, 2(1), 63–72. <https://doi.org/10.15578/aj.v2i1.9425>
- Fathoni, M. A., Dirgantara, W., & Sumarahinsih, A. (2024). Kontrol temperatur tungku berbasis microcontroller pada proses destilasi daun *Syzygium aromaticum* dengan metode fuzzy logic. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 3(1). <https://doi.org/10.56211/blendsains.v3i1.599>
- Faturachman, D., & Febrian, S. (2020). Tinjauan penggunaan generator package set darurat pada sebuah kapal. *Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik*, X(1), 80–91.
- Ferdiansah, O. Y. (2023). Rancang bangun sistem water level boiler berbasis Arduino. *Karya Ilmiah Terapan*. Politeknik Pelayaran Surabaya.
- Hendrawan, A. P. W., & Agustini, N. P. (2022). Simulasi kendali dan monitoring daya listrik peralatan rumah tangga berbasis ESP32. *ALINIER Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 3(1). <https://doi.org/10.36040/alinier.v3i1.4855>
- Hidayat, A. J., Marzuki, I., & Wicaksono, I. R. (2022). Rancang bangun pengendali temperature berbasis Arduino Uno pada ketel uap di Pabrik Gula Wonolangan. *JISE Journal of Industrial System Engineering*, 1(1).
- Jefrianto, M., Irwan, Kurniawan, E., & Kurniawan, M. (2024). Optimalisasi kinerja injector auxilery engine di Kapal MV Lintas Lorentz. *Jurnal Cakrawala Bahari*, 7(1), 9–24. <https://doi.org/10.70031/jkb.v7i1.59>
- Nst, M. M., Sutria, Y., & Taruna. (2023). Sistem pengaman kelistrikan kapal di Belawan. *Journal of Maritime and Education*, 5(1), 456–461. <https://doi.org/10.54196/jme.v5i1.100>
- Nst, P. R. A., Nst, A., & Darianto. (2017). Analisa perancangan economizer untuk menaikkan efisiensi boiler di laboratorium Politeknik Negeri Medan. *Journal of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials and Energy*, 1(2), 87–92. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v1i2.1634>

- Prasetyo, A., & Asy'ari, H. (2023). Rancang bangun prototype sistem PLTMH menggunakan generator DC (Skripsi). Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Prasetyo, D., Abrori, M. Z. L., & Nurfauzi, M. (2021). Efisiensi generator set terhadap perubahan beban listrik pada kapal perikanan. *Edu ElektriKa Journal*, 10(2), 56–61.
- Rahmawati, K. (2018). Perancangan desain boiler pada mini plant steam engine untuk pembangkit listrik tenaga uap (Tugas Akhir). Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Ramadan, I., & Mamesah, C. M. (2024). Rancang bangun sistem pengendalian tekanan uap air pada tabung boiler dengan PLC Cimon CM3-SP32MDTF-SD. *Jurnal Mahasiswa Politeknik TEDC Bandung*, 1(1), 82–92.
- Saputra, Y. (2023). Analisa rancang bangun pembangkit listrik tenaga engine steam mini kapasitas 18 volt (Skripsi). Universitas Tamansiswa Palembang.
- Susilowati, S. E., & Budiman, A. (2023). Rancang bangun prototipe pembangkit listrik tenaga uap dengan turbin impuls diameter 70 cm. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 8(1).
- Tambun, D. O. (2024). Rancang bangun monitoring dan kendali miniatur pembangkit listrik tenaga uap (Tugas Akhir). Universitas HKBP Nommensen.
- Thohirin, M., Wisnaningsih, M., Yunus, M., Pambudi, A., & Habibi, A. S. (2023). Perancangan dan konstruksi boiler untuk rebusan buah sawit dengan kapasitas 200 kg. *Jurnal Rekayasa Teknik Mesin Saburai*, 1(2), 42–47. <https://doi.org/10.24967/justimes.v1i02.2714>
- Yunitasari, A. V., & Pramono, S. (2021). Sistem proteksi over current relay motor forced draft fan pada pembangkit listrik tenaga uap. *Jurnal Teknologi*, 13(1), 55–62.