

Pembuatan Pembangkit Listrik Termoelektrik pada Kompor Berbahan Bakar Pellet Biomassa Kayu Karet

Devanka Arya Levin^{1*}, Jonatan Sinurat², Anak Agung Ngurah Amrita³, Ida Bagus Gede Manuaba⁴

¹⁻⁴Universitas Udayana, Bali, Indonesia

*Penulis Korespondensi: aryadevanka@gmail.com¹

Abstract. Biomass is one of the materials that can be utilized as fuel. To ensure optimal quality, effective management of biomass is required to maximize its potential. One possible approach is the application of a biomass stove fueled by rubber wood pellets. By integrating a thermoelectric generator, data can be obtained to determine whether all aspects meet the established standards. This system is designed to generate electrical energy from combustion heat, supported by components such as a buck-boost converter and a 3V DC lamp. Testing was carried out using proximate and ultimate analyses on the fuel as well as the Water Boiling Test (WBT) on the stove, referring to SNI 8021:2020 and SNI 8021:2014 standards. The results showed that rubber wood pellets contained 7.64% moisture and had a calorific value of 4050 kcal/kg. The stove demonstrated an efficiency of 23.53%–37.28% and a fuel consumption rate of 0.61–0.77 kg/hour, both of which meet the requirements. In addition, the thermoelectric generator produced a voltage of 3.6 V and an electric current of 0.05 A, which are higher than those reported in previous studies (2.06 V and 0.01 A, respectively). Therefore, this thermoelectric biomass stove system is considered successful and feasible for further development as an alternative energy application.

Keywords: Biomass Stove; Rubber Wood Biomass; Stove; Thermoelectric Generator; Thermoelectric

Abstrak. Biomassa merupakan salah satu bahan yang dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar. Untuk memastikan kualitas yang optimal pada biomassa, diperlukan pengelolaan yang efektif agar dapat dimanfaatkan dengan baik. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah dengan menerapkan Kompor Biomassa Berbahan Bakar Pellet Kayu Karet. Dengan mengintegrasikan generator termoelektrik, data dapat ditemukan untuk menentukan dari segala aspek sudah memenuhi standar yang sudah ditentukan. Sistem ini dirancang untuk menghasilkan energi listrik dari panas pembakaran, dengan dukungan komponen seperti buck-boost converter dan lampu DC 3V. Pengujian dilakukan dengan metode proksimat dan ultimat pada bahan bakar serta Water Boiling Test (WBT) pada kompor, mengacu pada standar SNI 8021:2020 dan SNI 8021:2014. Hasil menunjukkan bahwa pellet kayu karet memiliki kadar air 7,64 % dan nilai kalor 4050 kkal/kg. Efisiensi kompor bernilai 23,53% - 37,28% serta laju konsumsi bahan bakar sebesar 0,61 – 0,77 kg/jam juga memenuhi ketentuan. Selain itu, generator termoelektrik yang digunakan menghasilkan tegangan 3,6 V dan arus listrik 0,05 A yang lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya yaitu tegangan 2,06 V dan arus listrik 0,01 A. Dengan demikian, sistem kompor biomassa termoelektrik ini dinilai berhasil dan layak dikembangkan untuk aplikasi energi alternatif.

Kata kunci: Biomassa Kayu Karet; Efisiensi Energi; Energi Alternatif; Kompor; Termoelektrik

1. LATAR BELAKANG

Penggunaan energi fosil yang berlebihan telah menimbulkan berbagai masalah lingkungan, seperti pemanasan global dan polusi udara. Ketergantungan pada sumber energi ini juga semakin menipisnya cadangan energi fosil yang ada. Dalam konteks ini, penggunaan sumber energi alternatif menjadi semakin penting. Biomassa, termasuk dalam bentuk pellet biomassa, telah diakui sebagai salah satu solusi yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui. Potensi biomassa sebagai sumber energi yang berkelanjutan sangat besar, dan teknologi yang tepat dapat mengubahnya menjadi solusi utama dalam mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

Ketersediaan biomassa di Indonesia yang sangat banyak dan belum banyak diaplikasikan untuk bahan baku pembuatan bahan bakar. Pohon karet adalah biomassa yang yang belimpah di Indonesia dan dapat dijadikan sebagai bahan pembuatan pelet. Menurut Direktorat Jenderal Perkebunan pada Tahun 2020 Luas areal karet di Indonesia mencapai 3,6 juta hektar. Hal ini meningkatkan potensi pemanfaatan limbah kayu karet sangat besar di Indonesia. Limbah kayu karet yang berasal dari pohon tidak produktif dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan pellet biomassa, furniture, papan partikel, hingga arang aktif yang bernilai ekonomi tinggi dan ramah lingkungan.

Peraturan Presiden RI tahun 2017 menetapkan bahwa pada tahun 2025 energi baru dan terbarukan sebesar 23%, serta pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebanyak 29% melalui gagasan EBT ke PLN (Humas EBTKE, 2017). Untuk mengatasi hal tersebut, Energi biomassa dapat menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil karena beberapa sifatnya yang menguntungkan yaitu dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang dapat diperbaharui (renewable resources), relatif tidak mengandung sulfur sehingga tidak menyebabkan polusi udara, dan mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hutan dan pertanian (Dede Sukandar, 2016).

Biomassa berbahan bakar kayu karet memiliki potensi yang tinggi sebagai pengganti bahan bakar konvensional dengan menggunakan energi berbentuk pellet. Berdasarkan penelitian sebelumnya, telah dilakukan empat pengujian terhadap pellet dengan bahan berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa pellet dari kayu karet memiliki nilai kalor tertinggi kedua setelah kayu kamper, serta kadar air yang relatif rendah (Dwi Endah Lestari, 2009).

Agar pellet biomassa dapat digunakan secara maksimal, Salah satu alat yang digunakan untuk pengimplementasian energi biomassa skala kecil adalah kompor berbahan baku Biomassa. Kompor berbahan baku biomassa adalah alat yang digunakan untuk mengkonversikan energi potensial biomassa menjadi energi termal. Pemilihan ukuran dan bentuk pelet juga sangat mempengaruhi temperatur dan waktu pembakaran (Wahyu Saputro, 2020). Bentuk silinder pellet adalah bentuk yang memiliki kepadatan yang lebih tinggi dan bentuk lebih kecil sehingga mudah untuk digunakan, disimpan serta memiliki kalor (nilai panas) yang tinggi. Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar pada kompor membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan pemanfaatan sumber daya terbarukan.

Untuk memperoleh efisiensi kompor yang baik, desain teknis kompor perlu diperhatikan. Desain pembakaran yang baik dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar. Kompor harus dirancang untuk menciptakan kondisi pembakaran yang optimal,

termasuk distribusi udara dan bahan bakar yang tepat. Sirkulasi udara yang baik membantu pembakaran sempurna, mengurangi emisi zat beracun, dan meningkatkan efisiensi energi. Desain isolasi panas yang baik juga dapat meningkatkan transfer panas ke beban memasak dan mengurangi kehilangan panas ke lingkungan sekitar. Hal ini dapat membantu memaksimalkan efisiensi konversi energi dari bahan bakar ke panas yang digunakan untuk memasak (Sugiono, 2017). Untuk Mengetahui efisiensi termal pada kompor biomassa, akan dilakukan dengan menggunakan metode Water Boiling Test (WBT). Metode WBT memperlihatkan gambaran tentang seberapa baik kompor biomassa dapat mentransfer panas ke air dan seberapa efisien bahan bakar yang digunakan. Metode ini dapat digunakan untuk mengukur efisiensi termal, laju konsumsi bahan bakar (FCR).

Hasil panas pembakaran dari kompor biomassa juga dapat dimanfaatkan menjadi energi Listrik menggunakan teknologi termoelektrik. Yang dimaksud dari termoelektrik adalah Hasil pembakaran dari kompor tersebut akan menghasilkan panas, dan selanjutnya akan menghasilkan energi Listrik. Termoelektrik adalah suatu fenomena di mana perubahan suhu dapat menghasilkan arus listrik atau sebaliknya, yaitu arus listrik dapat menciptakan perubahan suhu (Mohamad Diki, 2022). Pemanfaatan termoelektrik pada kompor sering kali melibatkan bahan- bahan termoelektrik. Termoelektrik didasarkan pada efek Seebeck, yaitu fenomena di mana perbedaan suhu antara dua ujung bahan termoelektrik dapat menyebabkan terjadinya arus listrik. Prinsip ini menjadi dasar bagi pengembangan teknologi termoelektrik pada berbagai aplikasi, termasuk kompor.

