

PENGARUH INTEGRASI TEG TERHADAP OUTPUT PLTU MIKRO SKALA LAB

Richard Joseph Siahaan, I Gede Eka Lesmana, Rovida Camalia Hartantrie
Program Studi S1 Teknik Mesin Reguler Khusus, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jl.
Srengseng Sawah, Srengseng Sawah, Jagakarsa, Jakarta Selatan, DKI Jakarta
richardjosiahaan@gmail.com

Abstract (English)

An electrical generator is a form of energy conversion engine and thus far from a thermodynamic standpoint there has never been an engine that can successfully convert energy with 100% efficiency and the losses that do happen typically presents itself in the form of thermal energy, hence, on large scale commercial use, the majority of electricity powerplants indirectly use thermal energy. Typically, a large scale electric powerplant indirectly utilize steam power as a means to convert thermal energy into mechanical energy to impart work on a turbine be it nuclear, geothermal, biomass, or conventional powerplants. However, it is rare for large scale powerplants to directly convert thermal energy into electricity, e.g. through the use of Thermoelectric Generators (TEGs). This is because so far, research surrounding TEGs has shown that on it is own, the efficiencies achieved by TEGs are lackluster and fall short to those of Carnot cycles employing steam. Therefore, one of the solutions offered particularly in the following paper is to integrate TEGs into an existing steam powerplant in order to convert thermal electricity both directly through thermoelectricity and indirectly through mechanical energy driven by steam. It is hypothesized that through this cogeneration process a compromised thermodynamic efficiency better than the use of either steam turbines or thermoelectric modules independently.

Article History

Submitted: 22 April 2024

Accepted: 1 May 2024

Published: 2 May 2024

Key Words

Powerplant; Heat Engine; Thermoelectricity; Efficiency; Thermal Energy.

Abstrak (Indonesia)

Generator listrik merupakan salah satu bentuk mesin konversi energi dan sejauh ini dari sudut pandang termodinamika belum pernah ada mesin yang berhasil mengubah energi dengan efisiensi 100% dan kerugian yang terjadi biasanya muncul dalam bentuk energi panas, oleh karena itu, Dalam penggunaan komersial skala besar, sebagian besar pembangkit listrik secara tidak langsung menggunakan energi panas. Biasanya, pembangkit listrik skala besar secara tidak langsung memanfaatkan tenaga uap sebagai sarana untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik untuk memberikan kerja pada turbin baik itu pembangkit listrik tenaga nuklir, panas bumi, biomassa, atau pembangkit listrik konvensional. Namun, jarang sekali pembangkit listrik berskala besar yang secara langsung mengubah energi panas menjadi listrik, misalnya listrik. melalui penggunaan Generator Termoelektrik (TEGs). Hal ini karena sejauh ini, penelitian seputar TEG menunjukkan bahwa efisiensi yang dicapai oleh TEG kurang baik dan tidak sebanding dengan siklus Carnot yang menggunakan uap. Oleh karena itu, salah satu solusi yang ditawarkan khususnya dalam makalah berikut ini adalah dengan mengintegrasikan TEG ke dalam pembangkit listrik tenaga uap yang ada untuk mengubah listrik termal baik secara langsung melalui termoelektrik dan secara tidak langsung melalui energi mekanik yang digerakkan oleh uap. Dihipotesiskan bahwa melalui proses kogenerasi ini efisiensi termodinamika yang dikompromikan lebih baik daripada penggunaan turbin uap atau modul termoelektrik secara mandiri.

