

**RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU PADA ALAT  
TOREFAKSI TIPE SILINDER DENGAN PEMANAS KOMPOR GAS**

**Skripsi**

**Oleh**

**Wahyu Hendi Setiawan**



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## **ABSTRACT**

### **DESING OF TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF CYLINDER TYPE TOREFACTION EQUIPMENT WHIT GAS STOVE HEATER**

**By**

**WAHYU HENDI SETIAWAN**

Fuel is a source of energy that supports domestic and industrial activities. The increasing demand for energy has led to a decrease in the supply of fossil fuels. One of the fuels that can replace fossil fuels is biomass derived from various agricultural biomass wastes. The palm oil industry produces quite a lot of solid waste in the form of empty palm fruit bunches (EFB). Therefore, new technology is needed to process this waste into fuel that is environmentally friendly and has high added value, one of which is the production of biopellets. Torrefaction is the process of converting biomass into cleaner solid fuels. The tools used for the torrefaction process are still mostly done manually and use wood fuel, making it difficult to reach the optimum temperature. Therefore, a torrefaction tool is needed that can control temperature automatically in order to obtain optimal temperatures during the torrefaction process, so that handling time is more effective and quality torrefaction results are obtained. The purpose of this study was to obtain calibration results of the type K thermocouple sensor using Arduino Uno and to test the performance of the pellet torrefaction tool from empty palm oil bunches (EFB).

Research methods carried out include design, manufacture and testing. The design carried out is structural design and functional design then proceed to the

manufacturing and testing process. The tests carried out were testing system response, accuracy, stability, moisture content and hydrophobicity.

After the tool design was carried out, an automatic torrefaction tool was created using a gas stove. The dimensions of the supporting frame for the torrefaction tube are 24 cm high and 28 cm wide, the servo motor frame is 15 cm high and 9.5 cm wide, the dynamo support frame is 26 cm high and 6.5 cm wide. The tool box is square with dimensions 50 x 50 cm. The torrefaction tube has a volume of 2,826 cm<sup>3</sup> with a diameter of 15 cm and a height of 16 cm. After testing the system resonance for temperature control, it was able to reach 300 °C within 26 minutes from normal temperature. The temperature accuracy test shows an average value of 92.12%. Stability testing works quite stable in controlling the temperature from a predetermined setting point. Testing the value of the average water content at a temperature of 50 – 100 °C obtained a higher water content value of 4 – 7% and the lowest water content value was at a temperature of 150 – 300 °C, namely 1 – 2%. Hydrophobicity test after 24 hours of immersion in 18 samples resulting from torrefaction, the color of the sample immersion at 50 – 200 °C was darker in color and many samples disintegrated compared to samples at 250 °C and 300 °C which were clearer in color and the samples remained intact.

**Keywords:** fuel, biomass, automatic control, torrefaction, empty oil palm fruit bunches (EFB)

## **ABSTRAK**

### **RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU PADA ALAT TOREFAKSI TIPE SILINDER DENGAN PEMANAS KOMPOR GAS**

**Oleh**

**Wahyu Hendi Setiawan**

Bahan bakar adalah sumber energi yang mendukung kegiatan domestik dan industri. Meningkatnya permintaan energi telah menyebabkan penurunan pasokan bahan bakar fosil. Salah satu bahan bakar yang dapat menggantikan bahan bakar fosil adalah biomassa yang berasal dari berbagai limbah biomassa pertanian. Industri kelapa sawit menghasilkan limbah padat yang cukup banyak berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Oleh karena itu, diperlukan teknologi baru untuk mengolah limbah tersebut menjadi bahan bakar yang ramah lingkungan dan bernilai tambah tinggi, salah satunya adalah produksi biopellet. Torefaksi adalah proses pengubahan (*converting*) biomassa menjadi bahan bakar padat yang lebih bersih. Alat yang digunakan untuk proses torefaksi saat ini masih banyak dilakukan secara manual dan menggunakan bahan bakar kayu sehingga sulit untuk mencapai suhu optimum. Oleh karena itu, diperlukan alat torefaksi yang dapat mengontrol suhu secara otomatis agar diperoleh suhu yang optimal selama proses Torefaksi, sehingga waktu penanganan lebih efektif dan diperoleh hasil Torefaksi yang berkualitas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil kalibrasi sensor termocouple tipe K menggunakan arduino uno dan menguji kinerja alat torefaksi pellet dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

Metode penelitian yang dilakukan meliputi perancangan, pembuatan dan pengujian. Perancangan yang dilakukan yaitu rancangan struktural dan rancangan fungsional kemudian dilanjutkan ke proses pembuatan dan pengujian. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian respon sistem, akurasi, stabilitas, kadar air dan hydrophobicity.

Setelah dilakukan perancangan alat terciptalah alat torefaksi otomatis menggunakan kompor gas. Dimensi kerangka penyangga tabung torefaksi tinggi 24 cm dan lebar 28 cm, kerangka motor servo tinggi 15 cm dan lebar 9,5 cm, kerangka penyangga dinamo tinggi 26 cm dan lebar 6,5 cm, kotak alat berbentuk persegi dengan ukuran 50 x 50 cm. Tabung torefaksi bervolume 2.826 cm<sup>3</sup> dengan diameter 15 cm dan tinggi 16 cm. Setelah dilakukan pengujian reson sistem terhadap pengendalian suhu mampu mencapai 300°C dalam waktu 26 menit dari suhu normal. Pengujian keakurasian suhu menunjukkan nilai rata – rata 92,12%. Pengujian stabilitas bekerja cukup stabil dalam mengontrol suhu dari *setting point* yang telah ditentukan. Pengujian nilai kadar air rata – rata pada suhu 50 – 100 °C didapatkan nilai kadar air lebih tinggi yaitu 4 – 7% dan nilai kadar air terendah berada di suhu 150 – 300 °C yaitu 1 – 2%. Pengujian hydrophobicity setelah perendaman selama 24 jam pada 18 sampel hasil torefaksi, warna rendaman sample di suhu 50 – 200 °C berwarna lebih gelap dan banyak sample hancur dibandingkan sampel pada suhu 250 °C dan 300 °C yang berwarna lebih bening dan sample tetap utuh.

Kata Kunci : bahan bakar, biomassa, kontrol otomatis, torefaksi, tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

**RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU PADA ALAT  
TOREFAKSI TIPE SILINDER DENGAN PEMANAS KOMPOR GAS**

**Oleh**

**Wahyu Hendi Setiawan**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Pertanian  
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Skripsi : **RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU  
PADA ALAT TOREFAKSI TIPE SILINDER  
DENGAN PEMANAS KOMPOR GAS**

Nama Mahasiswa : **Wahyu Hendi Setiawan**


No. Pokok Mahasiswa : **1614071047**

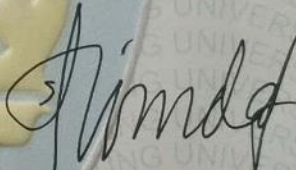
Jurusan : **Teknik Pertanian**

Fakultas : **Pertanian**




1. **Komisi Pembimbing**

  
**Dr. Mareli Telaumbanua, S.T.P., M.Sc.**  
NIP. 198803252015041001

  
**Winda Rahmawati S.T.P., M.Si., M.Sc.**  
NIP. 198905202015042001

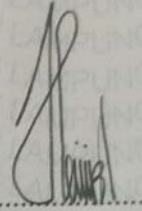
2. **Ketua Jurusan Teknik Pertanian**

  
**Dr. Ir. Sandi Asmara, M.Si.**  
NIP. 196210101989021002

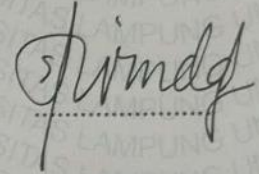
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

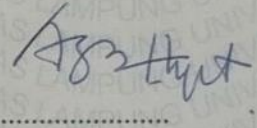
Ketua : **Dr. Mareli Telaumbanua, S.T.P., M.Sc.**



Sekretaris : **Winda Rahmawati S.T.P., M.Si., M.Sc.**



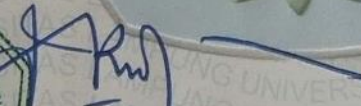
Penguji  
Bukan Pembimbing : **Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.**



2. Dekan Fakultas Pertanian



**Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.**  
196110201986031002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **6 Februari 2023**



## PERNYATAAN HASIL KARYA

Saya adalah Wahyu Hendi Setiawan NPM 1614071047 Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil karya ilmiah saya yang di bimbing oleh komisi pembimbing 1). Dr. Mareli Telaumbanua, S.TP., M.Sc. dan 2). Winda Rahmawati S.T.P., M.Si., M.Sc. Berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini berisikan material yang saya buat sendiri, serta bimbingan dari para dosen pembimbing serta hasil rujukan beberapa sumber lain (Buku, Jurnal, Skripsi, Makalah, dll.) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil plagiat dari karya orang lain.

