

# Rancang Bangun Sistem Kendali Suhu pada Reaktor Torefaksi Menggunakan Mikrokontroler

## Design of Temperature Control System at Torrefaction Reactor using Microcontroller

Mareli Telaumbanua<sup>1\*</sup>, Wahyu Hendi Setiawan, Agus Haryanto, Febryan Kusuma Wisnu, Winda Rahmawati, Budianto Lanya

Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia.  
Email\*): mareli.telaumbanua@fp.unila.ac.id

Received:  
27 June 2024

Revised:  
23 August 2024

Accepted:  
13 September 2024

Published:  
29 September 2024

DOI:  
10.29303/jrpb.v12i2.669

ISSN 2301-8119, e-ISSN  
2443-1354

Available at  
<http://jrpb.unram.ac.id/>

**Abstract:** The increasing demand for energy causes a decrease in the availability of fossil fuels. Biomass from oil palm waste, namely empty oil palm bunches, can be used as an alternative fuel. The torrefaction process converts biomass into environmentally friendly biopellets with high added value. In this study, the calibration of the K-type thermocouple sensor was carried out using Arduino Uno and testing of the automatic pellet torrefaction tool from empty palm oil bunches. This study aims to develop an automatic control system for the pellet torrefaction tool. The design of the automatic torrefaction tool uses a microcontroller with a gas stove energy source. The dimensions of the support frame are the torrefaction tube (24 cm x 28 cm), the servo motor frame (15 cm x 9.5 cm) and the dynamo support frame (26 cm x 6.5 cm). The tool box is square (50 cm x 50 cm). The torrefaction tube has a volume of 2,826 cm<sup>3</sup>, a diameter of 15 cm and a height of 16 cm. The results showed that the system successfully reached a temperature of 300°C for 30 minutes from the initial temperature. The temperature accuracy test produced an average value of 92.12%. The stability of temperature control also proved to be quite good in achieving the specified setting point. The water content of torrefaction pellets at a temperature of 150-300°C was around 1-2%. The hydrophobicity of torrefaction pellets at a temperature of 250-300°C after being soaked for 24 hours had a clearer color and remained intact.

**Keywords:** empty oil palm bunches; microcontroller; pellet; torrefaction

**Abstrak:** Permintaan energi yang meningkat menyebabkan penurunan ketersediaan bahan bakar fosil. Biomassa dari limbah kelapa sawit yaitu tandan kosong kelapa sawit, dapat digunakan menjadi alternatif bahan bakar. Proses torefaksi mengubah biomassa menjadi biopellet yang ramah lingkungan dan bernilai tambah tinggi. Dalam penelitian ini, kalibrasi dari sensor termocouple tipe K dilakukan dengan Arduino Uno dan pengujian alat torefaksi otomatis pelet dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kendali otomatis untuk alat torefaksi pelet. Perancangan alat torefaksi otomatis menggunakan mikrokontroler dengan sumber energi kompor gas. Dimensi dari kerangka penyangga yaitu tabung torefaksi (24 cm x 28 cm), kerangka motor servo (15 cm x 9,5 cm), kerangka penyangga motor DC dan gearbox (26 cm x 6,5 cm). Kotak alat berbentuk persegi (50 cm x 50 cm). Tabung torefaksi memiliki volume 2.826 cm<sup>3</sup>, diameter 15 cm dan tinggi 16 cm. Hasil penelitian menunjukkan, sistem berhasil mencapai suhu 300°C selama 30 menit dari suhu awal. Pengujian keakuratan suhu menghasilkan rata-rata nilai sebesar 92,12%. Stabilitas pengendalian suhu juga terbukti cukup baik dalam mencapai titik pengaturan yang ditentukan. Kadar air pelet torefaksi pada suhu 150-300°C sekitar 1-2%. Hidrofobitas pelet hasil torefaksi suhu 250-300°C setelah direndam 24 jam memiliki warna yang lebih bening dan tetap utuh.

**Kata kunci:** mikrokontroler; pelet; tandan kosong kelapa sawit; torefaksi

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Sumber energi bahan bakar digunakan untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga dan industri. Sumber energi dari bahan bakar fosil yang umumnya digunakan dalam kehidupan sehari-hari terdiri dari minyak bumi, batu bara, dan gas. Kebutuhan bahan bakar tersebut semakin meningkat sesuai dengan permintaan sumber energi dalam masyarakat. Harga bahan bakar fosil menjadi tinggi akibat ketersediaannya yang semakin terbatas. Selain itu, dampak negatif penggunaan energi fosil dapat meningkatkan suhu bumi, permukaan air laut, emisi gas rumah kaca serta menimbulkan polusi udara. Oleh karena itu, mulai dikembangkan alternatif bahan bakar untuk menggantikan bahan bakar dari fosil. Salah satu bahan bakar alternatif bersumber dari pemanfaatan limbah biomassa pertanian dan perkebunan. Faktor penting dari suatu bahan biomassa adalah kandungan energi yang tinggi dalam pembakaran sehingga dapat menjadi sumber energi terbarukan (Brunerova et al., 2019). Biomassa perkebunan kelapa sawit menjadi potensi terbesar sebagai sumber energi.

Indonesia memiliki produk ekspor ke luar negeri yaitu minyak kelapa sawit. Produk kelapa sawit terdiri dari minyak mentah dan minyak inti sawit (Kementan, 2021). Menurut Suhartini et al., (2022) lebih dari 700 pabrik kelapa sawit di Indonesia, yang diperkirakan akan terus meningkat setiap tahunnya. Proses pembuatan minyak sawit menghasilkan limbah yang berbahaya dan belum dimanfaatkan secara optimal. Jenis limbah kelapa sawit dengan potensi untuk dimanfaatkan terdiri dari tandan kosong, cangkang, bungkil inti sawit, dan serat. Tandan kosong merupakan limbah kelapa sawit yang memiliki persentase cukup tinggi sekitar 22-23% (Haryanto et al., 2019). Tandan kosong sangat melimpah dan hanya tertimbun di sekitar pabrik pengolahan kelapa sawit kemudian dibakar di area terbuka. Limbah tandan kosong memiliki kandungan serat tinggi terdiri dari selulosa (41,3-46,5%), hemiselulosa (25,3-32,5%) dan lignin (27,6-32,5%) (Wahyudi et al., 2020). Perlakuan fermentasi secara aerob dan anaerob dapat membantu mengurangi kandungan serat kasar sehingga nutrisi tandan kosong dapat dimanfaatkan secara optimal (Dermiyati et al., 2020). Hasil tandan kosong fermentasi digunakan sebagai pupuk ataupun pakan ternak. Pupuk tandan kosong dikembalikan pada lahan kelapa sawit untuk menambah unsur hara.