Pemanfaatan termoelektrik generator ini kemudian di pasangkan pada kompor biomassa untuk dimanfaatkan panas pembuangannya dan kemudian diubah menjadi energi Listrik. Material termoelektrik diletakkan sedemikian rupa dalam kompor kemudian dirangkai untuk mendapatkan panasnya dan menghubungkan antara sumber sisi panas dan sisi dingin dengan dibantu dengan kipas/es, dimana mekanisme ini dapat menghasilkan sejumlah arus listrik . Termoelektrik merupakan alat yang memiliki prinsip fisika dalam kerjanya untuk mengubah energi listrik menjadi energi panas, namun memiliki fungsi lain yang dapat dimanfaatkan pada termoelektrik yang jarang diketahui masyarakat yaitu kebalikannya dengan mengubah energi panas menjadi energi listrik

Penggunaan kompor ini tidak hanya untuk memasak, tetapi juga dapat memberikan akses ke listrik yang dapat digunakan untuk penerangan ataupun pengisian daya perangkat elektronik kecil. Dengan mengandalkan panas yang dihasilkan dari proses memasak atau pembakaran bahan bakar, kompor ini dapat menghasilkan listrik tanpa perlu mengandalkan infrastruktur jaringan listrik yang mahal dan sulit diimplementasikan di daerah terpencil.

Sejumlah penelitian terdahulu telah dilakukan untuk memanfaatkan energi panas dari berbagai sumber, Pada penelitian (Fajar, 2022), 10 modul termoelektrik generator TEC-12706 diatur secara seri untuk menghasilkan tegangan tinggi dan paralel untuk arus yang kuat menggunakan 10 modul termoelektrik tipe SP1848- 27145 pada kompor biomassa berbentuk balok dengan berbagai bahan bakar biomassa. Hasilnya, kompor biomassa dengan generator termoelektrik yang dapat menghidupkan lampu LED dan menyimpan energi pada baterai DC Ni-Cd menunjukkan kemampuan 1 buah termoelektrik generator tipe SP1848-27145 yang diterapkan pada kompor biomassa, menggunakan kipas sebagai pendingin generator termoelektrik.

Dari masalah dan penelitian di atas, maka penulis terdorong untuk melakukan penelitian untuk memanfaatkan pellet biomassa berbahan dasar kayu karet sebagai bahan bakar pada kompor biomassa yang efisien dalam berbagai aspek, seperti durasi operasi, konsumsi bahan bakar, temperatur pembakaran, serta memiliki daya tahan yang tinggi. Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada penggunaan panas buangan pembakaran sebagai sumber panas untuk generator termoelektrik. Tujuannya adalah menciptakan alternatif pembangkit listrik skala kecil yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi utama, yaitu PT. Berkah Biomassa di Medan untuk pembuatan pellet biomassa, serta kampus Jimbaran untuk perancangan kompor biomassa dan generator termoelektrik. Penelitian berlangsung selama enam bulan, mulai Juni 2024 hingga Januari 2025. Tahapan penelitian mencakup studi literatur, observasi langsung, serta eksperimen laboratorium dengan bahan baku utama berupa kayu karet yang dipilih karena ketersediaannya melimpah dan memiliki nilai kalor relatif tinggi. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan menghasilkan rancangan pellet, kompor biomassa, dan generator termoelektrik yang sesuai standar efisiensi energi serta ramah lingkungan (Tri Rubiyant, 2019).

Sumber data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengukuran dan pengujian pellet biomassa, kompor biomassa, serta generator termoelektrik. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan melalui jurnal ilmiah, tugas akhir, artikel, dan buku-buku yang relevan dengan biomassa serta teknologi energi terbarukan. Metode studi literatur digunakan untuk memperkuat dasar teori dan rancangan, sedangkan metode observasi langsung dilakukan guna mengamati fenomena teknis yang

muncul selama proses pembuatan dan pengujian alat. Kombinasi kedua metode ini memberikan validitas yang lebih kuat pada hasil penelitian (Sugiyono, 2019).

Instrumen penelitian meliputi peralatan mekanis dan elektronik yang menunjang perancangan serta pengujian. Pada tahap pembuatan pellet digunakan mesin chipper, hammer mill, mesin drying, pellet mill, dan kalorimeter bom. Untuk kompor biomassa, instrumen utama berupa piringan baja, las besi, bor listrik, kipas, serta wajan untuk pengujian Water Boiling Test sesuai standar SNI 7926:2013. Sedangkan pada generator termoelektrik digunakan modul Peltier TEC1-12706, heatsink, buck boost converter, serta multimeter untuk mengukur tegangan keluaran. Seluruh rancangan dan pengujian mengacu pada Standar Nasional Indonesia, seperti SNI 8021:2020 untuk kualitas pellet dan SNI 7926:2013 untuk efisiensi termal kompor, sehingga hasil penelitian memiliki dasar ilmiah yang kuat serta berpotensi untuk diterapkan secara praktis (BSN, 2020; BSN, 2013)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian proksimat, Ultimat dan Kalor pada Pelet Biomassa

Pengujian Proximat dan ultimate serta kalor pada pellet Biomassa menggunakan data pengujian dari PT. Berkah Biomassa Nusantara dan melakukan pengujian di Laboratorium Teknik Mesin Udayana. Analisa proximate terdiri dari pengujian kadar air, bahan menguap, kadar abu, dan fixed carbon. Analisa Ultimate terdiri dari pengujian komposisi unsur-unsur kimia dalam bahan baku biomassa seperti kadar karbon, Hidrogen, Nitrogen, Sulfur dan Hidrogen.

Terdapat perbedaan perlakuan pada proses pengeringan antara pengujian tahun 2023 dan 2024 sebelum bahan masuk ke mesin pellet mill. Pada sampel tahun 2023, kadar air berkisar antara 7,5% hingga 20%, yang secara signifikan memengaruhi proses pembentukan pellet. Kelembapan yang terlalu tinggi menghambat terbentuknya ikatan antar partikel biomassa selama proses penekanan, sehingga menghasilkan pellet yang mudah rapuh dan pecah. Selain itu, kandungan air berlebih juga dapat menyebabkan pellet mengembang atau retak saat proses pemanasan. Sedangkan pada saat kadar air terlalu rendah pellet mengalami Kesulitan Pembentukan Partikel sulit menyatu sehingga pellet menjadi rapuh dan tidak kompak. Sebaliknya, pada pengujian tahun 2024, kadar air dikendalikan pada kisaran 10% hingga 12%. Rentang ini dianggap ideal karena memberikan kelembapan yang cukup untuk membentuk ikatan mekanis dan termal yang kuat, sehingga menghasilkan pellet yang padat, stabil, dan tidak mudah rusak.

Tabel 1. Pengujian proximate biomassa kayu pellet data pengujian (2023).

No.	Jenis Pengujian	Standar SNI 8021:2020.	Hasil pengujian 2023	Hasil pengujian 2024
1	Kadar air	Max. 12 %	7,53%	7,64%
2	Fixed carbon	Min. 14 %	14.87%	17.47%
3	Kadar abu	Max. 1.5 %	2.11%	0,33%
4	Bahan mudah menguap	Max. 80%	75.49%	74.56%
5	Nilai Kalor	Min 4000	4329	4050

Kandungan air merupakan salah satu faktor yang memengaruhi nilai kalor suatu bahan bakar. Semakin tinggi kadar air, maka nilai kalor cenderung menurun. Hal ini dapat dilihat pada hasil pengujian dalam tabel di atas, di mana bahan bakar dengan kadar air 7,64% dan 7,53% menunjukkan adanya penurunan nilai kalor seiring bertambahnya kadar air. Hasil ini sesuai dengan teori bahwa semakin tinggi kadar air dalam bahan bakar, semakin rendah nilai kalor yang dihasilkan.

Berdasarkan data pengujian, kadar air pada sampel sudah berada di bawah 12% dan nilai kalor yang diperoleh melebihi 4000 kkal/kg, sehingga telah memenuhi standar SNI 8021:2020.

Kadar abu yang tinggi dapat menurunkan efisiensi proses pembakaran, karena sebagian energi justru terserap untuk memanaskan dan menangani sisa abu, bukan untuk menghasilkan panas yang bermanfaat. Pelet kayu karet memiliki kadar abu yang relatif rendah, yaitu antara 0,33% hingga 2,11%, yang menunjukkan bahwa pembakarannya menghasilkan emisi abu (ash) yang cukup sedikit. Berdasarkan hasil pengujian tahun 2023, kadar abu belum memenuhi batas maksimal 1,5% sesuai dengan standar SNI 8021:2020. Namun, pada pengujian tahun 2024, kadar abu sudah berada dalam kisaran yang sesuai dengan standar tersebut.

Kandungan bahan mudah menguap (volatile matter) dan karbon padat (fixed carbon) memiliki pengaruh terhadap nilai kalor suatu bahan bakar. Semakin tinggi kandungan bahan mudah menguap, maka semakin besar potensi biomassa untuk terbakar dengan mudah. Sementara itu, semakin banyak karbon yang terkandung dalam biomassa, semakin besar pula jumlah zat yang dapat bereaksi selama proses pembakaran, sehingga mendukung terjadinya pembakaran yang optimal. Berdasarkan hasil pengujian, kadar karbon padat tercatat sebesar 14,87% dan 17,47%, yang telah memenuhi persyaratan dalam SNI 8021:2020. Demikian juga

dengan kandungan bahan mudah menguap, yang menunjukkan sedikit perbedaan antara hasil pengujian tahun 2023 sebesar 75,49% dan tahun 2024 sebesar 74,56%. Jika mengacu pada standar SNI 8021:2020, nilai pada pengujian tahun 2024 telah sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Pengujian proksimat pada bahan bakar padat diatur dalam SNI 8021:2020, yang mengacu pada metode standar untuk menentukan komposisi utama bahan bakar. Standar SNI memastikan bahwa hasil pengujian memiliki kualitas yang seragam dan dapat diandalkan, sehingga bahan bakar yang diuji memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian proksimat yang mengacu pada Tabel 1 dan Tabel 2 mengenai parameter uji bahan bakar sesuai dengan SNI 8021:2020, dapat disimpulkan bahwa bahan bakar tersebut telah memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI).