Sejarah Artikel

Submitted: 22 April 2024

Accepted: 1 May 2024

Published: 2 May 2024

Kata Kunci

Pembangkit listrik; Mesin panas; Termoelektrik; Efisiensi; Energi termal

PENDAHULUAN

Dalam memanfaatkan energi panas dalam jaringan listrik, digunakan sebuah pembangkit listrik bertenaga uap. Sumber panas dimana uap tersebut dihasilkan beragam, dimulau dari isotop radioaktif untuk PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), panas bumi untuk PLTG

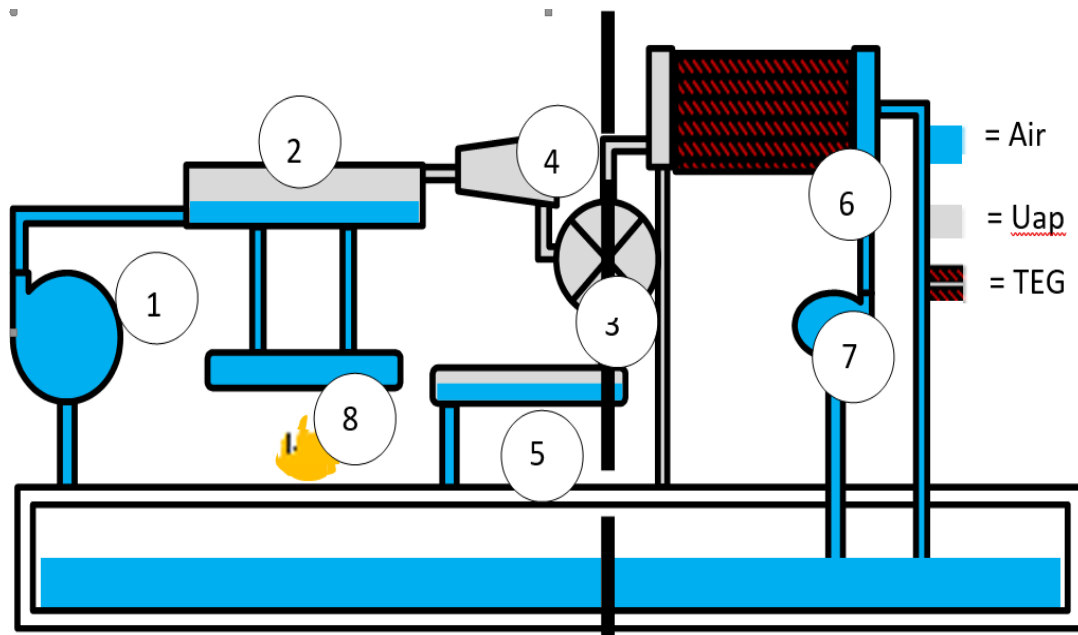
(Pembangkit Listrik Tenaga Geotermal), panas surya terkonsentrasi untuk CSP (*Concentrated Solar Power*), atau PLTU konvensional yang bertenaga bahan bakar fosil (migas), batubara, atau biomassa. Didalam semua pembangkit listrik bertenaga uap terjadi suatu fenomena yang sama dimana fluida kerja akan dipanaskan oleh sumber panas hingga berubah fasa, kemudian tekanan fluida digunakan untuk menghasilkan energi kinetis memutar turbin, yang terhubung kepada generator atau alternator yang mengubah putaran menjadi energi listrik.

Thermoelectric Generator merupakan alat yang memanfaatkan efek termoelektrik seperti efek *Thomson* dan efek *Seebeck* untuk menghasilkan energinya. Dalam aplikasi umum, modul ini biasa disebut dengan modul *Peltier*, dan seringkali ditemukan terutama dalam termokopel dan sensor temperatur, atau sebagai pendingin (untuk *Thermoelectric Cooler*). Penelitian mengenai TEG sebagai sebuah metode menghasilkan daya secara independen mendapatkan hasil yang membuktikan bahwa dengan sendirinya, efisiensi daya yang dihasilkan oleh TEG tidak begitu besar. Seperti pada jenis TEG yang umumnya digunakan yaitu *Bismuth-Telluride*. Material TE (*Thermoelectric*) berdasarkan sistem *Bismuth-Telluride* (BiTe) banyak digunakan dalam aplikasi mulai dari pembangkitan daya hingga sensor dan pendinginan. Terdapat kebutuhan pasar material BiTe dengan *figure of merit* (zT) dan modul TEG dengan efisiensi konversi yang tinggi diatas temperatur menengah (25°C - 250°C). Terobosan terbaru yang ditemukan ada pada penelitian yang memungkinkan desain material TE berbasis BiTe dan menghasilkan modul dengan efisiensi konversi 8%, yang mencapai 40% lebih tinggi dibandingkan modul komersial terbaru. Rata-rata zT untuk paduan *Bismuth Telluride* sebesar 1.08 untuk *p-type* dan 0.84 untuk *n-type* dapat dicapai untuk temperatur antara 25°C dan 250°C . Peningkatan signifikan nilai zT tercapai melalui rekayasa komposisi dan kecacatan baik dalam materiil *p-type* maupun *n-type*. Efisiensi konversi yang tinggi akan mempercepat transisi penggunaan TEG dalam pemulihan energi panas.