Pemanfaatan limbah kelapa sawit digunakan sebagai sumber energi bahan bakar berupa biopelet. Biopelet adalah bahan bakar bentuk padat dari limbah biomassa yang disajikan dalam bentuk pelet atau tabung padat (Haryanto et al., 2021). Proses pembuatan biopelet dengan pengempaan tekanan tinggi (Yang et al., 2005). Pengempaan pada tekanan tinggi akan membuat tingkat gesekan semakin tinggi sehingga menghasilkan suhu yang tinggi. Ukuran pelet bervariasi mulai dari diameter 3-12 mm dan panjang 6-25 mm. Pelet ini dapat digunakan untuk memanaskan air, namun masih memiliki kadar air 60% dan menimbulkan polusi udara. Pelet bersifat higroskopis dan daya serap air tinggi sehingga mudah mengalami rusak apabila disimpan terbuka. Aktivitas mikroba merupakan faktor utama menghasilkan panas tahap awal pada penyimpanan biomassa (Ferrero et al., 2009).

Produk pelet tandan kosong memiliki kelebihan yaitu ukuran sama dan mudah transportasi. Peningkatan nilai kalor pelet tandan kosong sudah dilakukan melalui proses torefaksi melalui suhu tinggi 200-300°C pada waktu tertentu (Basu, 2013). Torefaksi biomassa meningkatkan nilai kalor yang dipengaruhi faktor suhu dan waktu torefaksi (Sulistio et al., 2019). Suhu dan waktu torefaksi yang tinggi akan meningkatkan nilai kalor dan kadar abu, tetapi nilai karbon stabil (Zen et al., 2019). Nilai kalor berhubungan dengan kadar air dan densitas pelet yang dihasilkan. Pelet dengan kandungan air tinggi mengakibatkan nilai kalor semakin turun (Mahdie et al., 2016). Proses torefaksi mengubah sifat hidrofilik menjadi hidrofobik sehingga pelet dapat disimpan lebih lama (Haryanto et al., 2021). Pelet tandan kosong hasil torefaksi suhu 260°C selama 35 menit menghasilkan daya serap air sebesar 8,33% (Purnomo et al., 2022).

Pemanasan suhu tinggi torefaksi dilakukan melalui alat torefaksi secara manual dengan bahan bakar kayu. Penggunaan kayu sulit dalam menstabilkan suhu torefaksi sehingga suhu optimum sulit tercapai. Suhu kurang optimum dapat mempengaruhi waktu pemanasan dan kualitas pelet. Oleh karena itu, diperlukan alat torefaksi yang lebih efisien untuk menghasilkan pelet berkualitas dengan kontrol suhu secara otomatis. Sumber energi alat torefaksi berupa kompor gas yang dapat cepat mencapai suhu optimum torefaksi dengan panas lebih merata dan stabil.

### Tujuan

Penelitian bertujuan mengembangkan sistem kendali secara otomatis alat torefaksi untuk pelet tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan bakar dengan menggunakan sumber energi kompor gas.

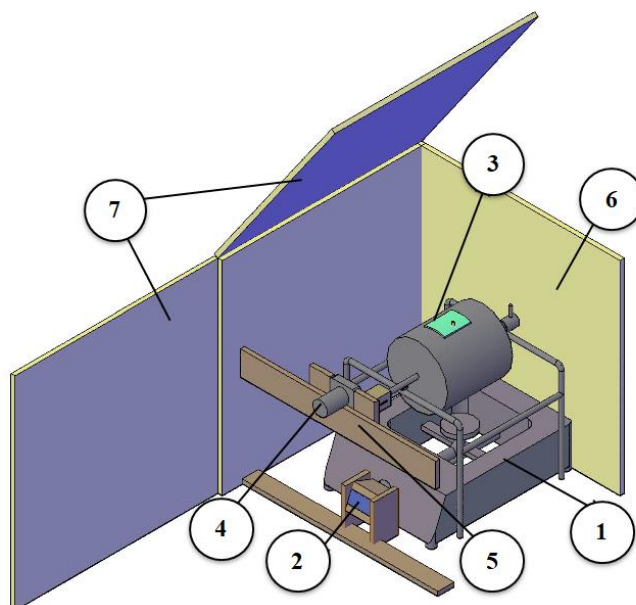
## METODE PENELITIAN

### Alat dan Bahan

Alat penelitian terdiri dari kompor gas Rinai satu tungku modifikasi, tang, gunting, motor servo SPT70HV-180, gearbox motor DC 12 volt high torque, multimeter Zotex, termometer multi channel HT-9815, dan termometer gun GM-900. Bahan penelitian terdiri dari mikrokontroler arduino uno R3, termokopel tipe K High Temp, LCD I2C, relay 4 channel, aki/baterai XCELERATE 12 volt DC 45 Ah, regulator tegangan *step down*, kabel jumper dan pelet biomassa dari tandan kosong kelapa sawit.