Demikian pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, 6 Februari 2023

Yang membuat pernyataan



**(Wahyu Hendi Setiawan)**

NPM.1614071047

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Padang Ratu pada tanggal 31 Mei 1998, Sebagai anak pertama dari empat bersaudara dari Bapak Marso dan Ibu Sangidah. Penulis memulai pendidikan dari SDN 1 Sendangayu pada tahun 2004-2010, SMP Negeri Satu Atap 1 Padangratu pada tahun 2010-2013, dan SMK Muhammadiyah 2 Kalirejo pada tahun 2013-2016.

Pada tahun 2016 penulis terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama berkuliah, penulis pernah menjadi asisten praktikum Listrik dan Elektronika, serta Gambar Teknik.

Tahun 2019, penulis melaksanakan Praktik Umum (PU) di PT. Kusumasatria Agrobio Taniperkasa, Jalan Abdul Ghani atas Ngaglik, Kota Batu, Kecamatan Batu, Kabupaten Malang, Jawa Timur dengan judul “Mempelajari Budidaya Pakcoy (*Brassica Rapa L. ssp. chinensis*) Menggunakan Metode Hidroponik Sistem DFT (*Deep Flow Technique*) Di PT. Kusumasatria Agrobio Taniperkasa”.

Tahun 2020, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Bangun Mulyo, Kecamatan Simpang Pematang, Kabupaten Mesuji, Provinsi Lampung.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dari hati yang paling dalam dan penuh kerendahan hati, ku persembahkan karya kecil ini kepada Dzat pemilik alam semesta,

**Allah SWT**

Dengan segala pemberian-Nya, aku dapat menyelesaikan karya ini.

Untuk Kedua Orang Tua

**BAPAK MARSO & IBU SANGIDAH**

Ku persembahkan karya ini sebagai tanda bakti, hormat, dan rasa terima kasih yang tiada ukur. Terima kasih atas doa, motivasi, nasihat dan guyuran kasih sayang yang selama ini Engkau berikan. Semoga senantiasa diberi kesehatan agar kelak Engkau melihat kesuksesan kecil lainnya.

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada adik - adikku

**CHINTYA WULANDHARI, RIDHO ALFARIZQI &  
AZKA RAFAN ARZANKA**

Karena telah memberikan doa, dorongan motivasi dan semangat untuk terus melaju hingga saat ini.

**Teknik Pertanian 2016**

Persembahan dan ucapan terimakasih aku haturkan sebesar-besarnya. Perjalanan panjang telah dilalui bersama, suka-duka, segala rasa berbaur di dalam keluarga kecil ini.

Tak lupa persembahan aku berikan kepada Almamater tercintan,

*Universitas Lampung*

Semoga karya kecil ini dapat berguna untuk pembangunan dan perkembangan.

## SANWACANA

Alhamdulillah Robbil `Alamin, selalu penulis haturkan ucapan rasa syukur kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, dan inayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi berjudul **“Rancang Bangun Sistem Kendali Suhu Pada Alat Torefaksi Tipe Silinder Dengan Pemanas Kompor Gas”** ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dilaksanakan dan ditempuh oleh penulis untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Tidak terlupakan Sholawat teriring salam senantiasa penulis sanjung Agungkan kepada suri tauladan seluruh umat islam, murobi terbaik, pemimpin besar yang bijaksana yaitu Nabi Allah Muhammad SAW semoga kita semua selalu menjadi umatnya dan semoga kita mendapatkan syafaatnya kelak di yaumil kiyamah, Aamiin.

Penulis memahami benar dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki, peran serta dari beberapa pihak sangat membantu dalam menyelesaikan skripsi ini, Maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M. Si. selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Sandi Asmara, M. Si. selaku Ketua Jurusan Teknik Pertanian yang sudah memberikan saran dan masukan sebagai perbaikan selama penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Mareli Telaumbanua, S.T.P., MS. selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan motivasi, bimbingan dan saran dalam penyusunan skripsi ini.

4. Ibu Winda Rahmawati, S.T.P. M.Si. M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik sekaligus Dosen Pembimbing II yang sudah memberikan saran dan masukan sebagai perbaikan selama penyusunan skripsi.
5. Bapak Prof. Dr. Ir Agus Haryanto, M.P. selaku pembahas yang telah memberikan waktu, saran, dan ilmu selama penyusunan skripsi ini;
6. Seluruh Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Pertanian Universitas Lampung yang sudah membimbing, memberikan ilmu yang bermanfaat, serta mendukung dan memberikan motivasi kepada penulis selama ini.
7. Kedua Orang tua tercinta Bapak Marso dan Ibu Sangidah, serta Ketiga saudara kandung tersayang adik Chintia Wulan Dari, Ridho Alfa Rizqi dan Azka Rafan Arzanka, serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan berupa doa, moril, materil, serta kasih sayang yang tiada tara sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
8. Teman-teman TNT Squad yang telah kebersamai, memotivasi, dan membantu penulis dalam proses penyelesaian skripsi.
9. Keluarga Teknik Pertanian 2016 yang telah menemani, tempat berbagi canda-tawa, keluh-kesah, dan membantu penulis dalam perkuliahan sampai dengan penelitian dan penyusunan skripsi ini.
10. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu namanya, yang telah berinteraksi secara langsung ataupun tidak langsung dengan penulis, dan membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 6 Februari 2023

Penulis,

**Wahyu Hendi Setiawan**

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Kelapa Sawit.....	5
2.2 Biomassa.....	6
2.3 Biopellet.....	7
2.4 Torefaksi .....	9
2.5 <i>Arduino Uno</i> .....	11
2.6 Motor Servo.....	12
2.7 Sistem Kontrol.....	12
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Waktu dan Tempat.....	18
3.2 Alat dan Bahan .....	18
3.3 Kriteria Desain.....	18
3.4 Prosedur Penelitian .....	19
3.4.1 Studi Literatur .....	21
3.4.2 Perancangan .....	21
3.4.2.1 Rancangan Struktural.....	21
3.4.2.2 Rancangan Fungsional.....	23
3.5 Kalibrasi dan Validasi Sensor.....	28

3.6 Uji Kinerja .....	29
3.6.1 Respon Sistem.....	29
3.6.2 Stabilitas.....	30
3.6.3 Akurasi.....	31
3.7 Pengujian Hasil Torefaksi.....	31
3.7.1 Kadar Air .....	31
3.7.2 <i>Hidrophobicity</i> .....	32
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Hasil Perancangan Alat Torefaksi .....	33
4.1.1 Kerangka Alat.....	34
4.1.2 Tabung Torefaksi.....	35
4.1.3 Kompor Gas .....	37
4.1.4 Motor Servo .....	37
4.1.5 Kotak Kendali .....	38
4.2 Kalibrasi dan Validasi Sensor.....	40
4.3 Pengujian Kinerja Alat .....	43
4.3.1 Respon Sistem Reaktor Torefaksi.....	44
4.3.2 Akurasi.....	45
4.3.3 Stabilitas.....	48
4.4 Pengujian Hasil Torefaksi.....	52
4.4.1 Kadar Air .....	52
4.4.2 <i>Hidrophobicity</i> .....	53
<b>V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	56
5.2 Saran .....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Rujukan Penelitian .....	13
2. Koefisien korelasi.....	40
3. Keakurasian Sistem Kendali Suhu Pengamatan Ke-1 .....	46
4. Keakurasian Sistem Kendali Suhu Pengamatan Ke-2 .....	46
5. Keakurasian Sistem Kendali Suhu Pengamatan ke-3 .....	47
6. Kadar Air.....	52
7. <i>Hidrophobicity</i> .....	54

### *Lampiran*

8. Data Kalibrasi Sensor Termokopel Tahap Pertama .....	63
9. Data validasi dan nilai RMSE sensor Termokopel Tahap Pertama .....	65
10. Data Kalibrasi Sensor Termokopel Tahap Ke Dua.....	68
11. Data validasi dan nilai RMSE sensor Termokopel Tahap Ke Dua.....	72
12. Respon Sistem Reaktor Torefaksi .....	75
13. Keakurasian alat U1 50 <sup>0</sup> C .....	76
14. Keakurasian alat U1 100 <sup>0</sup> C .....	77
15. Keakurasian alat U1 150 <sup>0</sup> C .....	78
16. Keakurasian alat U1 200 <sup>0</sup> C .....	79
17. Keakurasian alat U1 250 <sup>0</sup> C .....	81
18. Keakurasian alat U1 300 <sup>0</sup> C .....	83
19. Keakurasian alat U2 50 <sup>0</sup> C .....	85
20. Keakurasian alat U2 100 <sup>0</sup> C .....	86
21. Keakurasian alat U2 150 <sup>0</sup> C .....	87
22. Keakurasian alat U2 200 <sup>0</sup> C .....	89
23. Keakurasian alat U2 250 <sup>0</sup> C .....	90