Baik dalam sistem terbuka atau tertutup pada sebuah mesin kalor, akan terjadi sebuah gradien temperatur antara fluida kerja dan sumber panas, terkecuali saat sumber panas dihilangkan dimana fluida kerja tidak akan mengalir dan pembangkit tidak operasional. Dalam kebanyakan aplikasi gradien temperatur ini dikontrol dengan menggunakan system pendingin atau radiator pada saat memasuki kondensor untuk uap. Hal ini mengakibatkan adanya gradien temperatur yang terjadi antara cairan pendingin berupa air dan uap. Untuk pendinginan menggunakan kondensor yang secara aktif memompa panas keluar dari sistem. Kalor terbuang ini akan dilepaskan keluar sistem dan diterima oleh lingkungan yang mengakibatkan kenaikan temperatur sekitar kondensor. Hal ini mengakibatkan adanya gradien temperatur antar lingkungan dan kondensor yang terbuang sia-sia. Akan tetapi dengan menggunakan prinsip termoelektrik, adanya gradien temperatur merupakan sebuah potensial energi listrik, layaknya suatu sistem *heat recovery*. Sehingga kalor terbuang ini dapat digunakan untuk mensubstitusikan sebagian daya yang dibutuhkan kondensor dengan menghasilkan daya diluar siklus Rankine sistem. Penelitian ini berbedadengan beberapa penelitian terkait dimana dalam penelitian ini tidak terfokus terhadap model PLTU ataupun TEG secara independen melainkan adanya pemanfaatan TEG sebagai sebuah metode untuk meningkatkan *output* sistem secara keseluruhan tanpa mengubah konstruksi turbin uap. Adapun pengaruh dari diperkenalkannya material termoelektrik kedalam sistem penukar panas dalam konteks generasi daya adalah bahan kajian dalam tugas akhir ini dengan judul Pengaruh Integrasi TEG Terhadap *Output* Pembangkit Listrik Tenaga Uap Mikro Skala Lab dengan menggunakan TE berbahan BiTe.

METODE PENELITIAN

Tempat dimana penelitian akan dilakukan akan bertempat di Laboratorium Mesin Universitas Pancasila, Jakarta dan pada domisili penulis di Tangerang Selatan. Waktu penelitian akan berlangsung dari 23 April sampai dengan 31 Agustus 2023. Pada penelitian ini, alat yang digunakan untuk mencari data adalah Termokopel, Manometer, Termometer. Dengan bahan berupa fireproof clay, air, dan bahan bakar butana. Adapun dalam melaksanakan penelitian diperlukan beberapa alat tertentu untuk mensimulasikan skenario sistem pembangkitan daya. Alat ini akan digunakan dua kali, dengan kali pertama digunakan untuk menentukan output dari alat tersebut sebagai pembangkit listrik bertenaga uap biasa, dan kali kedua menentukan pengaruh ditambahkannya modul Peltier terhadap output yang dihasilkan.



Gambar 1 Skema Susunan Komponen

Gambar 1 menunjukkan skema rencana alat yang akan digunakan untuk penelitian dengan menggunakan komponen dasar berupa :

1. *Water Pump*

Bagian ini berfungsi sebagai layaknya *Boiler Feed Pump* untuk memompa air kedalam boiler untuk menyediakan fluida untuk diubah menjadi uap serta berfungsi menjaga suplai air konstan agar boiler tidak mengalami *overheating*.