### Metode

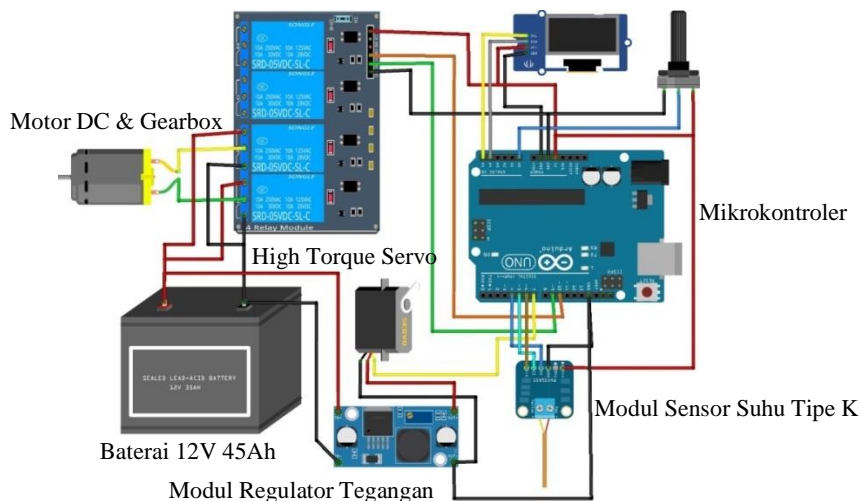
Rancangan struktural alat torefaksi terdiri dari dua tahapan yaitu rancangan dari bangun alat dan rancangan dari sistem kendali. Bagian dari rancang bangun alat torefaksi terdiri dari desain alat torefaksi, perangkaian alat torefaksi, dan pengecekan alat setelah dirangkai. Rancang sistem kendali terdiri dari desain skematik rangkaian, rangkaian komponen dan verifikasi hasil rangkaian. Gabungan rancangan struktural alat torefaksi otomatis dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Desain alat torefaksi otomatis (1) kompor gas, (2) servo, (3) tabung torefaksi, (4) motor DC, (5) penyangga motor DC dan gearbox, (6) kotak alat torefaksi, (7) penutup alat torefaksi

Sistem kendali secara otomatis bertujuan mengendalikan tinggi rendahnya suhu saat dilakukan proses torefaksi dengan integrasi mikrokontroler. Bagian sistem kendali terdiri

dari mikrokontroler (arduino uno), *Liquid Crystal Display* (LCD), motor servo, termokopel dengan tipe K, relay dan motor listrik DC (Gambar 2). Mikrokontroler dalam rangkaian berfungsi sebagai pusat kendali sistem. LCD berfungsi menampilkan besar kecilnya suhu. Relay 4 channel digunakan untuk menyambungkan atau memutuskan arus listrik. Servo SPT70HV-180 disematkan pada alat torefaksi dengan pengoperasian cepat 0,20 detik/60° tegangan 6 volt sedangkan kecepatan 0,16 detik/60° tegangan 8,4 volt. Daya angkat beban motor servo mencapai 70kg/cm. Aki digunakan sebagai sumber energi untuk komponen motor DC dan motor servo. Regulator tegangan *step down* digunakan untuk menurunkan tegangan listrik aki dari 12 volt menjadi 8 volt. Aliran listrik 8 volt ini dialirkan ke motor servo agar bisa bergerak.



**Gambar 2.** Skematik rangkaian sistem kendali

Tahap akhir proses perancangan dilakukan verifikasi alat dan rangkaian. Selanjutnya alat digabung menjadi satu kesatuan dengan integrasi sistem kendali. Rancangan alat torefaksi bekerja secara otomatis untuk mengendalikan tinggi rendah suhu saat dilakukan proses torefaksi. Bentuk alat berupa tabung silinder berdiameter 15 cm dan tinggi tabung 16 cm. Sumber energi berasal dari kompor gas yang dilengkapi servo untuk pengaturan besar kecil api. Kerangka alat dari bahan besi sedangkan tabung dari bahan plat besi. Kapasitas alat 2 kg per jam yang dapat mencapai suhu 300°C untuk proses torefaksi. Kapasitas 2 kg per jam merupakan total akumulasi waktu yang dapat ditorefaksi oleh reaktor selama 1 siklus dengan waktu 27-30 menit. Kapasitas reaktor untuk melaksanakan 1 siklus torefaksi yaitu 1 kg dengan waktu rerata 20-30 menit yang dimasukkan dari suhu ruangan. Penentuan waktu torefaksi pada kisaran 20-30 menit menggunakan reaktor diperoleh dari pengujian pendahuluan untuk mendapatkan fungsi waktu terhadap hasil torefaksi terbaik. Hal ini dilakukan untuk mencegah agar setelah proses torefaksi selesai, pelet tandan kosong telah matang dan belum berubah menjadi arang ataupun karakteristik fisik pelet belum berubah karena pelet dimasukkan mulai dari suhu reaktor 28-40°C.

Motor dan *high torque gearbox* DC 12 volt, servo, potensiometer dan sensor suhu saling terintegrasi dalam proses kinerja reaktor. Tipe motor dan *high torque gearbox* yang digunakan berbentuk letter L yang terhubung langsung dengan poros reaktor. Mikrokontroler (*board* arduino uno) mengatur seluruh kendali proses torefaksi dengan pengaturan kestabilan suhu. Proses pengendalian suhu dimulai dari penentuan nilai *setting point* suhu melalui putaran potensio yang terhubung dengan *library* baris program berbagai nilai *setting point* dari 50°C hingga 450°C pada mikrokontroler. Secara otomatis, servo berputar untuk menyalakan pemantik api dan menyalurkan gas untuk memanaskan reaktor. Di saat yang bersamaan, motor *gearbox* memutar reaktor. Putaran reaktor diatur agar dapat berputar maju dan mundur

(searah jarum jam, atau berlawanan) setelah beberapa kali putaran. Besaran api yang dihasilkan oleh kompor tergantung dari putaran servo yang terhubung dengan nilai *setting point* yang diberikan. Saat nilai aktual yang diterima sensor mendekati *setting point*, maka api dari kompor mengecil untuk menyesuaikan suhu, sehingga besaran api dengan nilai *setting point* dapat setara atau berimbang. Servo memutar knop kompor dari posisi putaran tertinggi hingga memadamkan api, jika telah mencapai nilai *setting point* dan waktu torefaksi yang ditentukan. Seluruh sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler yang tersemat pada arduino uno.