Tabel 2. Pengujian ultimate dan kalor biomassa pellet kayu.

No Jenis pengujian	standar SNI 8021:2020	Hasil pengujian
1 Carbon	-	45.01%
2 Nitrogen	-	0.40%
3 Sulfur	<0.05%	0.03%
4 Oksigen	-	46.38%
5 Hidrogen	-	6.06%
6 Clorin	<0.03%	0.02%

Pada tabel diatas menyajikan data unsur unsur kimia penyusun biomassa. Berdasarkan percobaan dwi endah lestari nilai kalor dipengaruhi oleh banyaknya unsur C,H,O,S,N, dan kadar ash dalam biomassa. Semakin banyak Unsur C,H, dan S semakin besar nilai kalornya. Namun semakin besar nilai O,N dan kadar ash maka akan semakin mengurangi nilai kalor. Batas kadar sulfur (belerang) dan clorin dalam biomassa padat diatur dalam beberapa standar, salah satunya adalah **SNI 8021:2020** untuk pelet kayu (wood pellet) sebagai bahan bakar padat. Kadar sulfur maksimum yang diperbolehkan adalah 0,05% dan kadar clorin (Cl) yang di perbolehkan adalah Kurang dari 0.03%.

Kadar sulfur yang tinggi dalam bahan bakar biomassa dapat menyebabkan emisi gas SO₂ saat pembakaran, yang bersifat beracun, korosif, dan mencemari lingkungan. Oleh karena itu, menjaga kadar sulfur tetap rendah sangat penting demi efisiensi pembakaran dan kelestarian lingkungan. Klorin yang berlebih dalam biomassa dapat menyebabkan Pembakaran biomassa dengan kandungan klorin tinggi menghasilkan gas beracun seperti HCl dan zat karsinogenik yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan. Klorin bereaksi dengan

logam pada suhu tinggi dan membentuk senyawa seperti asam klorida (HCl) yang bersifat korosif. Ini menyebabkan kerusakan serius pada dinding boiler, pipa, dan sistem pembakaran, sehingga umur peralatan menjadi pendek dan biaya perawatan meningkat. Secara garis besar nilai kalor akan turun bila kandungan air naik. Air yang terkandung dalam biomassa akan menguap menjadi air saat biomassa di panaskan. hal ini membuat panas yang dihasilkan oleh reaksi kimia pembakaran terserap oleh proses penguapan.

Hasil Pengujian Water Boiling Test

WBT merupakan proses pengujian penguapan air untuk melakukan perhitungan analisis efisiensi termal. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui jumlah bahan bakar dan air yang terpakai selama proses pembakaran. Dilanjutkan dengan langkah terakhir yaitu proses perhitungan dan analisis data. Metode WBT telah memperlihatkan kegunaan bahan bakar yang dapat diprediksikan secara kasar untuk berbagai keperluan pembakaran. Dapat digunakan untuk mengukur beberapa aspek berkaitan power input, sensible heat, latent heat, efisiensi termal, laju konsumsi bahan bakar (FCR) dan power output. Beberapa alat dan komponen dalam pengujian *Water Boiling Test* (WBT) sebagai berikut :

- a. Thermocouple untuk mengukur suhu air dalam pengujian sebelum dan sesudah mendidih
- b. Timbangan untuk mengukur berat pada pengujian
- c. Air sebagai media pengujian
- d. Panci sebagai wadah dari air yang akan digunakan dalam pengujian
- e. Stopwatch digunakan sebagai pengukuran waktu.

Proses pengukuran serta pengambilan data pada kompor biomassa dilakukan dengan menggunakan metode Water Boiling Test (WBT). Hal ini dilakukan untuk kompor mengukur seberapa efisien kompor menggunakan bahan bakar untuk memanaskan air dalam panci saat terjadinya proses memasak. Metode ini juga dilakukan untuk menghitung efisiensi termal pada kompor biomassa. Efisiensi termal adalah perbandingan nilai kalor yang terkandung dalam bahan bakar dengan nilai kalor yang diterima oleh air untuk menaikkan suhunya dan menguapkannya.

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan 3 variasi atau iterasi volume air yaitu, 1 liter, 1,5 liter, dan 2 liter. Dalam setiap pengujian volume air, dilakukan percobaan sebanyak 3 kali pengulangan.

Alasan dilakukannya tiga percobaan dengan variasi volume air yang berbeda adalah Setiap bahan bakar memiliki efisiensi yang berbeda tergantung pada jumlah air yang dipanaskan. Dengan melakukan percobaan ini, dapat diketahui apakah bahan bakar bekerja lebih baik untuk jumlah air tertentu atau tetap efisien dalam berbagai kondisi. Ketiga

percobaan tersebut dilakukan untuk memastikan bahan bakar pada kompor apakah cukup untuk mendidihkan air pada percobaan water boiling test

Pengukuran Temperatur air

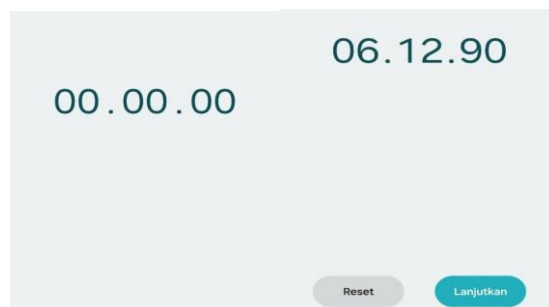
Proses pengukuran temperature air sebelum dididihkan dan setelah dididihkan menggunakan alat ukur thermometer dapat dilihat pada gambar 1:



Gambar 1. Perbandingan sebelum dan sesudah air mendidih.



Gambar 2. Perbandingan sebelum dan sesudah bahan bakar pelet biomassa.



Gambar 3. Stopwatch lama waktu pemanasan air.



Gambar 4. Metode percobaan Water Boiling Test

Setelah melakukan ketiga percobaan di atas, diperoleh data yang dapat digunakan untuk mencari nilai efisiensi thermal dan laju konsumsi bahan bakar spesifik pada kompor biomassa. Data yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Percobaan *Water Boiling Test*.
Penguian *Water Boiling Test* (WBT)

Variabel	Percobaan 1			Percobaan 2			Percobaan 3		
	Sebelum	Sesudah	Selisih	Sebelum	Sesudah	Selisih	Sebelum	Sesudah	Selisih
Waktu (Jam)	0	0,1	0.1	0	0,13	0.13	0	0,16	0.16
Berat Bahan Bakar (Kg)	0,3	0,054	0.246	0,3	0,034	0.266	0,3	0,031	0.269
Temperatur Air (°C)	28,3	102	73.7	27,3	100,2	72.5	28,0	102	74
Berat Air (Kg)	1	0,702	0.298	1,5	1,15	0.35	2	1,523	0.477

Dari data tabel 3, terdapat hasil percobaan dari *water boiling test*. Hasil percobaan tersebut menghasilkan variabel yang akan digunakan untuk mencari efisiensi termal dan laju bahan bakar spesifik. Mengacu pada BAB 2.3.4, berikut adalah variabel yang digunakan untuk mencari nilai efisiensi termal dan laju bahan bakar spesifik :

M_w = Massa air (kg)

C_p = Panas spesifik air = 1 kkal/kg.°C

T_f = Suhu air sesudah percobaan (°C)

T_i = Suhu air sebelum percobaan (°C)

W_e = berat air yang menguap (kg)

HFG = Panas laten penguapan air = 539,4 kkal/kg (tabel entalpi uap) T = Waktu memasak (jam)

HVF = Heating value of fuel/ nilai kalor bahan bakar (kkal/kg) (Terdapat pada tabel 3, nilai kalor)

Analisa Perhitungan Efisiensi Termal

Dalam pengujian efisiensi termal pada *water boiling test*, komponen panas sensible heat (panas yang terasa) dan latent heat (panas laten) diperlukan untuk menghitung total energi yang dibutuhkan untuk mendidihkan air. Ini tidak hanya mencakup energi untuk menaikkan suhu air (sensible heat), tetapi juga energi untuk mengubah air menjadi uap (latent heat). Uji efisiensi termal bertujuan untuk mengukur seberapa efektif suatu sistem dalam mengubah energi yang diberikan menjadi energi panas yang berguna. Tungku dinyatakan lulus efisiensi termal jika hasil uji efisiensi memenuhi nilai minimal 20% (SNI 7926:2013)