2. *Radiator 120 mm*

Bagian radiator ini berfungsi sebagai ruang pertukaran panas atau *heat exchanger* dimana terjadi pertukaran panas antara sumber panas dengan fluida yang digunakan. Pada bagian ini fluida berupa air akan menguap menjadi uap sehingga disebut *boiler*.

3. *Keran Ball-Valve*

Bagian ini berfungsi untuk mengisolasi aliran dan memungkinkan dilakukan pengukuran langsung dengan dan tanpa integrasi TEG tanpa pembuatan *set up* baru.

4. *Turbine Flow Generator*

Bagian ini memiliki turbin di dalamnya yang akan berputar saat dialiri uap dan menghasilkan kerja berguna dalam sistem untuk mengubah kalor mejadi kerja.

5. *Cooling Radiator*

Bagian ini berfungsi untuk melepaskan panas yang tersisa dari uap yang telah melalui turbin dan mendinginkannya kembali menjadi berbentuk air. Radiator ini menjalankan fungsi layaknya sebuah kondensator dalam sebuah turbin uap.

6. *Peltier Module (TEG)*

Modul Peltier yang akan digunakan adalah berupa *Thermoelectric Generator* (TEG). Modul ini digunakan untuk mengkonversi langsung diferensial temperature menjadi potensial listrik dan menghasilkan energi listrik melalui efek Seebeck atau Termolistrik. TEG diapit diantara dua *Aluminium Waterblock* 40x40 mm untuk sisi panas dan sisi dinginnya agar tidak terpapar panas langsung yang dapat merusak TEG

7. *Micro Auxiliary Pump*

Bagian ini berfungsi sebagai layaknya *Boiler Feed Pump* untuk memompa air, akan tetapi pada bagian ini, komponen memastikan bahwa air baru dan air *feed water* tetap mengalir dan juga untuk memastikan adanya aliran air yang melalui *cold side* TEG yang digunakan

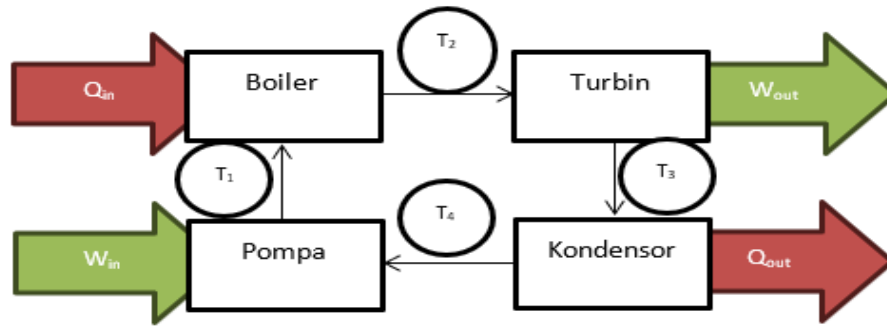
8. *Burner Stove*

Bagian ini menjalani fungsi yang sama seperti tungku pembakaran dalam sebuah pembangkit listrik tenaga uap. Dimana bagian ini menyediakan energi panas yang dihasilkan dari pembakaran untuk mengubah air menjadi uap didalam boiler.