24. Keakurasian alat U2 300 <sup>0</sup> C .....	91
25. Keakurasian alat U3 50 <sup>0</sup> C .....	92
26. Keakurasian alat U3 100 <sup>0</sup> C .....	93
27. Keakurasian alat U3 150 <sup>0</sup> C .....	94
28. Keakurasian alat U3 200 <sup>0</sup> C .....	96
29. Keakurasian alat U3 250 <sup>0</sup> C .....	97
30. Keakurasian alat U3 300 <sup>0</sup> C .....	98
31. Stabilitas Suhu Torefaksi 50°C.....	99
32. Stabilitas Suhu Torefaksi 100°C.....	100
33. Stabilitas Suhu Torefaksi 150°C.....	101
34. Stabilitas Suhu Torefaksi 200°C.....	103
35. Stabilitas Suhu Torefaksi 250°C.....	104
36. Stabilitas Suhu Torefaksi 300°C.....	105

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	6
2. Biopellet .....	8
3. <i>Arduino Uno</i> .....	12
4. Motor Servo .....	12
5. Diagram Alir Prosedur Penelitian .....	20
6. Desain Alat Torefaksi .....	22
7. Skematik Rangkaian Sistem Kendali .....	23
8. <i>Arduino Uno</i> .....	24
9. <i>Liquid Crystal Display</i> .....	25
10. <i>Relay 4 channel</i> .....	25
11. Motor Servo .....	26
12. Dinamo DC 12 volt .....	27
13. Aki 12 volt .....	27
14. Termokopel .....	28
15. Sinyal Respon Transien Dan <i>Steady State</i> ( <a href="http://www.mitra.edukasiku.com/2019/12/karakteristik-alat-ukur-dinamis">www.mitra.edukasiku.com/2019/12/karakteristik-alat-ukur-dinamis.</a> ).....	30
16. Alat Torefaksi.....	33
17. Kerangka Alat .....	34
18. Kerangka Penyangga Tabung .....	34
19. Dimensi Kerangka Alat Tampak Atas .....	35
20. Dimensi Kerangka Alat Tampak Depan .....	35
21. Tabung Torefaksi (a) Depan, (b) Belakang.....	36
22. Dimensi Tabung Torefaksi (a) Tampak Atas, (b) Tampak samping .....	36
23. Pematik Kompor .....	37

24. Motor Servo .....	38
25. Kotak Kendali .....	38
26. Kalibrasi Sensor .....	41
27. Validasi Sensor .....	42
28. Kalibrasi Sensor Tahap Dua.....	43
29. Validasi Sensor Tahap Dua.....	43
30. Respon Sistem Reaktor Torefaksi.....	44
31.Keakurasian Sensor Pengamatan Ke-1 .....	45
32.Keakurasian Sensor Pengamatan Ke-2 .....	46
33.Keakurasian Sensor pengamatan Ke-3.....	47
34. Stabilitas Suhu Torefaksi 50°C.....	48
35. Stabilitas Suhu Torefaksi 100°C.....	49
36. Stabilitas Suhu Torefaksi 150°C.....	49
37. Stabilitas Suhu Torefaksi 200°C.....	50
38. Stabilitas Suhu Torefaksi 250°C.....	50
39. Stabilitas Suhu Torefaksi 300°C.....	51

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Bahan bakar merupakan sumber energi untuk mendukung aktivitas rumah tangga dan industri. Masyarakat sering menggunakan bahan bakar fosil, yaitu bahan bakar minyak, batu bara, dan gas. Permintaan energi yang semakin meningkat mengakibatkan persediaan bahan bakar fosil menurun, sehingga bahan bakar fosil mengalami peningkatan harga. Masalah krisis energi ini perlu diselesaikan dengan memproduksi bahan bakar yang mampu menggantikan bahan bakar fosil dari bahan yang banyak tersedia di alam, murah, dan dapat diperbaharui. Bahan bakar alternatif tersebut salah satunya adalah biomassa. Potensi energi biomassa di Indonesia sebesar 50.000 MW yang bersumber dari bermacam-macam limbah biomassa pertanian (Prihandana dan Hendroko, 2007). Limbah industri kelapa sawit merupakan salah satu limbah biomassa pertanian yang terdiri dari limbah cair, limbah gas, dan limbah padat.

Limbah industri kelapa sawit di Indonesia semakin meningkat akibat semakin luas lahan perkebunan kelapa sawit dan produksi kelapa sawit di Indonesia yang semakin meningkat. Pada tahun 2021 luas perkebunan kelapa sawit sebesar 14,66 juta hektar (Direktorat Jendral Perkebunan, 2022) dan produksi kelapa sawit yang dihasilkan sebesar 46,85 juta ton. Limbah padat industri kelapa sawit yang berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki jumlah yang cukup banyak. Setiap pengolahan 1 ton Tandan Buah Segar (TBS) akan dihasilkan TKKS sebanyak 22–23% atau sebanyak 220–230 kg TKKS. Limbah ini belum dimanfaatkan secara baik oleh sebagian besar pabrik kelapa sawit (PKS) dan masyarakat di Indonesia. Sejauh ini pemanfaatan limbah padat kelapa sawit untuk menghasilkan energi baru terbatas sebagai bahan bakar padat pada ketel (boiler). Khusus untuk limbah tandan kosong kelapa sawit,

pemanfaatan sebagai bahan bakar padat boiler mempunyai konstrain/penghambat yaitu pada tingginya kandungan air (moisture) 60% dan polusi yang dihasilkan.

Limbah tandan kosong sawit sejauh ini tidak digunakan sebagai sumber energi, sehingga permasalahan yang kemudian timbul adalah melimpahnya jumlah limbah yang tertimbun pada kawasan di sekitar industri-industri pengolahan kelapa sawit tersebut (Surjosatyo dan Vidian, 2004). Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini, diantaranya adalah dengan mengirimkan kembali tumpukan limbah tersebut ke areal perkebunan dan menggunakannya sebagai mulsa dan pupuk alami. Ada pula yang kemudian membakarnya di areal terbuka tanpa mendapatkan manfaat lain yang mungkin jauh lebih berharga. Teknologi baru diperlukan untuk mengolah limbah tersebut menjadi bahan bakar yang ramah lingkungan dan menghasilkan nilai tambah yang tinggi salah satunya dengan pembuatan biopelet. Biopelet merupakan bahan bakar padat berbasis biomassa yang berbentuk tabung padat atau pelet. Proses yang digunakan adalah pengempaan dengan suhu dan tekanan tinggi, sehingga membentuk produk yang seragam (Yang et al. 2005). Bahan bakar pelet ini berdiameter antara 3-12 mm dengan panjang antara 6-25 mm. Biopelet memiliki keunggulan yaitu dapat meningkatkan nilai kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran, serta ukuran dan keseragaman biopelet dapat memudahkan proses transportasi dari satu tempat ke tempat lainnya (Bhattacharya, 1998).

Torefaksi merupakan suatu proses konversi (pengubahan) biomassa menjadi bahan bakar padat yang lebih bersih. Proses torefaksi biomassa secara perlahan diberi kalor atau dipanaskan pada temperatur 200-300<sup>0</sup>C dengan waktu tertentu (Basu, 2013). Pada saat ini alat yang digunakan untuk proses torefaksi kebanyakan masih dilakukan secara manual dan menggunakan bahan bakar kayu, sehingga untuk mendapatkan suhu yang optimum sulit terjadi. Suhu yang tidak optimum juga mempengaruhi lamanya waktu pemanasan serta hasil dari biopelet. Waktu pemanasan yang semakin lama serta suhu yang semakin meningkat memberikan pengaruh terhadap hasil torefaksi. Oleh sebab itu diperlukan untuk membuat alat torefaksi yang dapat mengontrol suhu secara otomatis agar mendapatkan suhu yang optimum saat proses torefaksi, sehingga lebih efisien dalam waktu pengerjaannya dan mendapatkan hasil torefaksi yang berkualitas.

Alat torefaksi pelet ini menggunakan tenaga tambahan yaitu kompor gas. Bahan bakar gas sendiri saat ini mudah untuk di dapatkan di berbagai daerah-daerah yang ada di Indonesia, penggunaan gas juga pada proses torefaksi lebih mudah karna panas yang dihasilkan lebih cepat, merata, dan lebih setabil dibandingkan penggunaan kayu bakar.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana desain rancang bangun alat torefaksi menggunakan kompor gas yang dapat mengontrol suhu secara otomatis, agar meningkatkan efisiensi proses torefaksi yang dilakukan dan hasil torefaksi biopelet yang didapat berkualitas?
2. Bagaimana kinerja dari alat torefaksi menggunakan kompor gas?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan umum dari penelitian ini adalah sebagai berikut membuat sistem kendali otomatis pada alat torefaksi pelet dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan kompor gas.