Menurut standar ini, sebuah sistem dinyatakan lolos uji efisiensi termal apabila mampu menghasilkan efisiensi setidaknya sebesar 20%. Artinya, dari total energi yang dimasukkan ke dalam sistem, minimal 20% diubah menjadi panas yang efektif untuk memanaskan air atau melakukan proses lainnya. Nilai ini mencerminkan seberapa baik sistem dalam memanfaatkan energi yang tersedia dan meminimalkan energi yang terbuang. Jika efisiensi

sistem lebih rendah dari 20%, maka sistem tersebut dianggap tidak memenuhi standar yang ditetapkan dan tidak dapat diterima dalam uji efisiensi termal menurut SNI 7926:2013

Sensible Heat (SH)

Mengacu pada persamaan BAB 2.3.4 *Sensible Heat* adalah energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu air yang diukur sebelum air mendidih dan sesudah mendidih (Fajar Aryansyah, 2022). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

Percobaan 1 :

Percobaan 2 :

Percobaan 3

$$SH = M_w \times C_p \times (T_f - T_i) \quad SH = M_w \times C_p \times (T_f - T_i) \quad SH = M_w \times C_p \times (T_f - T_i)$$

$$SH = 1 \times 1 \times 73,7$$

$$SH = 1,5 \times 1 \times 72,9$$

$$SH = 2 \times 1 \times 74,5$$

$$SH = 73,7 \text{ kkal}$$

$$SH = 109,35 \text{ kkal}$$

$$SH = 149 \text{ kkal}$$

Latent Heat (LH)

Latent Heat adalah jumlah energi yang digunakan untuk menguapkan air dengan menggunakan formula sebagai berikut:

Percobaan 1 :

Percobaan 2 :

Percobaan 3 :

$$LH = W_e \times HFG$$

$$LH = W_e \times HFG$$

$$LH = W_e \times HFG$$

$$LH = 0,298 \times 539,4$$

$$LH = 0,35 \times 539,4$$

$$LH = 0,477 \times 539,4$$

$$LH = 160,74 \text{ kkal}$$

$$LH = 188,79 \text{ kkal}$$

$$LH = 257,29 \text{ kkal}$$

Heat Energy Input (QF)

Heat Energy Input yaitu jumlah energi yang diperlukan dalam hal jumlah energi bahan bakar yang diumpankan kedalam kompor (Fajar Aryansyah, 2022). . Nilai HVF (Kalor bahan bakar) terdapat pada tabel 4. Nilai *Heat Energy Input* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

Percobaan 1 :

Percobaan 2 :

Percobaan 3 :

$$QF = WFU \times HVF$$

$$QF = WFU \times HVF$$

$$QF = WFU \times HVF$$

$$QF = 0,246 \times 4050$$

$$QF = 0,266 \times 4050$$

$$QF = 0,269 \times 4050$$

$$QF = 996,3 \text{ kkal}$$

$$QF = 1077,3 \text{ kkal}$$

$$QF = 1089,45 \text{ kkal}$$

Efisiensi Termal (η)

Perhitungan efisiensi termal, efisiensi termal adalah perbandingan antara nilai kalor yang diterima oleh air dengan nilai kalor yang terkandung dalam bahan bakar. Perhitungan efisiensi termal dilakukan dengan menggunakan persamaan umum yang biasa digunakan untuk metode *Water Boiling Test (WBT)* sebagai berikut :

Percobaan 1 :

$$\eta = \frac{SH+LH}{HVF \times WFU} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{73,7+160,74}{4050 \times 0,246} = 23.53 \%$$

Percobaan 2 :

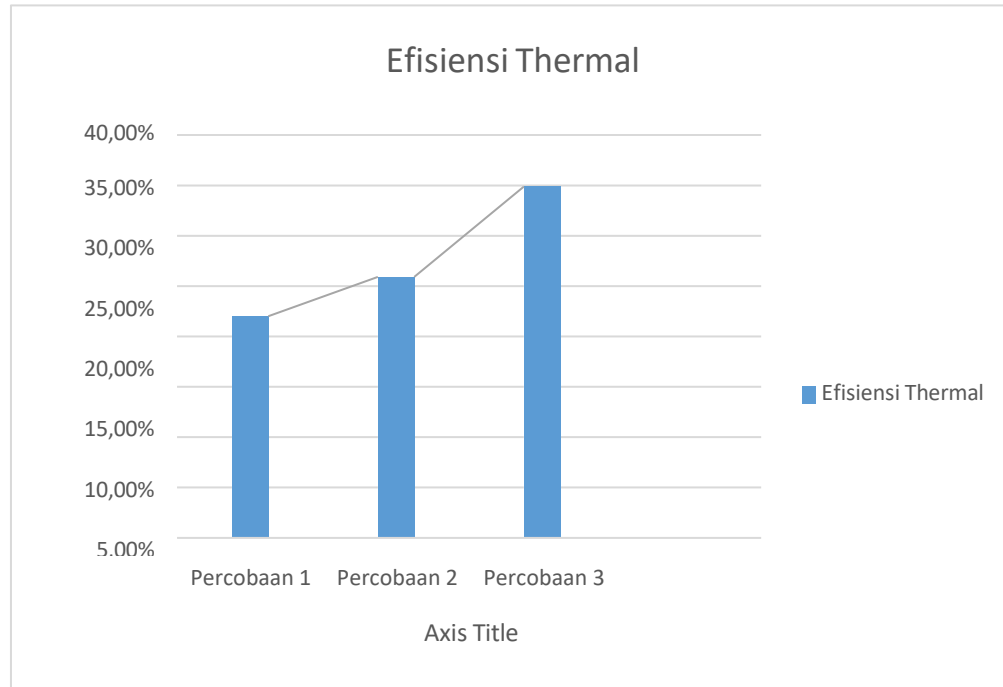
$$\eta = \frac{SH+LH}{HVF \times WFU} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{109,35+188,79}{4050 \times 0,266} = 27.64 \%$$

Percobaan 3 :

$$\eta = \frac{SH+LH}{HVF \times WFU} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{149+257,29}{4050 \times 0,269} = 37.29 \%$$



Gambar 5. Grafik efisiensi thermal tiga percobaan water boiling test (WBT).

Gambar di atas menunjukkan hasil persentase efisiensi pada kompor semakin meningkat disetiap volume air yang semakin besar. Nilai efisiensi yang tertinggi yaitu 34,88% pada percobaan WBT di volume air sebesar 2 liter dan terendah 22,01% pada percobaan WBT di volume air sebesar 1 liter. Hal ini dikarenakan nilai efisiensi kompor berpengaruh terhadap jumlah massa bahan bakar biomassa yang terpakai .

Hasil pengujian yang dilakukan pada kompor biomassa yang telah dirancang menunjukkan bahwa efisiensi termalnya memenuhi kriteria yang ditetapkan oleh SNI 7926:2013. SNI 7926:2013 adalah standar yang digunakan untuk menguji efisiensi termal pada peralatan pemanas air atau kompor, yang menetapkan bahwa sistem pemanas harus memiliki efisiensi minimal 20% untuk lulus uji. Dengan nilai efisiensi termal yang memenuhi standar, berarti kompor biomassa yang dirancang mampu mengubah minimal 20% dari energi yang diberikan menjadi energi panas yang berguna, dan mengurangi energi yang terbuang. Ini menunjukkan bahwa desain kompor tersebut sudah efisien dalam penggunaannya, sesuai dengan standar nasional yang berlaku.

Analisa Perhitungan Laju Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (FCR)

Megacu pada persamaan BAB 2.3.4, Untuk menghitung laju konsumsi bahan bakar spesifik, kita perlu mengetahui energi yang dihasilkan dan bahan bakar yang dikonsumsi. Dalam hal ini, energi input berasal dari bahan bakar yang digunakan oleh sistem. Dengan kata lain, untuk setiap unit energi yang dihasilkan (output), berapa banyak bahan bakar yang harus dikonsumsi (input).

Energi input diperlukan untuk mencari nilai laju konsumsi bahan bakar spesifik karena energi input adalah sumber energi yang dikonsumsi untuk menghasilkan output (seperti panas atau daya). Dengan mengetahui energi yang masuk (dari bahan bakar) dan energi yang dihasilkan, kita dapat menghitung seberapa banyak bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit energi yang bermanfaat, serta menilai efisiensi sistem dalam menggunakan bahan bakar tersebut.

Energi Input (Qn)

Energi input adalah jumlah energi yang dibutuhkan yaitu mengacu pada jumlah panas yang dipasok oleh kompor. Persamaan yang digunakan adalah :

Percobaan 1 :

$$Q_n = \frac{M_w \times E_s}{t}$$

$$Q_n = \frac{1 \times 73,7}{0,1}$$

$$Q_n = 737 \text{ kkal/jam}$$

Percobaan 2 :

$$Q_n = \frac{M_w \times E_s}{t}$$

$$Q_n = \frac{1,5 \times 72,9}{0,13}$$

$$Q_n = 841,15 \text{ kkal/jam}$$

Percobaan 3 :

$$Q_n = \frac{M_w \times E_s}{t}$$

$$Q_n = \frac{2 \times 74,5}{0,16}$$

$$Q_n = 925 \text{ kkal/jam}$$

Laju Bahan Bakar Spesifik (FCR)

Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi efisiensi bahan bakar dalam menghasilkan panas. Ini membantu dalam menentukan seberapa banyak bahan bakar yang diperlukan untuk mendidihkan air dalam waktu tertentu.