**Analisis Data**

Kalibrasi pada sensor yaitu membandingkan secara bersamaan antara kinerja sensor dan kalibrator mulai dari suhu lingkungan hingga berbeda. Kalibrator yang digunakan adalah termometer multi channel HT-9815, dan *thermometer gun* GM-900. Hasil pengukuran dari sensor dan kalibrator dimasukkan ke dalam tabel pada program Microsoft Excel. Tabel data ini digunakan untuk membuat grafik regresi untuk memunculkan hubungan antara kalibrator dengan sensor melalui persamaan matematika. Selanjutnya adalah validasi yaitu dengan membandingkan nilai aktual dan nilai kalibrator setelah melalui koreksi dari hasil kalibrasi. Data validasi digunakan untuk mendapatkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Relative Root Mean Squared Error* (RRMSE). Nilai RRMSE bertujuan untuk mendapatkan persentase error dari RMSE. Rumus RMSE dan RRMSE terdapat persamaan 1 dan 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$RRMSE = \frac{[n^{-1} \sum_{i=1}^n (x-y)^2]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum y} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

- n = jumlah data
- x = data sumbu x
- O<sub>i</sub> = nilai observasi ke-i
- y = data sumbu y
- P<sub>i</sub> = nilai prediksi ke-i

Respon sistem bertujuan menunjukkan kondisi gangguan dan waktu terhadap kecepatan kinerja sistem. Respon sistem yang dilakukan pengukuran yaitu respon *transient* dan respon *steady state*. Stabilitas bertujuan menilai kemampuan alat dalam mempertahankan kinerja yang konsisten dalam jangka waktu yang lama. Akurasi alat bertujuan membandingkan pembacaan suhu dari sensor dan pembacaan suhu dari alat ukur suhu. Persamaan matematis akurasi pada rumus persamaan 3.

Untuk mengukur uji kinerja sistem meliputi akurasi, respon sistem, dan stabilitas sistem, penelitian dilakukan melalui pengujian berulang. Pengujian ini dilakukan menggunakan pelet tandan kosong kelapa sawit yang dimasukkan ke dalam reaktor untuk percobaan berbagai *setting point*. Nilai *setting point* untuk mengukur akurasi, respon sistem dan stabilitas adalah 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, dan 300°C.

$$Akurasi = \left( \frac{1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (SP - Na_i)}{n} \right)}{SP} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

- SP = Nilai *setting point*
- Na-i = Nilai aktual ke-i
- n = Jumlah data

Pengujian kualitas pelet tandan kosong yaitu uji *hidrophobicity* dan kadar air. *Hidrophobicity* diukur dengan merendam pelet dalam air dan diamati perubahan yang terjadi

(warna dan bentuk pelet) saat pelet menyerap air sesuai waktu yang ditentukan. Kadar air diukur dengan menimbang bahan pelet tanpa cawan kemudian diletakkan pada cawan porselen setelah penimbangan bobot pelet. Pelet tandan kosong kelapa sawit dikeringkan menggunakan oven suhu 105°C dalam waktu 24 jam hingga kadar air menjadi konstan. Pengukuran kadar air menggunakan pendekatan persamaan basis kering. Selanjutnya, pelet didinginkan dalam desikator hingga suhu stabil dan timbang dengan rumus persamaan 4.

$$\text{Kadar air} = \frac{Ba - Bf}{Ba} \times 100 \% \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

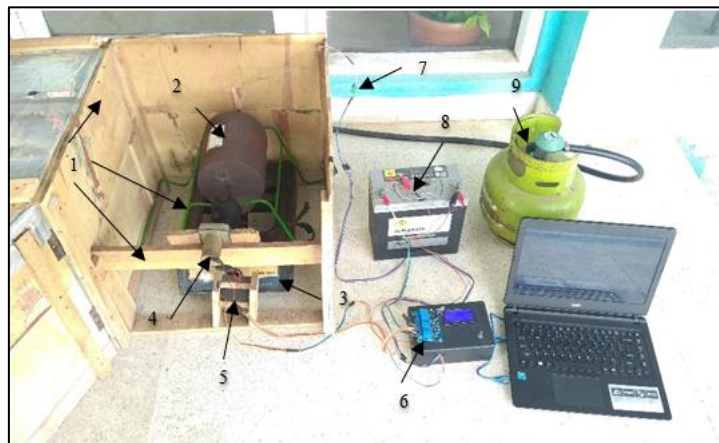
Ba = Berat bahan tanpa cawan sebelum dioven (gram)

Bf = Berat bahan tanpa cawan setelah dioven (gram)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Rancangan Alat

Hasil perancangan sistem kendali suhu alat torefaksi menggunakan kompor gas terdiri dari kotak alat, kerangka alat, tabung torefaksi, kompor gas, servo, motor DC yang terintegrasi *gearbox*, sensor suhu (termokopel tipe k dan modul) dan box mikrokontroler yang berisi arduino, LCD, relay dan potensiometer.



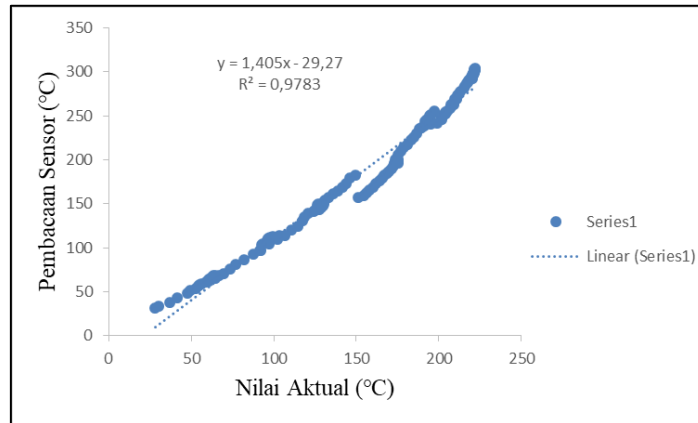
**Gambar 3.** Hasil rancangan alat torefaksi dengan sistem kendali suhu otomatis (1) kotak dan kerangka alat, (2) tabung torefaksi, (3) kompor gas, (4) motor DC dan *gearbox* (5) motor servo, (6) kotak kendali, (7) sensor termokopel tipe K, (8) aki/baterai 12 volt 45 Ah, (9) tabung gas