Tujuan khusus dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan hasil kalibrasi dan validasi sensor termocouple tipe K menggunakan arduino uno.
2. Menguji kinerja alat torefaksi pelet dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS), meliputi respon sistem, akurasi, dan stabilitas.
3. Mendapatkan hasil kadar air dan *hidrophobicity* dari pelet TKKS yang sudah di torefaksi.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari melakukan penelitian ini adalah :

1. Untuk memberikan informasi penggunaan alat torefaksi pelet dari bahan dasar tandan kosong kelapa sawit (TKKS).
2. Untuk mempermudah pengendalian suhu pada alat torefaksi pelet dari bahan dasar tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kelapa Sawit

Indonesia merupakan negara penghasil kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) terbesar di dunia, lahan perkebunan kelapa sawit di Indonesia yang mencapai 14,66 juta hektar pada tahun 2021. Produk utama yang dihasilkan dari kelapa sawit adalah minyak kasar sawit (*crude palm oil*) dan minyak inti sawit (*palm kernel oil*). Minyak kasar sawit dan minyak inti sawit banyak digunakan sebagai bahan baku industri, yaitu industri makanan, kosmetik, sabun, pelumas, bahan bakar nabati dan produk farmasi. Perkembangan sawit yang sangat cepat di Indonesia, salah satunya yang disebabkan oleh produktivitas sawit yang cukup tinggi dibandingkan tanaman lain penghasil minyak nabati (Dirjen Perkebunan, 2022).

Kelapa sawit dengan nama latin *Elaeis guineensis* merupakan tanaman tropis yang masih tergolong di dalam famili *Palmae* dan tanaman ini berasal dari Afrika Barat akan tetapi, selain di Afrika Barat, tanaman sawit dapat tumbuh diberbagai wilayah, salah satunya dapat ditanam di Indonesia. Pada saat ini tanaman kelapa sawit sudah mulai terbentuk perkebunan dan sudah ada pabrik untuk pengolahan kelapa sawit. Tanaman kelapa sawit dapat diklasifikasikan menjadi (Pahan, 2008).

Divisi : Embryophyta Siphonagama  
Kelas : Angiospermae  
Ordo : Monocotyledonae  
Famili : Arecaceae  
Subfamili : Cocoideae  
Genus : *Elaeis*  
Spesies : *E. Guineensis*



TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) adalah limbah pabrik kelapa sawit yang jumlahnya sangat melimpah. TKKS yang dihasilkan oleh 28 pabrik pengolahan kelapa sawit di provinsi Bengkulu diperkirakan tidak kurang dari 12000 ton setiap hari. Setiap pengolahan 1 ton TBS (Tandan Buah Segar) akan dihasilkan TKKS sebanyak 22 – 23 % TKKS atau sebanyak 220 – 230 kg TKKS. Jumlah yang sangat besar dan limbah ini tidak dimanfaatkan secara baik oleh sebagian besar pabrik kelapa sawit (PKS) di Indonesia (Isroi, 2008).



Gambar 1. Tandan Kosong Kelapa Sawit

TKKS dulunya hanya dibakar dan sekarang telah dilaranng karena adanya kekhawatiran pencemaran lingkungan, sehingga menimbulkan masalah dan keluhan bagi masyarakat. Salah satu usaha dalam mengatasi hal tersebut adalah dengan memanfaatkan TKKS menjadi pupuk kompos. TKKS sebagai limbah pengolahan kelapa sawit memiliki kandungan selulosa 40% dan lignin 28% serta hemiselulosa 22% (Ali dkk, 2013).

## 2.2 Biomassa

Biomassa merupakan sumber daya energi terbarukan yang berasal dari berbagai sumber, seperti dari residu/produk samping perkebunan, pertanian, maupun sisa kegiatan kehutanan dan bahan-bahan organik lain yang terdapat di alam. Dengan mengekspos biomassa dapat dikonversi ke biofuel (Abelloncleanenergy, 2009). Menurut EL Bassam dan Maegard (2004), pada umumnya biomassa yang

digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang memiliki nilai ekonomis rendah atau merupakan hasil ekstraksi dari produk primer. Sedangkan menurut Prihandana dan Hendroko (2007), Indonesia mempunyai potensi energi biomassa sebesar 50.000 MW yang bersumber dari berbagai jenis limbah biomassa pertanian, seperti : produk samping kelapa sawit, penggilingan padi, pabrik gula aren, produk samping jarak pagar, pabrik tembakau, pabrik gula, kakao, dan limbah pertanian lainnya.

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan dan tumbuh sebagai tanaman. Sumber-sumber biomassa adalah sebagai berikut (Kong, 2010):

1. Sisa-sisa hasil pertanian, seperti ampas tebu, batang dan serat jagung.
2. Sisa-sisa hutan, misalnya serbuk gergaji industri pengolahan kayu.
3. Sampah perkotaan, misalnya kertas-kertas bekas dan dedaunan kering.
4. Lumpur sisa pulp.
5. Sumber-sumber masa depan, seperti tanaman energi yang khusus ditanam.
6. Jenis tanaman lain yang tidak mengandung pati maupun gula yang dipakai untuk memproduksi bioetanol.

Biomassa merupakan salah satu potensi sumber energi terbarukan saat ini. Potensi energi biomassa yang sebesar 50,000 MW antara lain bersumber dari produk samping hasil pengolahan beberapa tanaman perkebunan dan pertanian, seperti kelapa sawit, penggilingan padi, kayu, plywood, pabrik gula, kakao, dan lain-lain. Saat ini, jumlah energi biomassa yang telah dimanfaatkan hanya sebesar 302 MW dari total potensi energi biomassa yang ada atau setara dengan 0,604%.

### **2.3 Biopelet**

Sumber energi alternatif yang saat ini banyak diteliti dan dikembangkan adalah energi biomassa yang ketersediaannya sangat melimpah, mudah diperoleh, dan dapat diperbaharui secara cepat. Salah satu pemanfaatan dari biomassa sebagai bahan bakar rumah tangga atau industri-industri adalah *biomass pelets* (Biopelet). Biopelet adalah jenis bahan bakar padat yang berbasis limbah dengan ukuran lebih kecil dari ukuran briket (Windarwati, 2011).

Biomassa *pellet* merupakan bahan bakar hijau terbarukan dan padat, dalam arti pellet adalah sumber energi karbon netral. Karbon dikonsumsi selama siklus kehidupan per pohon, dan kemudian dilepas lagi, efeknya adalah kenaikan nol tingkat karbon dioksida dalam atmosfer. Oleh karena itu hasil pembakaran biomassa *pellet* ini dapat membantu mengatasi perubahan iklim. Penanganannya dalam proses pembakaran lebih mudah dan bersih, sehingga sangat menarik digunakan.

Biopellet adalah bahan bakar biomassa berbentuk pelet yang memiliki keseragaman ukuran, bentuk, kelembapan, densitas, dan kandungan energi (Abelloncleanenergy, 2009). Pada proses pembuatan biopellet, biomassa diumpankan ke dalam *pellet mill* yang memiliki dies dengan ukuran diameter 6-8 mm dan panjang 10-12 mm (Mani et al. 2006). Fantozzi dan Buratti (2009) menyatakan bahwa terdapat 6 tahapan proses pembuatan biopellet, yaitu: perlakuan pendahuluan bahan baku (*pre-treatment*), pengeringan (*drying*), pengecilan ukuran (*size reduction*), pencetakan biopellet (*pelletization*), pendinginan (*cooling*), dan *silage*. Residu hutan, sisa penggergajian, sisa tanaman pertanian, dan *energy crops* dapat didensifikasi menjadi pelet. Proses peletisasi dapat meningkatkan kerapatan spesifik biomassa lebih dari 1000 kg/m<sup>3</sup> (Lehtikangas 2001 dan Mani et al. 2004).



Gambar 2. Biopellet

Karakteristik fisik biopellet yang sesuai dengan SNI 8021 : 2014 terdiri dari kadar air biopellet maksimum adalah 12%, kadar abu biopellet maksimum 1,5%, kadar zat terbang biopellet maksimum 80%, kadar karbon terikat biopellet minimum 14%, dan nilai kalor biopellet minimum 4000 kal/g.

## 2.4 Torefaksi

Proses pirolisis terbagi menjadi tiga jenis, yaitu ringan (torefaksi), lambat (karbonisasi), dan pirolisis cepat. Torrefaksi adalah suatu teknik dengan proses termokimia (perlakuan panas) pada bahan biomassa dengan kisaran suhu 200-300°C pada tekanan atmosfer dan laju pemanasan partikel yang rendah (<50°C/menit). Teknik pemanasan ini dilakukan tanpa adanya pengaruh oksigen yang menyebabkan sebagian volatil matter biomassa menguap dan meninggalkan fraksi karbon didalam biomassa yang tersisa. Sejumlah air telah menguap, ukuran partikel menjadi lebih kecil dan kerapatan yang semakin meningkat memberikan dampak perbaikan biomassa dari sifat awal biomassa. Proses tersebut dilakukan untuk menaikkan nilai kalor biomassa menjadi setara batubara tingkat sub-bituminous C. Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 300 - 500°C dengan hasil berbentuk arang sedangkan pirolisis cepat dilakukan pada suhu diatas 500°C dengan hasil berbentuk arang, bio-oil, gas (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, dan CO<sub>2</sub>), dan asap cair (Hardianto et al. 2011).