Percobaan 1 :

$$FCR = \frac{Q_n}{HVF \cdot \eta}$$

$$FCR = \frac{737}{4050 \cdot 23,53\%}$$

$$= 0,77 \text{ kg/jam}$$

Percobaan 2 :

$$FCR = \frac{Q_n}{HVF \cdot \eta}$$

$$FCR = \frac{841,15}{4050 \cdot 27,64\%}$$

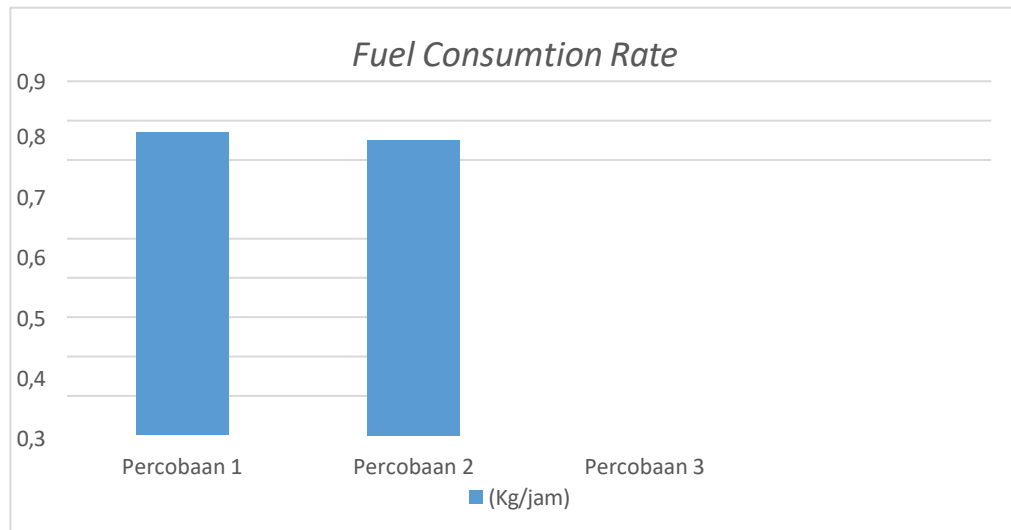
$$= 0,75 \text{ kg/jam}$$

Percobaan 3 :

$$FCR = \frac{Q_n}{HVF \cdot \eta}$$

$$FCR = \frac{925}{4050 \cdot 37,29\%}$$

$$= 0,61 \text{ kg/jam}$$



Gambar 6. Grafik Laju konsumsi bahan bakar spesifik tiga percobaan water boiling test (WBT).

Gambar di atas menunjukkan hubungan laju konsumsi bahan bakar (FCR) terhadap variasi volume air. Massa bahan bakar biomassa yang terpakai mempengaruhi nilai Fuel Consumption Rate (FCR), semakin besar nilai Fuel Consumption Rate (FCR) maka semakin besar pula nilai daya masuk sehingga mengakibatkan turunnya nilai efisiensi pada kompor. Berdasarkan data pengujian laju pembakaran bahan bakar yang telah dilaksanakan didapatkan 3 hasil berbeda yaitu 0,77 ,0,75 , 0,61. Dari hasil tersebut juga didapatkan rata rata laju pembakaran bahan bakar senilai 0,71 kg/jam , yang dimana untuk pembakaran 1 jam hanya memerlukan bahan bakar sebanyak 0,71 kg atau 710 gram pellet.

Analisa Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Mengacu pada BAB 2.3.4, penelitian yang penulis realisasikan dikerjakan berdasarkan penelitian yang terdahulu. Penelitian tersebut berjudul “Analisis Efisiensi Termal pada Kompor Biomassa dengan Menggunakan *Water Boiling Test* (WBT)”(Aryansyah, 2022). Penelitian tersebut menggunakan *Water Boiling Test* (WBT) seperti halnya dengan penelitian yang penulis kerjakan. Akan tetapi, berbeda dengan penelitian yang dikerjakan, Penelitian terdahulu menggunakan bahan bakar yang berasal dari bahan bakar biomassa alami tanpa diproses seperti ranting dan kayu sedangkan penelitian yang dikerjakan menggunakan pellet biomassa berbahan dasar kayu karet yang tidak terpakai. Dan, perbedaan lainnya yaitu penelitian yang dikerjakan dapat menghasilkan listrik yang didapatkan dari termoelektrik peltier sehingga energi yang terbuang dapat dimanfaatkan Kembali.

Dari data yang dihasilkan, terdapat perbedaan antara hasil dari penelitian yang dikerjakan dengan penelitian sebelumnya. Berikut adalah tabel yang menjelaskan perbandingan antara kedua penelitian tersebut :

Tabel 4. Perbandingan penelitian yang dikerjakan dengan penelitian terdahulu

No.	Penelitian	Efisiensi Termal (%)			Laju Bahan Bakar (kg/jam)		
		Perc 1	Perc 2	Perc 3	Perc 1	Perc 2	Perc 3
1.	Penelitian Terdahulu	26,6 %	33,6%	41,8%	46,9	44,6	36,7
2.	Penelitian yang Dikerjakan	23,53 %	27,64%	37,28 %	0,77	0,75	0,61

Penelitian yang dilakukan memiliki kesamaan pada ketiga percobaan yaitu mengubah volume air yang akan dicoba sebagai penelitian. Dari kedua penelitian tersebut, terdapat perbedaan hasil yang didapatkan.

Efisiensi termal (η) yang didapatkan lebih kecil dibandingkan dengan percobaan terdahulu. Pada saat melaksanakan *Water Boiling Test* (WBT), penelitian yang dikerjakan hanya memberikan 300 gr bahan bakar dengan alasan menghemat bahan bakar yang digunakan 300 gr bahan bakar pellet biomassa sudah cukup untuk memanaskan air hingga mendidih sedangkan pada penelitian sebelumnya, tertulis bahwa massa awal bahan bakar yang digunakan adalah 2,5 kg kayu. Kelebihan penelitian yang dikerjakan dibandingkan dengan penelitian terdahulu adalah menggunakan bahan bakar sisa yang diolah menjadi pellet dengan harga yang cukup murah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

Laju bahan bakar (FCR) pada penelitian yang dilakukan memiliki hasil yang lebih kecil dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Hal ini menandakan bahwa secara ekonomis, penelitian yang dikerjakan lebih hemat dan praktis dibandingkan dengan penelitian terdahulu karena hanya dengan menggunakan sedikit bahan bakar, efisiensi termal yang didapatkan sudah bisa mendekati penelitian sebelumnya.

Hasil Pengujian Generator Termoelektrik

Pengujian Alat Generator Termoelektrik



Gambar 7. Hasil pengujian termoelektrik terhadap kompor biomassa.

Proses pengambilan data ini dilakukan secara manual, yaitu dengan mengukur besaran listrik menggunakan multimeter dan suhu dari generator termoelektrik menggunakan *thermocouple*. Kenaikan tegangan naik secara perlahan tetapi belum mengukur waktu dan berat bahan bakar yang digunakan.

Data Hasil Penelitian generator termoelektrik

Pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7 menampilkan data hasil percobaan generator termoelektrik untuk rangkaian terbuka. Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini mencakup perbedaan suhu, tegangan, dan durasi waktu. Pengamatan dilakukan setiap 3 menit selama sekitar 20 menit, atau hingga api kompor padam. Percobaan dilakukan dengan menggunakan bahan bakar berat yang berbeda, yaitu 500 gram, 1000 gram, dan 1500 gram. Pengukuran dilakukan langsung di dekat tungku masak.

Tabel 5. Hasil Percobaan rangkaian termoelektrik terbuka bahan bakar 500 gram.

No	Waktu (menit)	TC (°C)	TH (°C)	Perbedaan suhu (ΔT)	Tegangan (V)
1	0	0	0	0	0
2	3	8,5	63,2	54,7	3,82
3	6	12,4	67,9	55,5	5,82
4	9	14,9	72,2	57,3	6,49
5	12	17,7	82,1	64,4	8,02
6	15	18,6	92,3	74,6	9,70
7	18	19,4	100,6	82	11,83
8	21	20,8	91,3	70,5	8,78
9	24	22,3	76,7	54,4	6,39

Tabel 6. Hasil Percobaan rangkaian termoelektrik terbuka bahan bakar 1000 gram.