Kerangka alat terbagi menjadi tiga bagian yaitu kerangka penyangga tabung torefaksi, kerangka penyangga motor servo serta kerangka penyangga motor DC dan *gearbox*. Kerangka penyangga tabung torefaksi dari bahan besi memiliki ukuran tinggi 24 cm dan lebar 28 cm. Kerangka dari motor servo memiliki tinggi 15 cm dan lebar 9,5 cm. Kerangka penyangga motor DC dan *gearbox* memiliki tinggi 26 cm dan lebar 6,5 cm. Kotak alat berbentuk persegi dengan ukuran 50 cm x 50 cm berfungsi menahan suhu panas agar tetap di dalam kotak alat. Tabung terbuat dari bahan plat besi yang dibentuk menjadi silinder volume 2.826 cm<sup>3</sup>, diameter 15 cm dan tinggi 16 cm. Kotak kendali terdiri dari arduino uno R3 sebagai pengendali perintah, LCD sebagai penampil suhu dan kondisi sistem, regulator tegangan *step down* sebagai penurun tegangan listrik DC, relay sebagai pemutus arus listrik antara mikrokontroler 5V dengan motor dan gearbox 12V, potensio sebagai selektor (pemilih) *setting point* dan sensor suhu sebagai pembaca suhu pada reaktor (Gambar 3).

### Kalibrasi dan Validasi

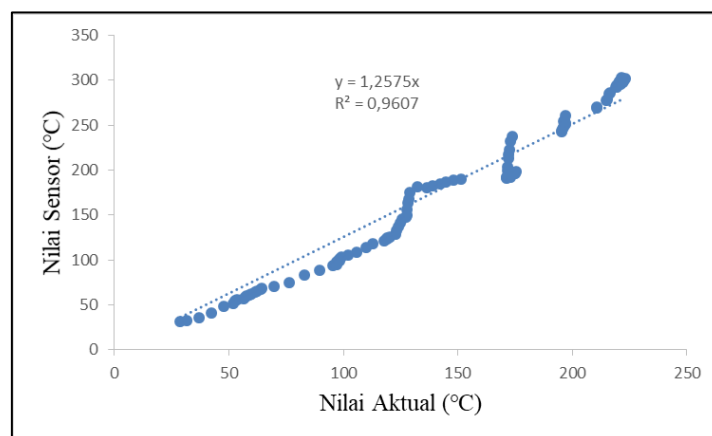
Pengujian kalibrasi dan validasi bertujuan agar nilai pembacaan sensor sesuai dengan alat ukur standar. Tahapan kalibrasi sensor suhu menggunakan termokopel tipe K dilakukan dengan mengukur suhu pada tabung torefaksi yang dipanaskan di atas kompor. Hasil

pengukuran ditampilkan pada serial monitor *software* arduino. Data pengukuran dicatat kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel sehingga menghasilkan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Kalibrasi sensor

Nilai koefisien determinasi dari kalibrasi sensor temperatur sebesar  $R^2 = 0,9783$  dengan nilai persamaan  $y = 1,405x - 29,27$ . Persamaan ini kemudian dimasukkan ke dalam program arduino untuk mendapatkan nilai pembacaan sensor yang paling mendekati nilai kalibrator. Nilai  $R^2$  antara model-model linear dan polinomial tidak terpaut jauh yaitu 0,005-0,01. Nilai yang tidak terpaut besar menjadi pertimbangan penggunaan persamaan model linear. Hal ini bertujuan untuk mempermudah integrasi substitusi model nilai aktual (sumbu x) dan sensor (sumbu y) dengan mikrokontroler melalui pembalikan koefisien. Penggunaan model polinomial dapat memperpanjang uraian pembalikan koefisien pada nilai aktual (sumbu x) dan sensor (sumbu y) saat pemrograman. Validasi dilakukan dengan cara yang sama seperti proses kalibrasi, namun rujukan suhu yang berbeda (Gambar 5). Validasi ini dilakukan dengan cara menghubungkan sumbu x dan y melalui koordinat 0,0. Hasil validasi menunjukkan perbedaan suhu sensor dan nilai aktual  $\pm 1,25^\circ\text{C}$ . Hasil analisis lainnya didapatkan nilai RMSE sebesar 4,34 dan nilai RRMSE sebesar 2%. Hasil validasi menunjukkan bahwa nilai pembacaan sensor telah mendekati nilai kalibrator.

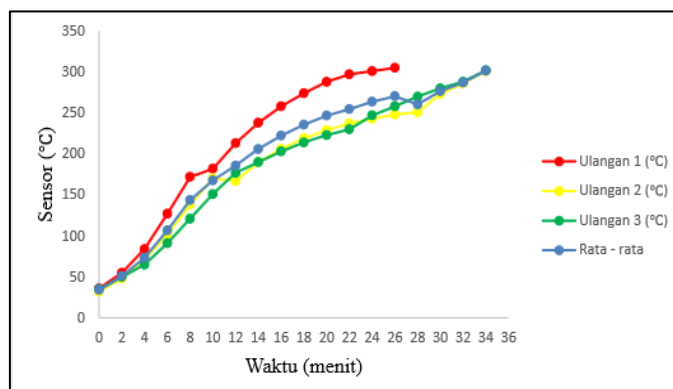


Gambar 5. Validasi sensor

### Respon Sistem

Pengujian respons sistem bertujuan untuk mengukur waktu kendali aktif hingga berhenti pada nilai *setting point*. Teknis pengambilan data respon sistem adalah mencatat perubahan suhu setiap 2 menit hingga mencapai nilai *setting point*. Nilai *setting point* yang diberikan adalah  $50^\circ\text{C}$  hingga  $300^\circ\text{C}$ . Pengukuran respon sistem dilakukan sebanyak 3 kali.

Pada pengujian respon sistem, reaktor telah diisi dengan pelet tandan kosong kelapa sawit sebelum pengujian.