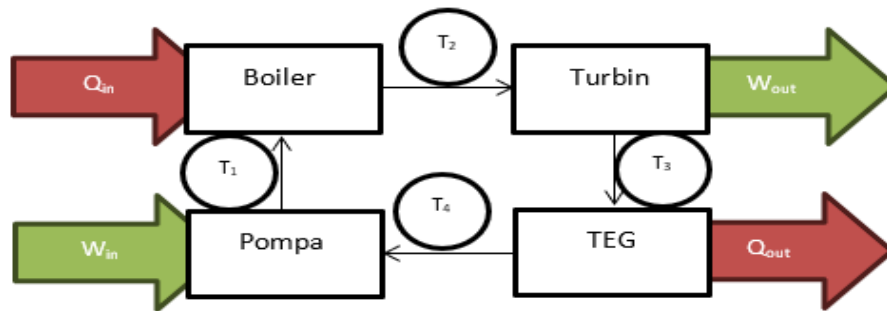
Masing-masing komponen dijalankan untuk memastikan agar komponen tersebut dapat bekerja. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa operasi alat sesuai dengan spesifikasi produk untuk menghindari adanya inkonsistensi pada perhitungan. Kemudian, komponen dirangkai dengan sesuai mengikuti skema pada Gambar 3.5 dan dijalankan pengujian untuk memastikan skema dapat bekerja. Hal yang diperhatikan adalah agar tekanan tidak melebihi batas kekuatan komponen dan aliran kuat untuk bersirkulasi didalam sistem sebagai parameternya. Jika tekanan tidak mengakibatkan deformasi pada boiler dan air dapat terus mengalir kembali lagi ke pompa, maka alat dapat bekerja. Percobaan dilakukan dua kali, dengan percobaan pertama kali melalui keran *Ball-Valve* uap buang turbin diarahkan kedalam kondensator untuk mencari variabel independen PLTU tanpa penggunaan TEG, dan percobaan kedua pada keran *Ball-Valve* diarahkan menuju kedalam TEG, untuk mencari variabel dependen PLTU dengan integrasi TEG.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini, pengujian dilakukan terhadap skema turbin uap dengan menggunakan siklus turbin gas Rankine. Dengan kondisi operasi dianggap konstan dan perubahan energi potensial dan kinetik diabaikan serta tanpa adanya *heat loss*. Maka ilustrasi siklus penelitian disesuaikan dengan data hasil yang didapatkan.



Gambar 4.1 Diagram Alat Penelitian Yang Dilakukan Tanpa TEG



Gambar 4.2 Diagram Alat Penelitian Yang Dilakukan Dengan TEG

Dengan melakukan pengukuran berulang dan menggunakan nilai rata-rata, maka didapatkan data pada setiap titik selama alat bekerja. Untuk menyederhanakan perhitungan, dianggap bahwa operasi alat terjadi dengan siklus Rankine ideal mengabaikan penurunan tekanan dan rugi aliran. Integrasi TEG dilakukan dengan menukar peran kondensator sebagai media pelepasan panas dengan menggunakan TEG, dengan harapan adanya diferensial temperatur pada lokasi tersebut dapat menghasilkan daya listrik secara paralel yang dapat mengkompensasi penurunan efisiensi Hx yang muncul akibat digunakannya TEG dibandingkan kondensator. Seperti yang terlihat pada gambar, susunan percobaan yang dilakukan menggunakan *set-up* yang sama, dimana yang membedakan adalah posisi keran yang mengubah arah aliran yang sebelumnya menuju kondensator menjadi menuju TEG. Sehingga seluruh proses yang terjadi sama seperti percobaan sebelumnya, dengan perbedaannya terletak pada penggantian komponen kondensator menjadi TEG untuk menjalankan fungsi yang sama untuk melepas panas tetapi dengan menghasilkan daya tambahan. Melalui pengamatan, didapatkan data pada setiap titiknya :