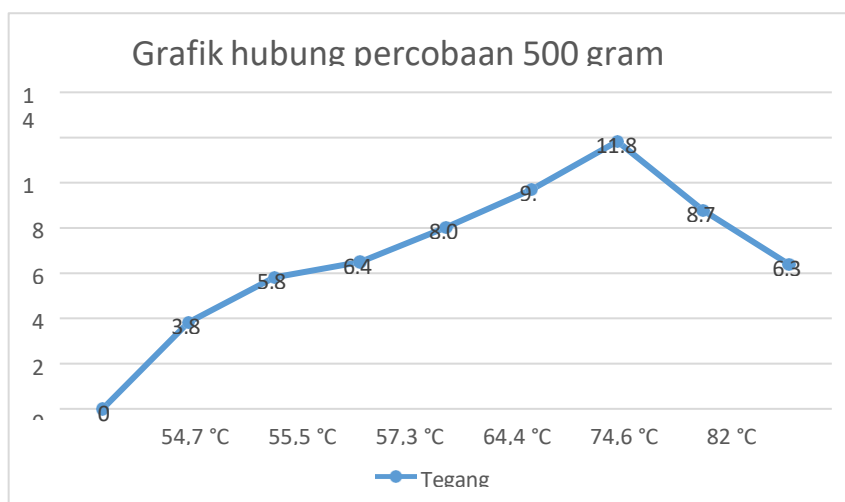
No	Waktu (menit)	Tc (°C)	TH (°C)	Perbedaan suhu (ΔT)	Tegangan (V)
1	0	0	0	0	0
2	3	11,2	43,7	32,5	2,77
3	6	13,3	52,9	39,6	3,61
4	9	14,2	58,3	44,1	4,38
5	12	15,5	64,9	49,4	5,02
6	15	15,9	72,5	56,6	6,23
7	18	16,4	79,3	62,9	7,11
8	21	17,3	83,7	66,4	8,35
9	24	17,8	88,7	70,9	9,62
10	27	18,4	90,3	71,9	10,10
11	30	19,3	92,6	73,3	11,30
12	33	20,5	100,8	80,3	13,34
13	36	21,8	95,3	71,5	9,83
14	39	22,9	89,1	66,2	7,35

Tabel 7. Hasil Percobaan rangkaian thermoelektrik terbuka bahan bakar 1500 gram.

No	Waktu (menit)	TC (°C)	TH (°C)	Perbedaan suhu (ΔT)	Tegangan (V)
1	0	0	0	0	0
2	3	11,1	48,3	37,2	2,77
3	6	11,8	53,6	41,8	3,24
4	9	12,3	59,1	46,8	3,78
5	12	12,9	63,5	50,6	4,17
6	15	13,1	67,7	54,6	4,45
7	18	13,7	70,6	56,9	5,42
8	21	14,4	74,3	59,9	5,86
9	24	15,7	79,7	64	6,44
10	27	16,2	82,4	66,2	7,21
11	30	16,6	87,8	71,2	8,16
12	33	17,4	92,2	74,8	9,27
13	36	18,9	95,6	76,7	10,31
14	39	19,4	97,3	77,9	12,98
15	42	20,2	103,5	83,3	13,52
16	45	22,3	111,8	89,5	15,12
17.	48	23,8	106,3	82,5	13,38
18	51	25,5	99,4	73,9	9,02
19	54	26,5	90,1	63,6	6,08

Analisa Data

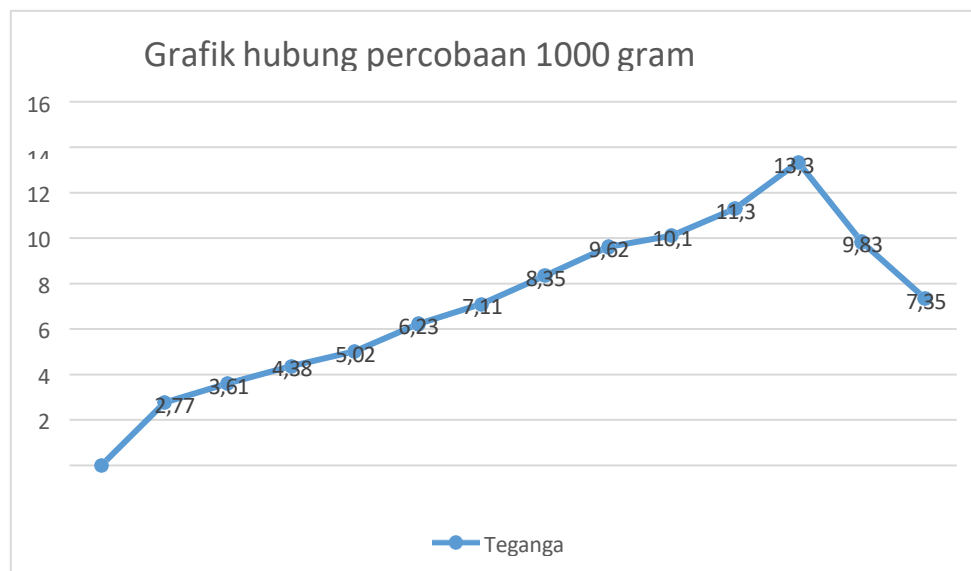
Untuk mengetahui perpindahan panas secara konduksi pada alat maka dilakukan analisa data. Dapat dilihat hasil pengambilan data percobaan secara seri dengan kondisi tanpa beban untuk perpindahan panas secara konduksi setelah kompor dipanaskan.

Menghitung besar percobaan rangkaian thermoelektrik terbuka bahan bakar 500 gram**Gambar 8.** Grafik Hubungan Tegangan dengan ΔT Kondisi tanpa Beban bahan bakar 500 gram

Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat grafik hubungan antara tegangan dengan perbedaan temperature pada termoelektrik generator yang dirangkai secara seri dalam kondisi tanpa beban. Pada saat kompor dipanasi dalam jangka waktu 18 menit diperoleh data perbedaan temperatur yang berbeda setiap 3 menitnya seperti pada grafik. Selain kenaikan suhu yang terjadi pada kompor biomassa, Temperatur pada wadah pendingin akan terjadi perubahan akibat perpindahan panas dari kompor biomassa itu sendiri dan lingkungan sekitar. Berdasarkan grafik pada percobaan yang dilakukan, dapat dilihat bahwa pengaruh selisih suhu antar sisi panas dan dingin terhadap tegangan output adalah berbanding lurus dimana semakin besar perbedaan suhu yang dihasilkan antara permukaan kompor dengan wadah pendingin akan menghasilkan tegangan yang besar pula pada pengujian alat ini, begitupun sebaliknya. Hal ini sesuai dengan teori efek seeback dimana besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur yang didapat.

Dari Gambar 8 grafik hubungan antara tegangan dengan perbedaan temperature diperoleh tegangan tertinggi dihasilkan pada saat pengujian alat dimana nilai tegangan paling tinggi yang dihasilkan pada pengujian yaitu 11,83 V pada perbedaan temperature 82°C.

Menghitung besar percobaan rangkaian termoelektrik terbuka bahan bakar 1000 gram



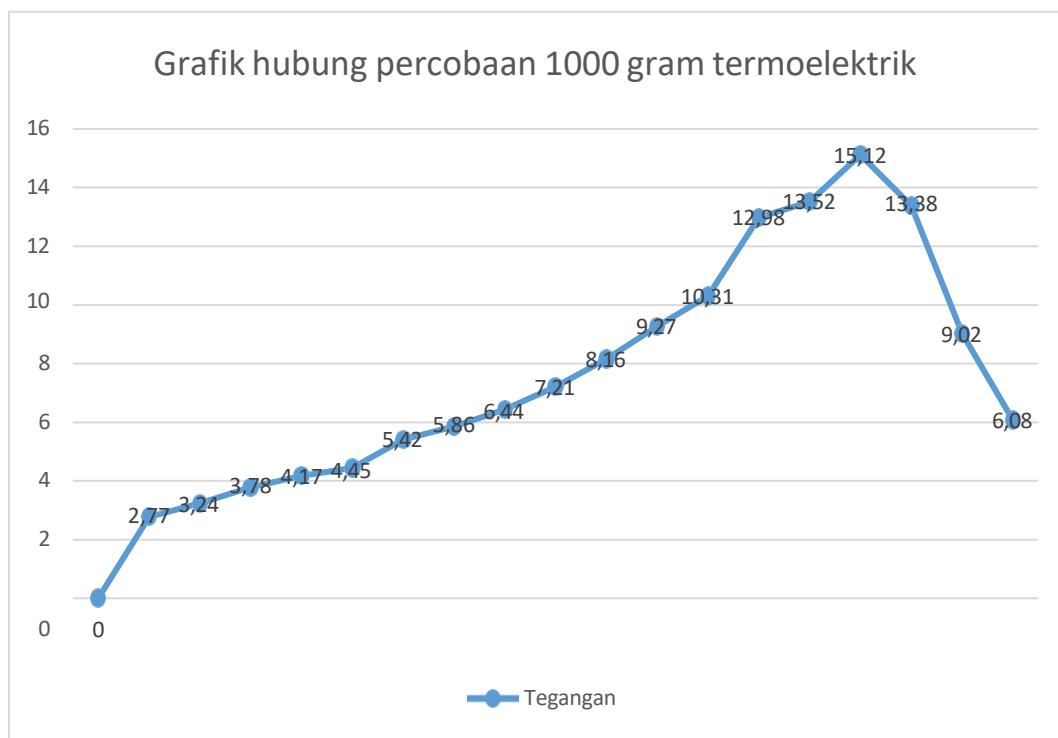
Gambar 9. Grafik Hubungan Tegangan dengan ΔT Kondisi tanpa Beban bahan bakar 1000gr

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat grafik hubungan antara tegangan dengan perbedaan temperature pada termoelektrik generator yang dirangkai secara seri dalam kondisi tanpa beban. Pada saat kompor dipanasi dalam jangka waktu 33 menit diperoleh data perbedaan temperatur yang berbeda setiap 3 menitnya seperti pada grafik. Dari Gambar

grafik hubungan antara tegangan dengan perbedaan temperature diperoleh rata-rata tegangan tertinggi dihasilkan pada saat pengujian alat dimana nilai tegangan paling tinggi yang dihasilkan pada pengujian yaitu 13,34 V pada perbedaan temperature 80,3 °C.