Gambar 1. Respon sistem reaktor torefaksi

Gambar 6 menunjukkan pengujian pada tiga ulangan dengan hasil pengukuran suhu yang signifikan. Capaian suhu 50°C pada ± 1,5 menit, 100°C pada ± 5 menit, 150°C pada ± 7 menit, 200°C pada ± 11 menit, 250°C pada ± 15 menit, 300°C pada ± 30 menit. Umumnya suhu torefaksi ideal untuk 220-280°C untuk biomassa pelet tandan kosong kelapa sawit. Namun penggunaan reaktor torefaksi ini, respon sistem reaktor terhadap suhu 150°C dapat dicapai dalam waktu 7 menit dengan kadar air 1,68%. Kadar air pelet 1,68% sudah menunjukkan pelet berhasil ditorefaksi. Respon sistem alat telah sesuai dengan rancangan desain yang diinginkan, namun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu 300°C dalam rentang waktu ± 30 menit masih tergolong lama. Hal ini disebabkan jarak yang jauh antara kompor dan tabung torefaksi, yaitu 10 cm sehingga peningkatan suhu membutuhkan waktu lebih lama.

### Akurasi

Pengujian akurasi bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keakuratan kinerja alat dalam mengendalikan suhu torefaksi terhadap nilai *setting point*. Nilai *setting point* yang diuji adalah 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, dan 300°C. Pengujian nilai *setting point* terhadap nilai aktual dilakukan menggunakan pelet tandan kosong kelapa sawit, sehingga nilai akurasi yang didapatkan lebih *reliable*. Tabel 1 menggambarkan data akurasi alat yang menunjukkan hasil keakuratan berbagai pengamatan dan perbedaan setiap *setting point*.

Tabel 1. Keakurasian sistem kendali suhu

No	Suhu (°C)	Keakurasian pengamatan ke- terhadap <i>setting point</i>		
		1	2	3
1	50	77,00%	76,81%	84,74%
2	100	87,32%	84,95%	87,85%
3	150	94,15%	87,37%	93,20%
4	200	92,08%	94,80%	94,84%
5	250	95,88%	96,75%	95,63%
6	300	94,88%	96,09%	96,44%
<b>Rerata</b>		<b>90,22%</b>	<b>89,46%</b>	<b>92,12%</b>

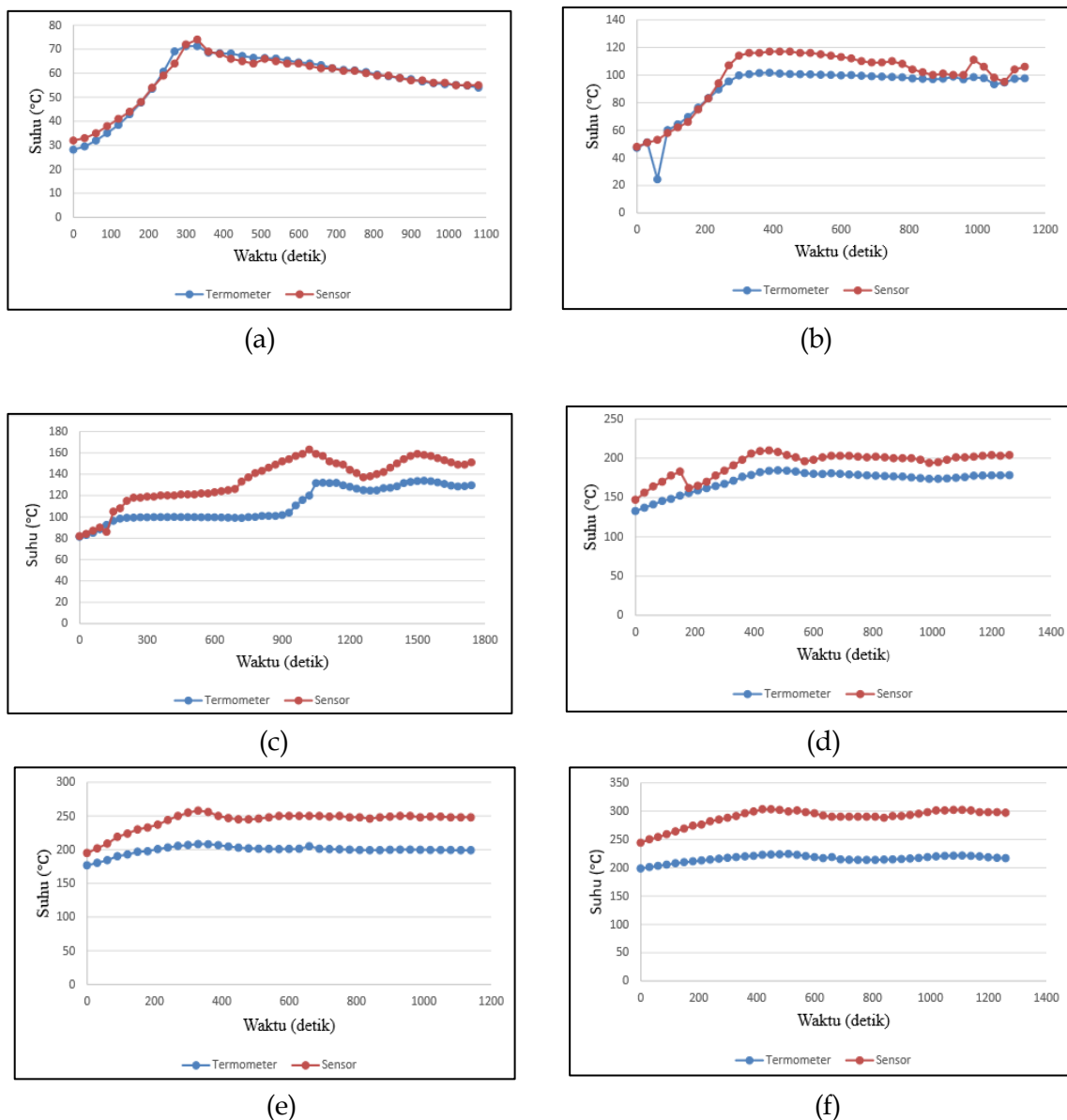
Tabel 1 menunjukkan pada pengamatan ke-1 diperoleh hasil keakuratan 77% dengan *setting point* 50°C dan 87% *setting point* 100. Peningkatan keakuratan terjadi pada *setting point* 150-300°C yaitu 94,15-95,88%. Pengamatan ke-2 menunjukkan keakuratan pada *setting point* 50°C, 100°C, dan 150°C yaitu 76%, 84%, dan 87%. Keakuratan meningkat pada *setting point* 200-300°C yaitu 94,80-96,75%. Pengamatan ke-3 menunjukkan keakuratan pada *setting point*