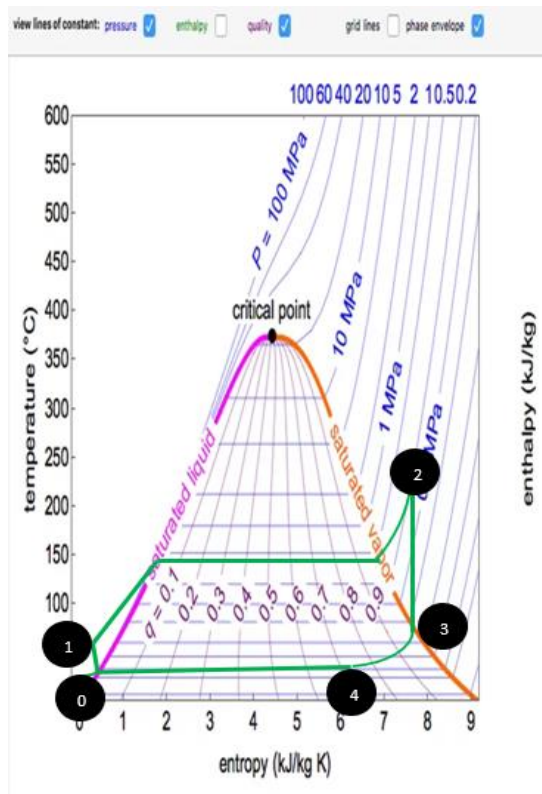
Tabel 4.1 Suhu Pada Model PLTU Mikro

Suhu Pada	Tanpa TEG	Dengan TEG
T ₁	37,4 °C	82 °C
T ₂	221,3 °C	380,6 °C
T ₃	133,8 °C	164,7 °C
T ₄	85,6 °C	89,3 °C
T ₀	26,3 °C	62,2 °C

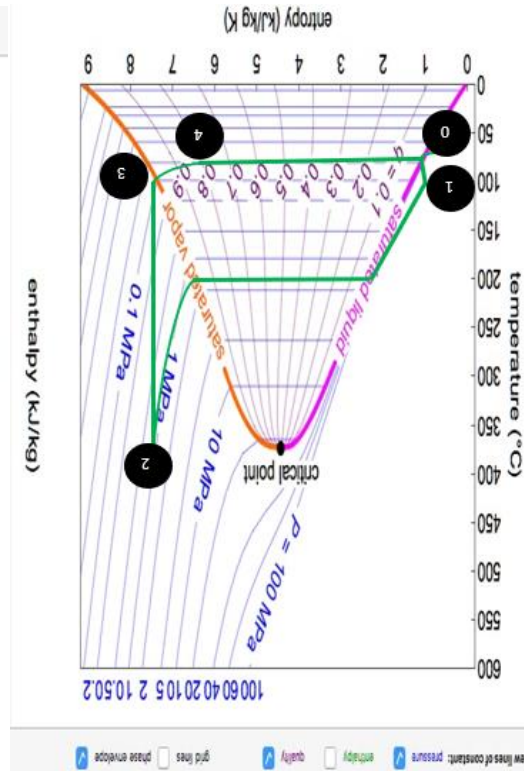
Data yang didapatkan dengan menggunakan metode interpolasi dapat digunakan untuk mendapatkan nilai entalpi dari masing-masing proses dalam siklus. Hasil yang didapatkan akan digunakan dalam perhitungan untuk mencari nilai dari data terkait yang berupa Q_{in} , Q_{out} , W_{in} , dan W_{out} , yang dapat digunakan untuk mencari Kerja Net dan Efisiensi Termal dari sistem. Data yang sama juga digunakan untuk mencari Daya yang dihasilkan oleh TEG pada sistem yang terintegrasi dengan TEG, yang kemudian ditambahkan secara paralel kedalam total *output* dari model PLTU dengan integrasi TEG untuk mencari tahu pengaruhnya. Berdasarkan analisa percobaan yang telah dilakukan didapatkan data yang dapat menggambarkan proses termodinamika yang terjadi pada sistem.

Data	Tanpa TEG	Dengan TEG
T_1	37,4 °C	82 °C
T_2	221,3 °C	380,6 °C
T_3	133,8 °C	164,7 °C
T_4	85,6 °C	89,3 °C
T_0	26,3 °C	62,2 °C
Efisiensi Termal	48%	50%
Total Daya	4,461 W	4,761 W