Temperatur pada wadah pendingin akan terjadi perubahan akibat perpindahan panas dari kompor biomassa itu sendiri dan lingkungan sekitar. Berdasarkan grafik pada percobaan yang dilakukan, dapat dilihat bahwa pengaruh selisih suhu antar sisi panas dan dingin terhadap tegangan output adalah berbanding lurus dimana semakin besar perbedaan suhu yang dihasilkan antara permukaan kompor dengan wadah pendingin akan menghasilkan tegangan yang besar pula pada pengujian alat ini, begitupun sebaliknya . Hal ini sesuai dengan teori efek seeback dimana besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur yang didapat

Menghitung besar percobaan rangkaian termoelektrik terbuka bahan bakar 1500 gram



Gambar 10. Grafik Hubungan Tegangan dengan ΔT Kondisi tanpa Beban bahan bakar 1500gr

Berdasarkan Gambar 10 dapat dilihat grafik hubungan antara tegangan dengan perbedaan temperature pada termoelektrik generator yang dirangkai secara seri dalam kondisi tanpa beban. Pada saat kompor dipanasi dalam jangka waktu 45 menit diperoleh data perbedaan temperatur yang berbeda setiap 3 menitnya seperti pada grafik. Dari Gambar 10 grafik hubungan antara tegangan dengan perbedaan temperature diperoleh rata-rata tegangan

tertinggi dihasilkan pada saat pengujian alat dimana nilai tegangan paling tinggi yang dihasilkan pada pengujian yaitu 15,12 V pada perbedaan temperature 89,5 °C.

Temperatur pada wadah pendingin akan terjadi perubahan akibat perpindahan panas dari kompor biomassa itu sendiri dan lingkungan sekitar. Berdasarkan grafik pada percobaan yang dilakukan, dapat dilihat bahwa pengaruh selisih suhu antar sisi panas dan dingin terhadap tegangan output adalah berbanding lurus dimana semakin besar perbedaan suhu yang dihasilkan antara permukaan kompor dengan wadah pendingin akan menghasilkan tegangan yang besar pula pada pengujian alat ini, begitupun sebaliknya . Hal ini sesuai dengan teori efek seeback dimana besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur yang didapat

Analisa Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu Menggunakan Beban

Mengacu pada BAB 2.1, penelitian yang direalisasikan dikerjakan berdasarkan penelitian yang terdahulu. Penelitian tersebut berjudul "Kompor Biomassa Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Energi Listrik Untuk Penerangan" (Karmal, 2022). Dari kedua percobaan tersebut, terdapat perbedaan pada sistem pendingin yang diaplikasikan pada generator termoelektrik.



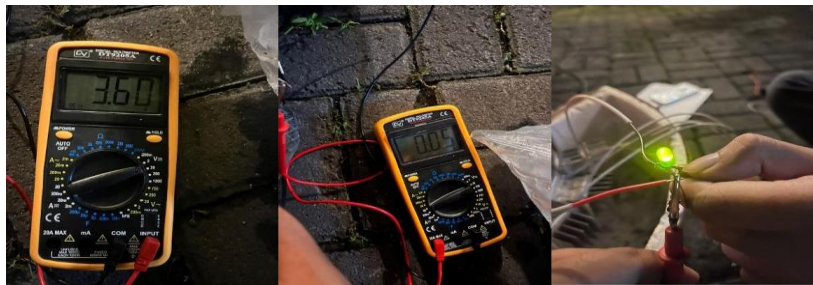
Gambar 11. Perbandingan sistem pendingin generator termoelektrik.

Dapat dilihat pada gambar 11, pada sistem pendingin yang dirancang oleh penelitian terdahulu menggunakan *sponge* dan air infus sedangkan pada penelitian yang dikerjakan, menggunakan es sebagai pendingin yang diletakan pada wadah yang sudah dibuat. Selain itu, pada generator termoelektrik penelitian yang dikerjakan dipasangkan *heatsink* agar suhu es yang dingin dapat merambat lebih cepat pada generator termoelektrik. Berikut adalah hasil dari percobaan termoelektrik dengan beban :

Tabel 8. Percobaan termoelektrik dengan beban.

No.	Waktu (Menit)	TC (°C)	T _f (°C)	Perbedaan Suhu (ΔT)	Tegangan (V)	Kuat Arus (A)	Kondisi lampu (On/Off)
1.	0	0	0	0	0	0	Off
2.	3	8,5	61,2	52,7	0,52	0,01	Off
3.	6	12,4	65,8	53,4	1,42	0,02	Off
4.	9	13,1	69,5	56,4	2,13	0,03	On
5.	12	13,8	75,4	61,6	2,97	0,04	On
6.	15	14,9	79,8	64,9	3,60	0,05	On

Dari data yang didapatkan dengan menggunakan beban lampu LED 3,2 V dan 0,02 A, hasil tegangan dari percobaan mencapai 3,6 V dan arus mencapai 0,05 A. Sedangkan pada penelitian sebelumnya nilai tegangan sebesar 2,06 V dan nilai arus 0.01 A.

**Gambar 12.** Hasil tegangan dan kuat arus dengan beban.

4. KESIMPULAN

- a. Kualitas pelet kayu karet telah memenuhi standar SNI 8021:2020, dengan kadar air di bawah 12%, nilai kalor 4050–4353 kkal/kg, kadar abu di bawah 1,5%, serta kandungan bahan mudah menguap dan karbon padat yang sesuai. Selain itu, kadar sulfur dan klorin juga berada di bawah ambang batas 0,05% dan <0,03%. Hal ini menunjukkan bahwa pelet kayu karet layak digunakan sebagai bahan bakar biomassa yang efisien dan ramah lingkungan sesuai standar yang ada di Indonesia.
- b. Kompor biomassa yang diuji menggunakan metode Water Boiling Test (WBT) menunjukkan efisiensi termal sebesar 23,53–37,29%, sesuai dengan standar SNI 7926:2013. Nilai efisiensi ini dipengaruhi oleh temperatur dan kalor yang dihasilkan. Selain itu, laju bahan bakar spesifik (FCR) berada pada 0,61–0,77 kg/jam, juga telah memenuhi standar. Dengan demikian, kompor biomassa yang digunakan dinyatakan sudah sesuai dengan standar dan layak digunakan untuk memasak.

- c. Modul Peltier TEC 12706 yang diterapkan pada kompor biomassa mampu mengonversi energi panas menjadi energi listrik. Pemanfaatan ruang pendingin yang diisi es batu berperan penting dalam meningkatkan perbedaan suhu, sehingga dapat menaikkan tegangan yang dihasilkan. Dalam pengujian tanpa beban, tegangan meningkat seiring dengan jumlah bahan bakar dan selisih suhu, dengan nilai tertinggi mencapai 15,12 V pada perbedaan suhu 89,5°C. Sistem ini menunjukkan kinerja yang efisien untuk kebutuhan daya listrik. Saat diuji menggunakan beban berupa lampu LED, sistem menghasilkan tegangan sebesar 3,6 V dan arus sebesar 0,05 A.

DAFTAR REFERENSI

- Abrar. 2017 “Rancang Bagi Tungku Biomassa Hemat Energi dan Ramah Lingkungan pada Tungku Tradisional Masyarakat Berbahan Bakar Kayu” *Jurnal Photon* 1(3) : 69-78.
<https://doi.org/10.37859/jp.v3i1.151>
- Agung dan Imam. 2013. “Potensi Sumber Energi Alternatif Dalam Mendukung Kelistrikan Nasional.” *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro* 2(2): 892–897.
- Ahsonul, Sugiono, Dwi, dan Dahrudin. 2017 “Pengaruh Dimensi Kompor Biomassa Terhadap Performansinya” *Journal of Technical Engineering Piston*1(1) : 19-24.
<https://doi.org/10.32493/pjte.v1i1.545>
- Akbar, Rizal dan Syntia. 2021. “Pengujian Kinerja Pendinginan Thermo Electric Cooling (TEC) Menggunakan Heatsink Dengan Variasi Dimensi Dan Jenis Material.” *JURUTERA - Jurnal Umum Teknik Terapan* 8(01): 19–28.
<https://doi.org/10.55377/jurutera.v8i01.3926>
- Astra dan I Made. 2010. “Energi Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan.” *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 11(2): 127–135. <https://doi.org/10.31172/jmg.v11i2.72>
- Arsad, E., (2013). Sifat Fisik Dan Kimia Wood Pellet Dari Limbah Industri Perkayuan Sebagai Sumber Energi Alternatif. Balai Riset dan Standardisasi Industri Banjarbaru.
<https://doi.org/10.24111/jrihh.v6i1.1219>
- Azhar, dan Satriawan. 2018. “Implementasi Kebijakan Energi Baru Dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional.” *Administrative Law and Governance Journal* 1(4): 398–412. <https://doi.org/10.14710/alj.v1i4.398-412>
- Bustomy dan Widyartono. 2020. “Generator Termoelektrik Dengan Memanfaatkan Panas.” *Jurnal Teknik Elektro* 09(02): 451–457.
- Canceria, Gandis, Ajiwiguna, dan Suhendi. 2018. “Pemanfaatan Heat Pipe Sink Fan Untuk Alat Ukur Performansi Modul Pendingin Termoelektrik Heat Pipe Sink Fan Utilization for