Pemanfaatan proses torefaksi ini akan memperbaiki sifat-sifat bahan baku dan bahan bakar dari segi nilai kalor, kadar air, grindability, sifat higroskopik dan minimalisir asap pembakaran (Wilen et al. 2013). Proses torefaksi juga dapat merubah biomassa atau bahan organik dengan melepaskan zat-zat yang terkandung dalam bahan yang mudah terbakar seperti CO, methana dan yang tidak terbakar seperti karbondioksida dan tar cair. Gas-gas yang terbang pada proses ini mempunyai nilai energi yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan kalor pada saat proses torefaksi (Koppejan et al. 2012).

Beberapa faktor yang mempengaruhi pada proses torefaksi antara lain : waktu, perlakuan panas dan jenis biomasanya. Waktu pemanasan yang semakin lama serta suhu yang semakin meningkat memberikan pengaruh terhadap hasil

torefaksi, begitu juga dengan jenis biomassa mempengaruhi kualitas hasil biomassa torefaksi. Selama proses torefaksi, kadar air akan terlepas dan terjadi proses devolatilisasi terbatas. Dengan proses ini massa akan berubah menjadi 70% dari massa awal, kandungan energinya menjadi 90%, dan kadar air 1-2%. Sehingga secara keseluruhan akan meningkatkan nilai kalor per unit massa (Wilén et al. 2013).

Reaksi pada proses torefaksi merupakan reaksi eksoterm, yaitu jumlah panas yang dikeluarkan lebih besar dari pada yang diperlukan. Menurut Sadaka dan Negi (2009) suhu torefaksi yang semakin meningkat diikuti waktu torefaksi yang semakin lama mampu memberikan perbaikan kadar air bahan dengan peningkatan fungsi dalam membuang air pada biomassa sehingga menyebabkan peningkatan daya tahan biomassa. Selain itu, beberapa kandungan/senyawa yang berpotensi memberikan pengaruh terhadap nilai kualitas biomassa mampu diminimalisir dengan penguapan kandungan dan senyawa tersebut saat proses torefaksi berlangsung

Menurut Wilén et al (2013) proses torefaksi dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu :

1. Pemanasan awal, yaitu biomassa dipanaskan sampai tahapan pengeringan tercapai, dimana air yang berada pada bagian luar biomassa mengalami penguapan.
2. Pengeringan, yaitu :
  - a. Pada temperature biomassa mendekati pengeringan awal (*pre-drying*), yaitu 100<sup>0</sup>C, air yang dikandung oleh biomassa akan mulai menguap.
  - b. Pada temperatur biomassa mendekati pengeringan akhir (*post-drying*, yaitu 200<sup>0</sup>C, kandungan air pada bagian dalam biomassa akan menguap akibat perpindahan kalor pada partikel biomassa tersebut.
3. Torefaksi, yaitu tahapan yang merupakan inti dari keseluruhan proses torefaksi. Proses torefaksi akan dimulai pada saat temperatur mencapai suhu 200<sup>0</sup>C, dan didefinisikan sebagai temperatur konstan maksimum. Disini material biomassa akan mengalami pengurangan berat.
4. Pendinginan, biomassa yang telah mencapai temperatur torefaksi, akan didinginkan menuju temperatur akhir, yaitu temperatur kamar.

Mekanisme dari torefaksi didasarkan kepada reaksi dari 3 komponen utama biomassa, yaitu hemiselulosa, selulosa dan lignin. Jika temperatur biomassa mencapai 200<sup>0</sup>C, maka hemiselulosa akan mengalami devolatisasi secara terbatas dan pengarbonan (biomassa mulai berwarna kecoklatan). Jika devolatisasi dilanjutkan pada temperatur 250<sup>0</sup>C sampai dengan 260<sup>0</sup>C , maka lignin dan selulosa sedikit mengalami dekomposisi yang tidak menyebabkan kehilangan berat biomassa secara signifikan.

Perbedaan reaksi pada hemiselulosa, selulosa dan lignin yang menghasilkan 2 (dua) daerah torefaksi, yaitu (Jupar, 2013):

5. Torefaksi ringan dengan temperatur dibawah 240<sup>0</sup>C dan ditandai oleh dekomposisi yang signifikan dari hemiselulosaa.
6. Torefaksi berat yang terjadi diatas temperatur 270<sup>0</sup>C yang ditandai dengan dekomposisi dari selulosa dan lignin.

## **2.5 Arduino Uno**

Arduino merupakan suatu rangkaian elektronik yang bersifat terbuka, serta memiliki perangkat keras dan lunak yang mudah untuk digunakan. Arduino dapat mengenali lingkungan sekitarnya melalui berbagai jenis sensor dan dapat mengendalikan lampu, motor, dan berbagai jenis aktuator lainnya (Gambar 3).

Arduino mempunyai banyak jenis, di antaranya adalah *ArdoinoNano*, *ArduinoUno*, *ArduinoBT*, *LilyPadArduino*, *ArduinoDuemilanove*, dan lainnya.

Arduino Uno merupakan sebuah paket berupa papan elektronik yang mengandung mikrokontroler Atmega328 dan dilengkapi dengan *oscillator* 16 MHz dan regulator 5 volt. *ArduinoUno* memiliki 13 pin untuk isyarat digital dan 6 pin untuk isyarat analog (Kadir, 2012).



Gambar 3. *Arduino Uno*

## 2.6 Motor Servo

Motor Servo merupakan motor yang mampu bekerja dua arah, searah jarum jam dan berlawanan jarum jam (Gambar 4). Arah dan sudut pergerakan rotor motor DC servo dapat dikendalikan dengan memberikan suatu pengaturan siklus sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) pada bagian pin kontrolnya (Sigit, 2007)



Gambar 4. Motor Servo

## 2.7 Sistem Kontrol

Sistem pengaturan atau pengontrolan saat ini banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari seperti remote (televisi, AC, dan CD), pendeteksi warna, jam digital, sistem pengamanan, pengendali suhu atau temperatur dan lainnya. Dimana sistem pengaturan atau pengontrol ini memerlukan alat untuk mengatur sistem tersebut seperti microcontroller. Microcontroller merupakan suatu rangkaian IC yang

dapat diprogram dan disesuaikan dengan berbagai rangkaian sistem elektronik yang diinginkan. Untuk itu dalam penulisan ini sensor suhu termokopel tipe K berbasis *ArduinoUno* dimanfaatkan untuk mengontrol temperatur pada kematangan pelet dari bahan baku tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

Tabel 1. Rujukan Penelitian

No	Penulis	Judul	Keterangan
1	Anton, 2015	Proses torefaksi tandan kosong kelapa sawit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air	Percobaan Torefaksi TKKS untuk pengamatan kandungan hemiselulosa dan kemampuan menyerap air telah dilakukan. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan torefaksi semakin tinggi nilai kalor TKKS yang dihasilkan dengan kehilangan massa lebih besar. Kondisi terbaik diitunjukkan pada temperatur 300°C waktu torefaksi 30 menit. Pada kondisi tersebut didapatkan nilai kalor sebesar 4660 kkal/kg serta jumlah massa yang hilang sekitar 32%, kandungan hemiselulosa 7,64% dan sifat hidrofobik TKKS dilihat dari jumlah air yang terserap.
2	Monika, 2016	Torefaksi batang sawit : pengaruh konsisi proses terhadap nilai kalor produk torefaksi	Batang sawit dapat dijadikan sebagai bahan baku untuk proses torefaksi. Suhu torefaksi, waktu torefaksi dan laju alir gas masing-masing memberikan pengaruh terhadap perubahan respon nilai kalor dan analisa proksimat berupa kadar air, kadar abu,



			kadar zat volatil dan kadar karbon terikat. nilai kalor yang didapat pada penelitian ini adalah 17.908,62-21.800,88 kJ/kg.
3	Irma, 2017	Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Arang Hayati Dan Asap Cair	Proses pirolisis TKKS sebanyak 6 kg menghasilkan 1,9 kg arang hayati dan 3,6 l asap cair. Arang hayati TKKS memiliki kadar makronutrien : C 60%; N 1,07%; P 1,29%; K 13,37%; Mg 1,02%; Ca 1,71% dan mikronutrien Fe 0,95%; B 31 ppm dan Zn 248 ppm, dengan pH 9. Asap cair yang dihasilkan memiliki pH 3,5 dan dapat dihilangkan kandungan tar-nya dengan pengendapan semalam. Kandungan asap cair ini hasil analisis GC-MS adalah karbonil 2,984 %; turunan fenol 13,169 %; dan asam organik 74,268 %.
4	Rina, 2017	Pembuatan Bahan Bakar Padat Dari Pelelah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Pada Variasi Suhu Waktu Torefaksi	Pelelah sawit sebagai limbah hasil perkebunan sawit dengan nilai kalor 15439.39 kJ/kg dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat melalui proses torefaksi. Peningkatan suhu dan waktu torefaksi berpengaruh terhadap meningkatnya nilai kalor bahan bakar padat yang dihasilkan. Nilai kalor produk torefaksi dari penelitian ini adalah 18152,26 – 24064,32 kJ/kg. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada

			suhu 300 °C dan waktu torefaksi 40 menit.
5	Susilowati, 2017	Bahan Bakar Padat Dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu Dan Ukuran Bahan Baku	Pelepah sawit sebagai limbah hasil perkebunan sawit dengan nilai kalor 16385,49 kJ/kg dapat dimanfaatkan sebagai solid fuel melalui proses torefaksi. Nilai kalor tertinggi didapatkan pada suhu torefaksi 300°C dengan diameter pelepah 15 mm. Sedangkan mass yield dan energy yield tertinggi didapatkan pada suhu 250°C dan diameter pelepah 15 mm.
6	Zainal, 2017	Pembuatan Arang Cangkang Kelapa Sawit dengan Proses Torefaksi	Pada proses pengarangan cangkang kelapa sawit, dimana arang cangkang kelapa sawit berhenti mengeluarkan asap pada suhu 348°C dan waktu pengarangan adalah 105 menit, dinyatakan proses pengarangan telah selesai dan mengikuti proses torefaksi, dimana rendemen pengarangan rata-rata adalah 38,20 %.
7	Komang, 2019	Proses Torefaksi Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Cangkang Sawit dengan Metode COMB	Torefaksi cangkang sawit dengan menggunakan metode COMB: Counter Flow Multi-Buffle pada suhu 250 °C dan flowrate 4 cm <sup>3</sup> /menit meningkatkan nilai kalor sebesar 824,43 cal/g dengan nilai sebelum dan setelah torefaksi sebesar 4018,78 cal/g dan 4843,21 cal/g.
8	Muhammad, 2019	Bahan Bakar Padat Dari Tandan Kosong Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Dengan Variasi Suhu Dan Waktu Torefaksi	Tandan kosong sawit (TKS) sebagai limbah hasil pengolahan sawit dengan nilai kalor 16338,62 kJ/kg dapat dimanfaatkan sebagai solid

---

			fuel melalui proses torefaksi, Nilai kalor yang didapat dipenelitian ini adalah 19883,03-23165,96 kJ/kg, mass yield yang didapatkan 35,95-59,91%, dan energy yield yang didapatkan 50,97-72,91%, Analisa proksimat yang dilakukan meliputi kadar air, kadar abu, kadar zat volatil, dan kadar fixed carbon.
9	Suganal, 2019	Bahan bakar <i>co-firing</i> dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (skala laboratorium)	Briket batubara–biomassa tertorefaksi pada komposisi batubara sebanyak 70 %, batang singkong tertorefaksi 25 % dan tepung tapioka sebanyak 5 % tepat untuk bahan bakar sistem <i>co-firing</i> pada industri terutama PLTU termasuk kelayakan fisik untuk penanganan material dan emisi debu, berdasarkan nilai kalor dan kadar abu serta sifat fisik berupa kuat tekan memberikan nilai kalor 6.093 kkal/kg, adb, abu kurang dari 12,8 %, kuat tekan mencapai 15,7 kg/cm <sup>2</sup> .
10	Tri Rubianti, 2019	Karakteristik pelet kayu karet ( <i>Hevea brasiliensis</i> ) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor <i>Counter-Flow Baffle</i> (COMB)	Torefaksi menggunakan reaktor COMB merubah warna pelet kayu karet menjadi pelet hitam (black pellet). Kadar air pelet menurun dari 12,25% menjadi 3,54% setelah torefaksi. Pelet yang ditorefaksi lebih tahan terhadap air, sehingga akan sangat menguntungkan ketika pelet disimpan pada kondisi lembab. Torefaksi juga menyebabkan

---

---

penurunan kerapatan pelet, penurunan kandungan selulosa dan hemiselulosa, peningkatan kandungan lignin, serta peningkatan nilai kalor antara 1,71–18,32% seiring dengan peningkatan suhu torefaksi. Torefaksi dengan reaktor COMB dapat meningkatkan kualitas pelet kayu karet untuk meningkatkan nilai tambah produk.

---

### **III. METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat**

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari 2021 sampai Oktober 2021 di Laboratorium Daya Alat dan Mesin Pertanian Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

#### **3.2 Alat dan Bahan**

Alat yang digunakan pada penelitian ini kompor gas yang telah dimodifikasi, servo, dinamo, tang, gunting, multimeter, dan thermocouple thermometers HTI HT-9815. Sedangkan bahan yang digunakan yaitu seperangkat komponen elektronik berupa mikrokontroler arduino uno, lcd I2C, aki 12 volt dc, termokopel tipe K, relay, kabel jumper, dan pelet tandan kosong kelapa sawit.

#### **3.3 Kriteria Desain**

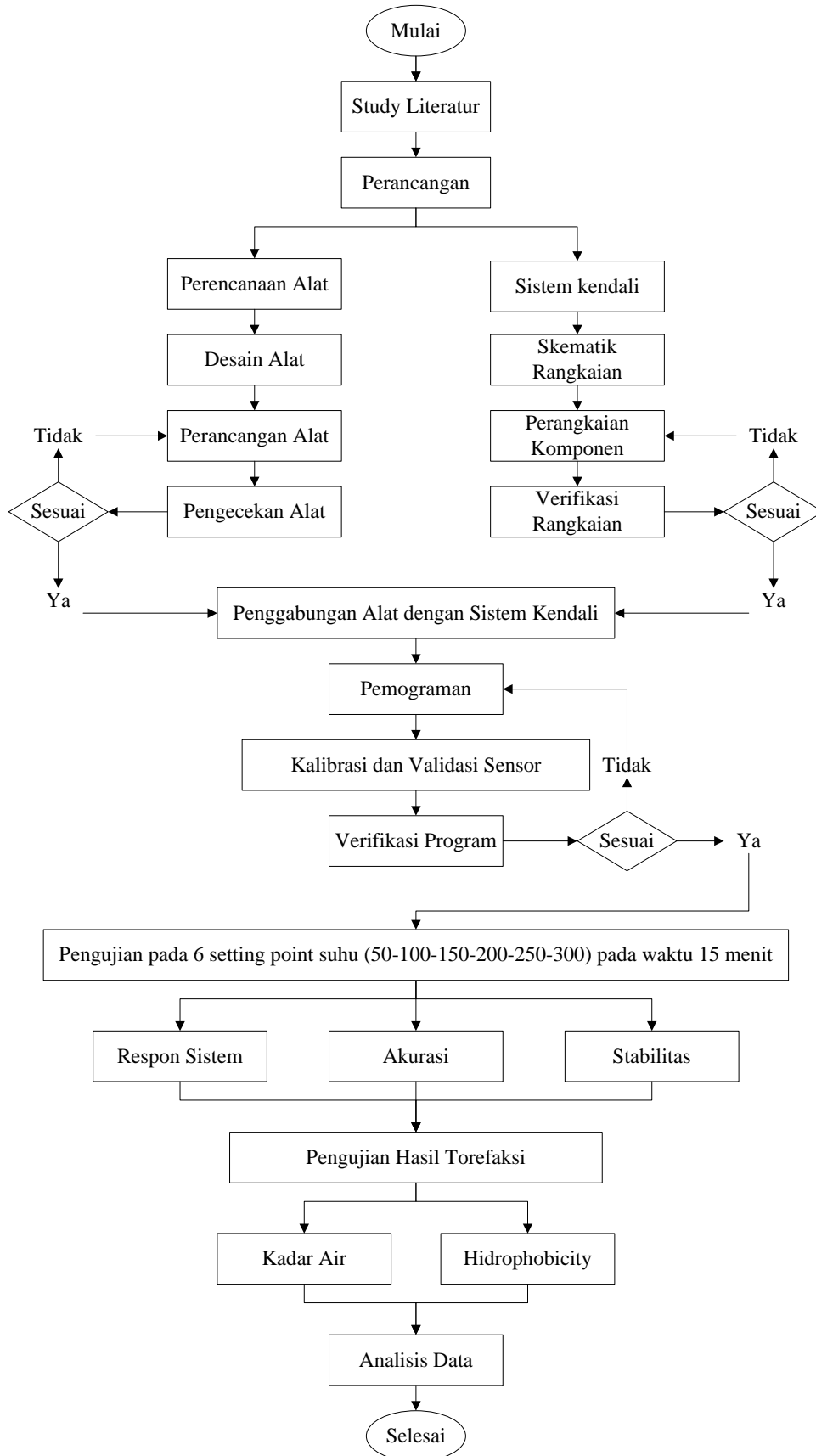
1. Alat torefaksi ini dirancang untuk dapat bekerja secara otomatis dalam proses pengendalian suhu saat proses torefaksi berlangsung.
2. Alat ini memiliki bentuk tabung selinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 16 cm. Proses pemanasan menggunakan kompor gas sebagai alat bantu saat proses torefaksi.
3. Alat ini memiliki kapasitas 2 kg per jam. Diharapkan juga alat mampu mencapai suhu 300<sup>0</sup>C untuk proses torefaksi.
4. Pada kompor gas dilengkapi satu buah servo sebagai pengatur suhu/api. Untuk menggerakkan silinder terintegrasi dengan dinamo dc 12 volt. Seluruh proses kendali otomatis diatur oleh mikrokontroler arduino uno.