50°C yaitu 84% dan *setting point* 100°C yaitu 87%. Peningkatan keakuratan terjadi pada *setting point* 150-300°C yaitu 93,20-96,44%. Sistem pemutar tuas gas memiliki keakuratan yang tinggi pada suhu di atas 100°C. Namun, kemampuan putaran tuas gas kurang efektif dalam mengurangi *output* gas sehingga api cenderung lebih besar dari *setting point* yang diinginkan. Saat tuas diputar ke posisi yang lebih kecil maka api langsung padam. Hal ini perlu dihindari karena proses torefaksi bergantung pada durasi. Sistem belum mendukung untuk menyalakan kembali api yang telah padam, kecuali pada saat penyalaan awal.

### Stabilitas

Kinerja alat telah berhasil mengendalikan suhu dalam proses torefaksi sesuai dengan *setting point* yang telah ditetapkan. Stabilitas sistem yang baik mampu mengukur, mendeteksi, dan mengeksekusi instruksi dengan baik, tanpa mengalami penurunan kinerja yang signifikan (Telaumbanua et al., 2021). Pengujian stabilitas sistem pada nilai *setting point* terhadap nilai aktual dilakukan menggunakan pelet tandan kosong kelapa sawit, sehingga hasil yang didapat lebih *reliable*. Hasil pengujian stabilitas pada suhu torefaksi 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, dan 300°C secara berurutan ditunjukkan oleh Gambar 7.



Gambar 7. Stabilitas suhu torefaksi 50°C (a), 100°C (b), 150°C (c), 200°C (d), 250°C (e), dan 300°C (f)

Hasil menunjukkan pada *setting point* 50°C, nilai RMSE 1,72 dan RRMSE 8%. Pada *setting point* 100°C, nilai RMSE sebesar 11,1 dan RRMSE 29%. Hasil RMSE sebesar 29,7 dan RRMSE sebesar 53% pada *setting point* 150°C. RMSE 22,2 dan RRMSE 30% pada *setting point* 200°C. Pengujian pada *setting point* 250°C terdapat RMSE sebesar 44,7 dan RRMSE sebesar 48% sedangkan *setting point* 300°C menghasilkan RMSE 75,8 dan RRMSE 68%. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu mengontrol suhu dengan baik pada *setting point* 50°C dan 100°C, karena nilai RMSE rendah (1,72 dan 11,1) artinya pembacaan sensor tidak berbeda secara signifikan dari *setting point* yang ditentukan. Namun, pada *setting point* 150°C hingga 300°C, nilai RMSE sudah melebihi 20, menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara pembacaan sensor dan *setting point*. Proses ini membutuhkan waktu sekitar 2-25 menit untuk mencapai suhu *setting point* 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, dan 300°C dari suhu awal hingga stabil mengikuti *setting point*.

### Kualitas Pelet Torefaksi

Pengujian kadar air dilakukan untuk mengetahui kadar air yang terdapat pada pelet tandan kosong kelapa sawit sebelum dan sesudah proses torefaksi. Suhu torefaksi yang digunakan merupakan suhu ruang silinder torefaksi dengan sensor suhu yang telah tersemat di dalamnya. Pengukuran dilakukan menggunakan pendekatan kadar air basis kering. Kadar air rerata pelet sebelum torefaksi berkisar pada 10-16%, sedangkan setelah torefaksi tergantung pada nilai *setting point* yang diberikan.

**Tabel 2.** Kadar air pelet pada berbagai suhu torefaksi

Suhu (°C)	Kadar air ulangan ke-			Rata-rata
	1	2	3	
50	6%	7%	6%	6,33%
100	4%	6%	5%	5,00%
150	2%	2%	1%	1,67%
200	2%	2%	1%	1,67%
250	2%	2%	2%	2,00%
300	2%	1%	1%	1,33%

Tabel 2 menunjukkan bahwa pada rentang suhu 50°C hingga 100°C, terdapat peningkatan nilai rata-rata kadar air sebesar 4-7%. Sebaliknya, pada rentang suhu 150°C hingga 300°C, terdapat nilai kadar air terendah sebesar 1-2%. Kadar air pelet pada suhu torefaksi 50-100°C sebesar 6-8%, sedangkan pada suhu torefaksi 150-300°C kadar airnya sebesar 0,6-2,6%. Penelitian Haryanto et al (2021) menunjukkan bahwa kadar air pelet TKKS mengalami penurunan antara 0,32% sampai 0,52% selama proses torefaksi pada suhu 200°C dan 0,65% setelah torefaksi pada suhu 280°C selama 20 menit (Rani et al., 2020). Hasil ini mengindikasikan bahwa proses torefaksi dengan waktu selama 15 menit pada suhu di atas 100°C mampu menghasilkan kadar air yang rendah.

Salah satu manfaat torefaksi biomassa adalah deoksigenasi yang dapat meningkatkan sifat hidrofobisitas dan kepadatan energi biomassa (Liu et al., 2020). Pengujian hidrofobisitas dilakukan dengan perendaman pelet dalam air untuk menguji ketahanannya. Uji hidrofobisitas pelet torefaksi dengan waktu perendaman selama 24 jam mempengaruhi warna rendaman. Perkembangan penelitian torefaksi dapat mengukur kualitas pelet tanpa perendaman selama 24 jam, namun kualitas pelet torefaksi dapat diukur melalui rata-rata intensitas warna merah, hijau, dan biru. Pada rentang suhu 50-200°C, sampel memiliki warna rendaman yang lebih gelap dibandingkan dengan pelet torefaksi suhu 250°C dan 300°C dengan warna lebih bening. Selain itu, sebagian besar sampel pada suhu 50-150°C mengalami