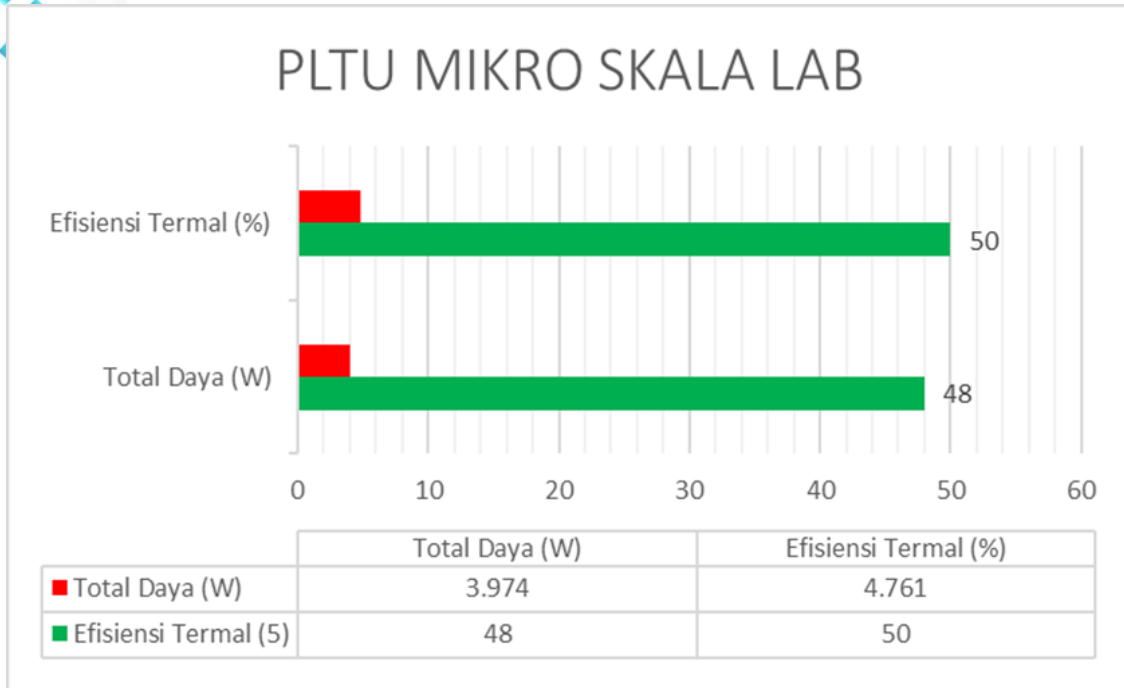
Tabel 4.14 Data Hasil Analisa



Gambar 4.3 Siklus Penelitian Yang Dilakukan Tanpa TEG



Gambar 4.4 Siklus Penelitian Yang Dilakukan Terintegrasi TEG



Gambar 4.5 Perbandingan Model Penelitian Menggunakan TEG

Peningkatan efisiensi yang dialami oleh model eksperimen sebelum dan sesudah menggunakan TEG tidak signifikan, akan tetapi menunjukkan adanya peningkatan. Hal ini dikarenakan adanya TEG sebagai variabel kontrol terkait dengan fungsinya sebagai rejeksi panas yang memungkinkan adanya kalor mengalir kembali kedalam feedwater. Hal ini meningkatkan suhu T_1 meningkat, yang bertindak layaknya economizer pada PLTU yang memanaskan air sebelum memasuki boiler, hal ini mengakibatkan adanya peningkatan efisiensi seperti ditunjukkan melalui siklus. Akan tetapi hal ini merupakan variabel bebas yang tidak membuktikan adanya peningkatan efisiensi termal yang dapat diasosiasikan dengan integrasi TEG. Akan tetapi yang terjadi adalah adanya peningkatan daya output keseluruhan dengan jumlah signifikan dari sistem model PLTU mikro skala lab akibat pembangkitan daya secara paralel menggunakan TEG.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi Tuhan Yang Maha Esa dan para akademisi serta orangtua dan teman yang mendukung, dan Bapak I Gede Eka Lesmana ST. MT., serta Ibu Rovida Camalia Hartantrie ST., MT., yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir dan segala proses terkait dalam Skripsi Tugas Akhir Program Studi Strata Satu Fakultas Teknik Jurusan Mesin Reguler Khusus Universitas Pancasila.