5. Proses kendali suhu diharapkan stabil dalam rentang waktu 10 menit.
6. Respon pergerakan servo dan dinamo diharapkan tidak melebihi 5 detik.

### **3.4 Prosedur Penelitian**

Penelitian ini merupakan penelitian yang merancang sistem pengendali suhu pada proses torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit menggunakan kompor gas.

Pembuatan sistem pengendali dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu studi literature, pembuatan alat dan sistem kendali, pemograman, pengujian dan analisis data. Prosedur penelitian ini ditunjukkan oleh diagram alir (Gambar 5).



Gambar 5. Diagram Alir Prosedur Penelitian

### **3.4.1 Studi Literatur**

Tahapan pertama dalam penelitian ini yaitu melakukan studi pustaka tentang alat dan proses torefaksi yang berasal dari artikel ilmiah ( Journal dan Prosiding Seminar). Informasi yang dicari dalam proses ini meliputi proses torefaksi, suhu torefaksi dan hasil akhir dari proses torefaksi. Informasi lain yang dibutuhkan adalah bahasa pemograman arduino yang digunakan untuk sistem kendali suhu.

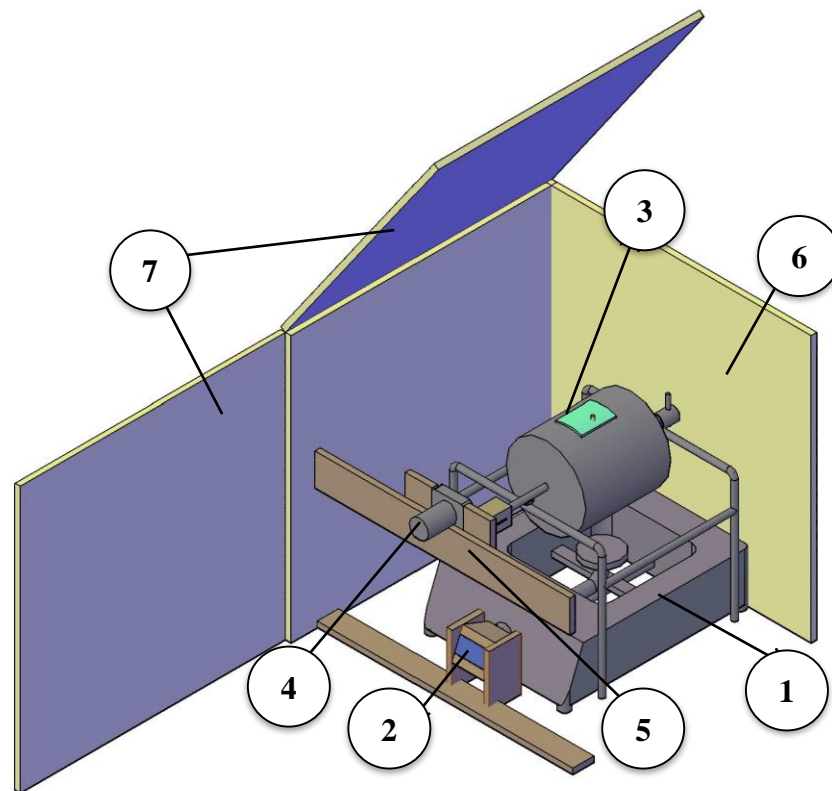
### **3.4.2 Perancangan**

Tahapan perancangan terdapat rancangan struktural dan rancangan fungsional. Rancangan struktural terbagi menjadi dua bagian yaitu perancangan alat dan perancangan sistem kendali.

#### **3.4.2.1 Rancangan Struktural**

Kegiatan perancangan struktural ini terbagi menjadi dua yaitu rancang bangun alat dan perancangan sistem kendali. Rancang bangun alat terdiri dari desain alat, perangkaian alat, dan pengecekan alat. Untuk perancangan sistem kendali terdiri dari skematik rangkaian, perangkaian komponen, dan verifikasi rangkaian. Pada tahapan desain alat melakukan proses mendesain alat menggunakan autocad 2007. Tampilan desain rancangan ditunjukkan oleh Gambar 6.





Gambar 6. Desain Alat Torefaksi

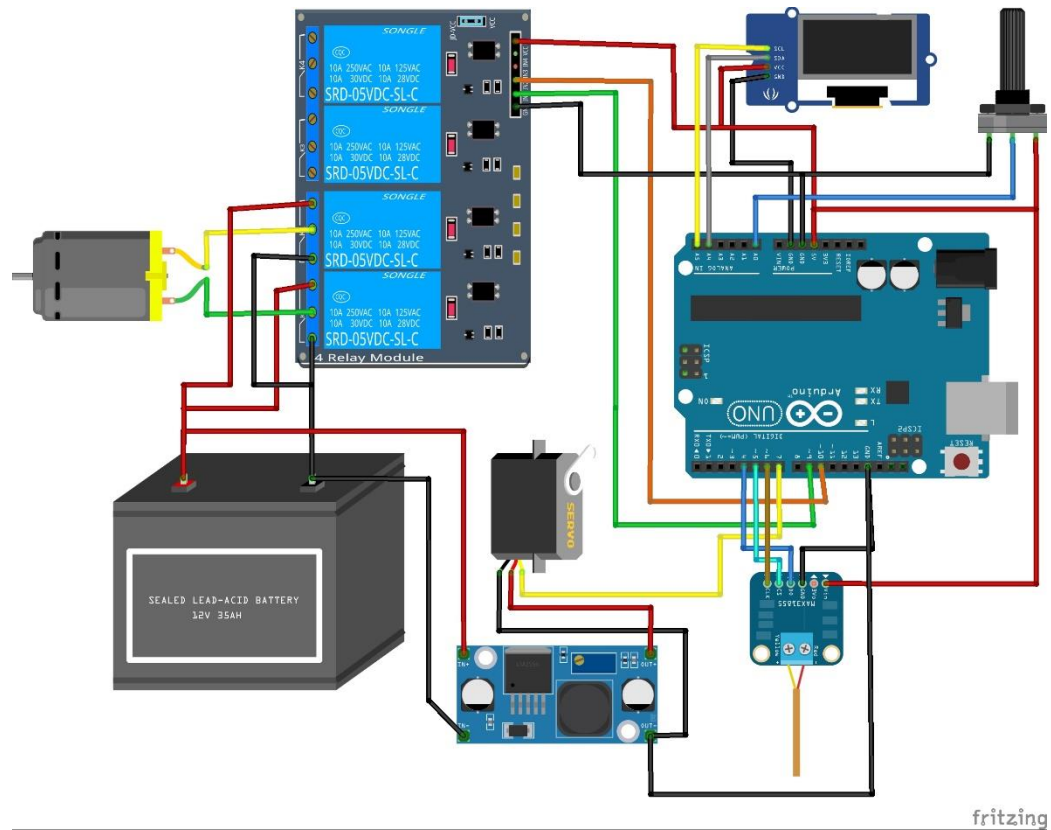
Keterangan :

- |                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| 1. Kompor Gas       | 5. Penyangga Dinamo       |
| 2. Servo            | 6. Kotak Alat Torefaksi   |
| 3. Tabung Torefaksi | 7. Penutup Alat Torefaksi |
| 4. Dinamo           |                           |

Alat ini memiliki bentuk tabung selinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 16 cm. Proses pemanasan menggunakan kompor gas sebagai bahan bakar utama. Pada kompor gas dilengkapi satu buah servo untuk mengatur besar kecilnya api yang keluar. Kerangka alat ini terbuat dari besi, sedangkan untuk pembuatan tabung menggunakan bahan plat besi.

Apabila proses desain telah selesai dilakukan perakitan bahan menjadi alat utuh (melakukan implementasi desain rangkaian). Selanjutnya dilakukan proses perancangan sistem kendali. Tahapan pertama yang dilakukan membuat skematik

rangkaian sistem kendali. Pembuatan skematik ini bertujuan untuk mempermudah proses perangkaian komponen di tahapan selanjutnya. Skematik rangkaian sistem kendali dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Skematik Rangkaian Sistem Kendali

Tahapan terakhir dari proses perancangan yaitu dengan melakukan verifikasi alat dan verifikasi rangkaian. Proses verifikasi memiliki tujuan untuk mengurangi kesalahan atau kegagalan alat dan sistem kendali. Hal selanjutnya yang dilakukan adalah menggabungkan alat dengan sistem kendali menjadi satu kesatuan yang utuh.