- Performance Measurement of Thermoelectric Cooler Module.” *eProceeding of Engineering* 5(3): 5731–5738.
- Daniel. 2018 “Rancang Bangun Kompor Biomassa” *National Institute of Technology Malang* 1(1) : 1-7
- Diki, Hadi, Lestari dan Nalandari. 2022. “Pemanfaatan Termoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan.” *Journal Zetroem* 4(1): 23–25.
<https://doi.org/10.36526/ztr.v4i1.1913>
- Eko Yohanes Setyawan *et al.* (2021). Penggunaan Wood Pellet Untuk Bahan Bakar Produksi Tahu Di Ukm Kab. KEDIRI. *Jurnal Aplikasi Sains Teknologi Nasional*. Vol. 02 No. 02 Oktober, 2021
- Fiflis, Kirsch, Andruczyk, Curelli and Ruzic. 2013. “Seebeck Coefficient Measurements on Li, Sn, Ta, Mo, and W.” *Journal of Nuclear Materials* 438(1–3): 224–227.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.03.043>
- Fitriani Tumba Danun, N., Priajidno Pasak, G., Megi Simak, B., & Andi Lolo, J. (2022). Potensi Pengembangan Biomassa Sebagai Alternatif Energi Terbarukan. Seminar Nasional Fisika- Universitas Kristen Indonesia Toraja
- GINANJAR, HIENDRO, dan SURYADI. 2019. “Perancangan Dan Pengujian Sistem Pembangkit Listrik Berbasis Termoelektrik Dengan Menggunakan Kompor Surya Sebagai Media Pemusat Panas.” *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura* 2(1).
- Gunawan, Dian, Handayani, and Ajiwiguna. 2017. “Rancang Bangun Sistem Refrigerasi Termoelektrik Dan Simulasi Distribusi Temperatur Menggunakan COMSOL Multiphysics.” *e-Proceeding of Engineering* 4(1): 697–704.
- Haryanto, Makhsun, dan Saraswati. 2015 "Perancangan Modul Termoelektrik Generator Menggunakan Peltier." Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia. *Jurnal sains dan teknologi* vol 11 (1) : 26-37. <https://doi.org/10.36055/tjst.v11i1.6970>
- Isa, M., Mangifera, L., dan Fatimah Nurhayati, S. (2019). Studi Kelayakan Penggunaan Bahan Bakar Wood Pellet Pada Ikm Nata De Coco Di Kabupaten Sragen. Seminar Nasional & Call For Paper Seminar Bisnis Magister Manajemen. ISSN: 2685-1474
- Kandar. 2021. “Karakteristik Peltier Pada Elemen Termoelektrik TEC1-12706 Sebagai Efek Seebeck Untuk Konversi Energi Alternatif Penghasil Listrik.” *Prosiding Seminar Nasional, Telekomunikasi dan Otomasi* : 373–383.
- Kasmaniar *et al.* (2023). Pengembangan Energi Terbarukan Biomassa dari Sumber Pertanian, Perkebunan dan Hasil Hutan Kajian Pengembangan dan Kendalanya. *Jurnal Serambi Engineering* Vol VIII(1).p-ISSN : 2528-3561

- Khalid, Muammar, Syukri, dan Gapy. 2016. “Pemanfaatan Energi Panas Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berskala Kecil Dengan Menggunakan Termoelektrik.” *Karya Ilmiah Teknik Elektro* 1(3): 57–62.
- Jhonni. 2021 “Kompor Biomassa Sebagai Salah Satu Teknologi Tepat Guna Masyarakat Pedesaan” Universitas Islam Riau (UIR) Press 5(3) : 1-6.
<https://doi.org/10.25299/bpb.2021.8240>
- Lineykin, Simon, and Ben-Yaakov. 2007. “Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 43(2):505–512.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2006.889813>
- Manap, Abdul dan Al Fikri. 2020. “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Alternatif Menggunakan Termoelektrik Dengan Memanfaatkan Pada Tungku Pemanas.” *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)* 3(2): 53–58.
<https://doi.org/10.33087/jepca.v3i2.41>
- Parinduri, L.dan Parinduri, T.(2020). Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. In *Journal of Electrical Technology* .Vol. 5, Issue 2.
- Pradana, Irawan, Wisnu, Saputra, Subakti Yusuf dan Yunita. 2021. “Perancangan Purwarupa Pembangkit Termoelektrik Sebagai Media Pembelajaran Konversi Energi.” *Jurnal Edukasi Elektro* 5(1): 14–19. <https://doi.org/10.21831/jee.v5i1.37454>
- Purba,Deardo,Kirom, and Fauzi I.2019. “Analisis Pemanfaatan Energi Panas PadaPanel Surya Menjadi Energi Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik.” *eProceeding of Engineering* 6(2): 4977–4985.
- Purnama dan Eka. 2011. “Pembuatan Termometer Digital Untuk Mengukur Suhu Ruang Casing Komputer.” Seminar Nasional Riset Teknologi Informasi VI: 155–164.
- Putra, Koestoer, Adhitya, Roekettino dan Trianto. 2010. “Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik Untuk Kendaraan Hibrid.” *MAKARA of Technology Series* 13(2): 53–58.
<https://doi.org/10.7454/mst.v13i2.466>
- Rokhimi, Intan dan Pujayanto. 2017. “Alat Peraga Pembelajaran Laju Hantaran Kalor Konduksi.” *Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Pendidikan Fisika* 6(1): 270– 274.
- Ryanuargo, Anwar, dan Sari. 2014. “Generator Mini Dengan Prinsip TermoelektrikDari Uap Panas Kondensor Pada Sistem Pendingin.” *Jurnal Rekayasa Elektrika* 10(4): 180–185.
<https://doi.org/10.17529/jre.v10i4.1108>
- Salsabila, Tasya, dan Cory A. Siagian. 2021. “Pengaplikasian Bismut Sebagai Embellishment Pada Produk Fesyen Dengan Konsep Futuristic.” *e- Proceeding of Art and Design* 8(6): 3842–3850.

- Sari, S. S., & Sitorus, C. (2021). Potensi Pengembangan Industri Biomassa Wood Pellet di Indonesia dengan Analisis BCG dan SWOT. *JIE Scientific Journal on Research and Application of Industrial System*, 6(2), 151. <https://doi.org/10.33021/jie.v6i2.1588>
- Sari, Permata, Rasyad, Amperawan dan Muslimin. 2018. "Kendali Suhu Air Dengan Sensor Termokopel Tipe-K Pada Simulator Sistem Pengisian Botol Otomatis." *Jurnal Ampere* 3(2): 128–134. <https://doi.org/10.31851/ampere.v3i2.2393>
- Sudarto. 2010. "Pengujian Perpindahan Panas Konveksi Pada Heat Sink Plat Jenis Extruded dan Heat Sink Plat Dengan Slot." Seminar Tahunan Teknik Mesin: 13– 15.
- Suwadji, S. dan Pebriana, H. (2018). Charecteristic of Wood Pellet from Teakwood Waste. Sifat Wood Pellet Dari Limbah Kayu Jati. *Jurnal Wana Tropika*, 8(2), 47–58. ISSN: 2088-7019
- Yohana, Eflita dan Bayu Novariawan. 2013. "Perbandingan Stack Effect Pada Rumah Secara Konveksi." *Jurnal Mechanical*, 4(1): 1–7.
- Yulianti, Burhanuddin Bani dan Albana. 2020. "Analisa Pertambangan Timah Di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung." *Jurnal Ekonomi* 22(1): 54–62.
- Yunus, Fernando, dan Louis. 2022 "Analisa Desain Kompor Biomassa Berbahan Bakar Tempurung Kelapa Menggunakan Ansys" *Jurnal Dinamis* 10(1) : 22- 29. <https://doi.org/10.32734/dinamis.v10i1.9072>
- Karmal, F., Hiendro, A., & Wicaksono, R. A. (2022). "Kompor Biomassa- Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Energi Listrik Untuk Penerangan." *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (JTRAIN)*, Vol. 3(2), hal. 01-08. e-ISSN: 2798-0421.
- Salsabila, N., Suwandi, D., & Ajiwiguna, T. A. (2019). STUDI PEMANFAATAN PANAS BUANGAN KOMPOR BIOMASSA DENGAN MENGGUNAKAN GENERATOR TERMOELEKTRIK. *e-Proceeding of Engineering*, 6(2), 5421-5427.