DAFTAR PUSTAKA

E. Khalil, "Steam Power Plant Fundamentals," Thermal Engineering in Power Systems, no. 42, pp. 99-101, 2008.

R. Apriandi and A. Mursadin, "Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test PLTU PT. Indocement P-12 Tarjun," Universitas Teknik Lambung Mangkurat, Banjarbaru, 2016.

M. Shilih, "Sejarah PLTU Pertama di Indonesia & Kasus Dirut PLN Sofyan Basir," 2019. [Online]. Available: <https://tirto.id/sejarah-pltu-pertama-di-indonesia-kasus-dirut-pln-sofyan-basir-dm4d>. [Diakses 3 April 2023]

Y. Fauzie, "Ambisi Pensiunkan PLTU dan Ketergantungan Besar RI ke Kilau Emas Hitam," 2021. [Online]. Available: <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20211104065059-85-716359/ambisi-pensiunkan-pltu-dan-ketergantungan-besar-ri-ke-kilau-emas-hitam/1>. [Diakses 3 April 2023]

Artikel Teknologi, "Turbin Uap". 2015. [Online]. Available: <https://artikel-teknologi.com/turbin-uap/>. [Diakses 3 April 2023]

R. Ronquilo, "Understanding Heat Exchangers". 2023. [Online]. Available: <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/>. [Diakses 3 April 2023]

J. Simonson, "Engineering Heat Transfer", London: Red Globe Press, 1975
Course Hero, "The Three Laws of Thermodynamics". 2022. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/study-guides/introchem/the-three-laws-of-thermodynamics/>. [Diakses 4 April 2023]

CG Thermal, "Heat Exchangers". 2017. [Online]. Available: <https://cgthermal.com/heat-exchangers/>. [Diakses 4 April 2023]

Thermopedia, "Heat Exchangers". 2015. [Online]. Available: <https://thermopedia.com/navigation/1536/>. [Diakses 5 April 2023]

Encyclopaedia Britannica, "Thermoelectricity". 2009. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/thermoelectricity/>. [Diakses 5 April 2023]

DDU College, "Thermoelectric Seebeck Effect". 2018. [Online]. Available: https://dducollegedu.ac.in/Datafiles/cms/ecourse%20content/Applied%20Physics_Thermoelectric%20effect.pdf/. [Diakses 5 April 2023]

Techopedia, "Peltier Effect". 2015. [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/14765/peltier-effect/>. [Diakses 5 April 2023]

Brainkart, "Thomson Effect". 2015. [Online]. Available: https://www.brainkart.com/article/Thomson-effect_38436/. [Diakses 5 April 2023]

A. Weidenkaff, "Thermoelectricity for Future Sustainable Energy Technologies," dalam LNES, Stuttgart, 2016.

C. Goupil, "Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements," Paris: John Wiley & Sons, 2015.

Engineering ToolBox, “Saturated Steam - Properties with Imperial Units”. 2003. [online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/saturated-steam-properties-d_273.html/. [Diakses 7 April 2023]

N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, F. Tounsi, M. Ismael, “A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators: Technologies and Common Application,” *Energy Reports*, Vol. 6, Supplement 7, pp 264-287, 2020.

A. Nozariabmarz, B. Poudel, W. Li, H. B. Kang, H. Zhu, S. Priya, “Bismuth Telluride Thermoelectrics with 8% Module Efficiency for Waste Heat Recovery Application,” *CellPress*, Vol. 23, Issue 7, 2020.

W. Chen, Y. Lin, ”Performance Comparison of Thermoelectric Generators Using Different Materials,” in 10th ICEAE, Hong Kong, 2018.

L.S. Hewawasam et al., “Waste Heat Recovery from Thermo-Electric Generators,” *Energy Reports*, Vol. 6, Supplement 2, pp 474-479, 2020.

A. Montecucco, J. Siviter, A. Knox, “The Effect of Temperature Mismatch on Thermoelectric Generators Electrically Connected in Series and Parallel,” University of Glasgow, Glasgow, 2014