kerusakan fisik saat proses perendaman. Hal ini menunjukkan bahwa suhu di bawah 150°C memiliki hidrofobisitas rendah. Namun, pada suhu 200-300°C, semua sampel tetap utuh meskipun telah ditekan dengan tangan, menunjukkan bahwa suhu di atas 200°C adalah suhu yang optimal untuk proses torefaksi. Torefaksi biomassa mengakibatkan perubahan warna akibat terjadinya dekomposisi hemiselulosa yang mengakibatkan meningkatnya jumlah karbon hitam (Mamvura et al., 2018). Warna akhir pelet biomassa dipengaruhi oleh kandungan hemiselulosa, selulosa dan lignin. Semakin tinggi suhu torefaksi maka semakin gelap pula pelet biomassa yang dihasilkan karena adanya perubahan komposisi kimia biomassa (Ivanovski et al., 2023).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, didapatkan sistem kendali suhu berbasis mikrokontroler dalam proses torefaksi menggunakan kompor gas. Sistem ini memenuhi kriteria desain dengan kemampuan mengontrol suhu melalui servo sebagai aktuator untuk menggerakkan tuas gas dan mengatur besar kecilnya api yang dihasilkan. Hasil pengujian kadar air berbasis kering menunjukkan bahwa suhu di atas 150°C menghasilkan kadar air rendah sebesar 1-2%. Hidrofobisitas pelet dengan suhu di atas 200°C selama 24 jam tidak mengubah bentuk fisiknya. Kalibrasi alat menunjukkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,9783. Hasil validasi menunjukkan nilai koefisien determinasi  $R^2$  sebesar 0,9607, RMSE 4,34, dan RRMSE 2%. Kinerja sistem atas kendali suhu menunjukkan respon sistem selama  $\pm 30$  menit mencapai suhu hingga 300°C dengan akurasi pengendalian suhu sebesar 92,12%. Stabilitas alat menunjukkan kinerja yang baik pada *setting point* 50°C dan 100°C.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung khususnya Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian.

## CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun.

## DAFTAR REFERENSI

- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (2nd ed)*. New York: Elsevier Inc.
- Brunerova, A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Telaumbanua, M., & Herak, D. (2019). Sustainable management of coffee fruit waste biomass in ecological farming systems at West Lampung, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 345, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/345/1/012007>
- Dermiyati, Suharjo, R., Telaumbanua, M., Yosita, R., Sari, A. W., & Pujiandayani, A. (2020). Abundance and characterization of microorganisms isolated from oil palm empty fruit bunches waste under aerobic, anaerobic, and facultative anaerobic conditions. *Biodiversitas*, 21(9), 4213-4220. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210936>
- Ferrero, F., Lohrer, C., Schmidt, B. M., Noll, M. & Malow, M. (2009). A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 439-448. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.009>
- Haryanto, A., Hasanudin, U., Sahari, B. & Sugiarto, R. (2019). Methane emission reduction in palm oil mill through co-composting empty fruit bunch and palm oil mill effluent. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 431-441.
- Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S. & Hidayat, W. (2021). Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8, 33-42.

- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D. A., Triyono, S., Amrul & Wisnu, F. K. (2021). Torrefaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 749, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012047>
- Ivanovski, M., Petrovic, A., Goricanec, D., Urbanci, D. & Simonic, M. (2023). Exploring the properties of the torrefaction proces and its prospective in treating lignocellulosic material, *Energy*, 16, 6521, 2-20. <https://doi.org/10.3390/en16186521>
- Kementan. (2021). *Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2019-2021*. Direktorat Jenderal Perkebunan: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Liu, M., Zhu, X., Chen, R., Liao, Q., Xia, A. & Huang, Y. (2020). Influence of torrefaction hydrothermal carbonization and degradative solvent extraction pretreatments on moisture absorbption and self-ignition characteristics of biomass, *Fuel*, 282 ,11884, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118843>
- Mahdie, M. F., Subari, D., Sunardi & Ulfah. (2016). Pengaruh campuran limbah kayu rambai dan api-api terhadap kualitas biopelet sebagai energi alternatif dari lahan basah. *Jurnal Hutan Tropis*, 4, 246-253. <http://dx.doi.org/10.20527/jht.v4i3.3618>
- Mamvura, T. A., Pahla, G., & Muzenda, E. (2018). Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa South African. *Jurnal of Chemical Engineering*, 25, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.11.003>
- Purnomo, C. E., Haryanto, A., Wisnu, F. K. & Telaumbanua, M. (2022). Torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit menggunakan reaktor putar. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, 1(1), 1-11.
- Rani, I. T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., & Hasanudin, U. (2020). Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 9, 63-70. <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-l.v9i1.63-70>
- Suhartini, S., Rohma, N. A., Mardawati, E., Kasbawati, Hidayat, N. & Melville, L. (2022). Biorefining of oil palm empty fruit bunches for bioethanol and xylitol production in Indonesia: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 1-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111817>.
- Sulistio, Y., Febryano, I. G., Hasanudin, U., Yoo, J., Kim, S., Lee, S. & Hidayat, W. (2019) Pengaruh torefaksi dengan reaktor counter-flow multi baffle (COMB) dan electric furnace terhadap pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*, 8, 65-76. <http://dx.doi.org/10.23960/jsl1865-76>
- Telaumbanua, M., Haryanto, A., Wisnu, F. K., Lanya, B. & Wiratama, W. (2021). Design of insect trap automatic control system for cacao plants. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8, 167-175.
- Wahyudi, R., Amrul, A. & Irsyad, M. (2020). Karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi limbah tandan kosong kelapa sawit menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, 20(2), 1-8. <http://dx.doi.org/10.24036/invotek.v20i2.706>
- Ryu, C., Yang, Y. B., Khor, A., Yates, N. E., Sharifi, V. N. & Switthenbank, J. (2006). Effect of fuel properties on biomass combustion: part I. experiments – fuel type, equivalence ratio and particle size, *Fuel*, 85, 1039-1046.
- Zen, M., Helwani, Z. & Komalasari, K. (2019). Bahan bakar padat dari tandan kosong sawit menggunakan proses torefaksi dengan variasi suhu dan waktu torefaksi. *Jom F Teknik*, 6, 1-5.