### 3.4.2.2 Rancangan Fungsional

Pada perancangan ini dibuat sistem kendali yang berfungsi mengendalikan suhu pada saat proses torefaksi. Semua proses diatur dan terintegrasi dengan mikrokontroler. Sistem ini terdiri atas beberapa komponen dengan fungsinya

masing masing yaitu mikrokontroller arduino, Liquid crystal display, relay, motor servo, Termokopel tipe K, dan motor Dinamo. Secara rinci dijabarkan sebagai berikut :

a. Mikrokontroller

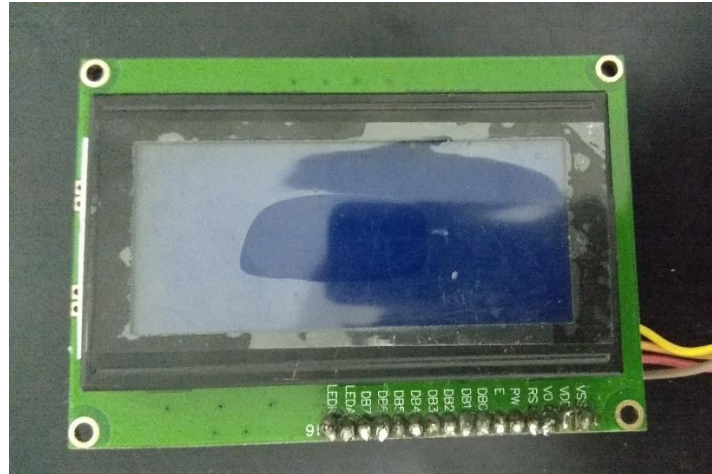
Mikrokontroller dalam rangkaian berfungsi sebagai pusat kendali sistem. Komponen ini menerima data berupa kode sinyal yang dikirimkan melalui jaringan nirkabel. Sinyal tersebut kemudian diolah untuk memberikan output perintah pada komponen lainnya, menggerakkan aktuator, dan menampilkan atau menyimpan data ( Prasetyo, 2017 ). Pada penelitian ini menggunakan mikrokontroller *arduino uno* R3. Bentuk mikrokontroller ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. *Arduino Uno*

b. *Liquid Crystal Display*

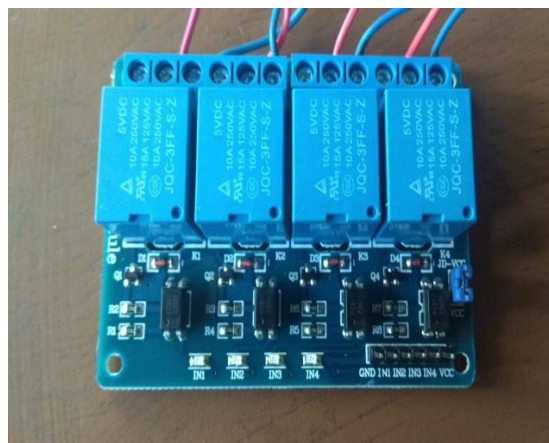
Komponen ini berfungsi untuk menampilkan semua informasi yang dibutuhkan contohnya waktu, dan kapasitas air (Prasetyo,2017). Pada alat ini LCD digunakan untuk menampilkan besar kecilnya suhu pada alat torefaksi. Wujud LCD ditunjukkan oleh Gambar 9.



Gambar 9. *Liquid Crystal Display*

c. *Relay 4 channel*

Relay adalah suatu komponen yang difungsikan sebagai penyambung atau pemutus arus listrik yang mengalir. Proses memutuskan atau menyambungkan arus listrik diatur oleh mikrokontroler ( Prasetyo, 2017 ). Modul relay yang digunakan berjenis relay 4 channel seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. *Relay 4 channel*

d. *Motor servo*

Motor servo memiliki komponen penyusun berupa motor DC yang dilengkapi oleh rangkaian control, potensiometer, dan gear penghubung. Penentu batas sudut putar servo adalah potensiometer. Motor servo mampu berputar sampai sudut

180 derajat. Pada penelitian ini menggunakan servo SPT70HV-180. Servo ini bergerak pada tegangan DC sebesar 6,0-8,4 volt DC dan memiliki kecepatan pengoperasian 0,20 detik/60<sup>0</sup> pada tegangan 6 volt, sedangkan pada tegangan 8.4 volt memiliki kecepatan 0,16/60<sup>0</sup>. Daya angkat beban motor servo ini sampai 70kg/cm.



Gambar 11. Motor Servo

e. Dinamo DC

Dinamo DC merupakan salah satu jenis motor listrik yang membutuhkan suplai tegangan arus searah (DC). Arus ini diarahkan menuju kumparan medan magnet agar dapat diubah menjadi energi mekanik. Motor DC ini terdiri atas magnet permanen berjumlah dua buah yang dilengkapi dengan lilitan jangkar. Pada bagian luar lilitan jangkar diletakan dua port untuk sambungan daya listrik. Pada penelitian ini Dinamo berfungsi sebagai aktuator yang menggerakkan tuas transmisi. Tampilan Dinamo DC 12 volt ditunjukkan oleh Gambar 12.



Gambar 12. Dinamo DC 12 volt

f. Aki 12 volt

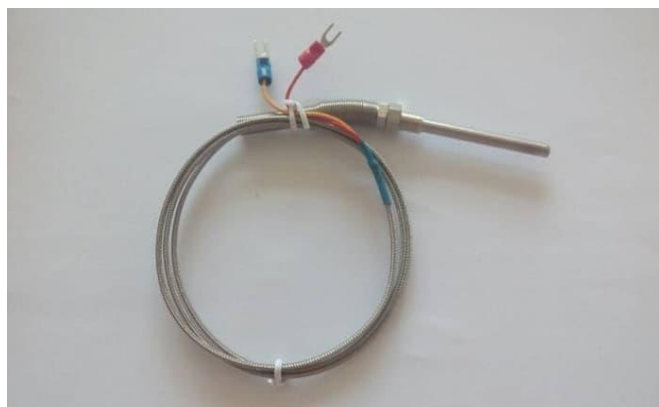
Aki berfungsi sebagai sumber energi dari dinamo dan motor servo. Pada sebuah Aki terjadi suatu proses perubahan energi kimia menjadi energi listrik. Sebuah aki terdapat dua buah kutub yaitu kutub positif ( menggunakan lempeng oksida) dan kutub negatif ( menggunakan lempeng timbale dan larutan elektrolit asam sulfat) ( Nugraha,2019). Tampilan aki ini ditunjukkan oleh Gambar 13.



Gambar 13. Aki 12 volt

g. Termokopel tipe K

Termokopel merupakan sensor temperatur yang mengubah perbedaan temperatur menjadi perubahan tegangan, hal ini disebabkan oleh perbedaan kerapatan yang dimiliki oleh masing-masing logam yang bergantung pada massa jenis logam. Jika dua buah logam disatukan kedua ujungnya kemudian dipanaskan maka elektron yang mempunyai kerapatan yang tinggi akan bergerak ke arah logam yang mempunyai kerapatan yang lebih rendah. Dengan demikian terjadilah perbedaan tegangan antara kedua ujung termokopel. Tampilan termokopel ditunjukkan oleh Gambar 14.



Gambar 14. Termokopel

### 3.5 Kalibrasi dan Validasi Sensor

Pada tahapan kalibrasi bertujuan untuk penentuan nilai yang dikeluarkan oleh alat dengan cara membandingkan dengan nilai keluaran dari alat ukur standar dan tersertifikasi. Pada alat ini akan dilakukan kalibrasi pada sensor termokopel tipe K dengan aktuator alat ukur suhu yaitu termometer termokopel.

Kalibrasi dilakukan dengan cara membandingkan kerja sensor dengan kalibrator secara bersamaan pada keadaan yang berbeda dan dikontrol. Selanjutnya nilai yang ditunjukkan oleh sensor dan kalibrator saat pengukuran dimasukkan dalam tabel dalam *microsoft excel* dan dibuat dalam grafik regresi untuk mendapat rumus nilai X. Persamaan yang didapat dari grafik seperti pada persamaan (1) (Baene,2020)

$$F(x) = ax \pm b \dots\dots\dots(1)$$

Nilai X yang didapat dari grafik regresi lalu dimasukkan kedalam program sensor pada *software Arduino IDE* yang selanjutnya diupload ke *microcontroller arduino uno R3* dengan nilai seperti persamaan (2) (Baene,2020)

$$X = \frac{y \pm b}{a} \dots\dots\dots(2)$$

Nilai sensor yang telah dimasukkan persamaan (2) selanjutnya dibandingkan kembali dengan validator dan dilihat nilainya untuk mendapat nilai *Root Square Mean Square Error (RMSE)* dari sensor yang digunakan.

Berikut persamaan RMSE yang digunakan (Baene,2020):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \dots\dots\dots(3)$$

$$RRMSE = \frac{[n^{-1} \sum_{i=1}^n (x-y)^2]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum y} \dots\dots\dots(4)$$

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

### 3.6 Uji Kinerja

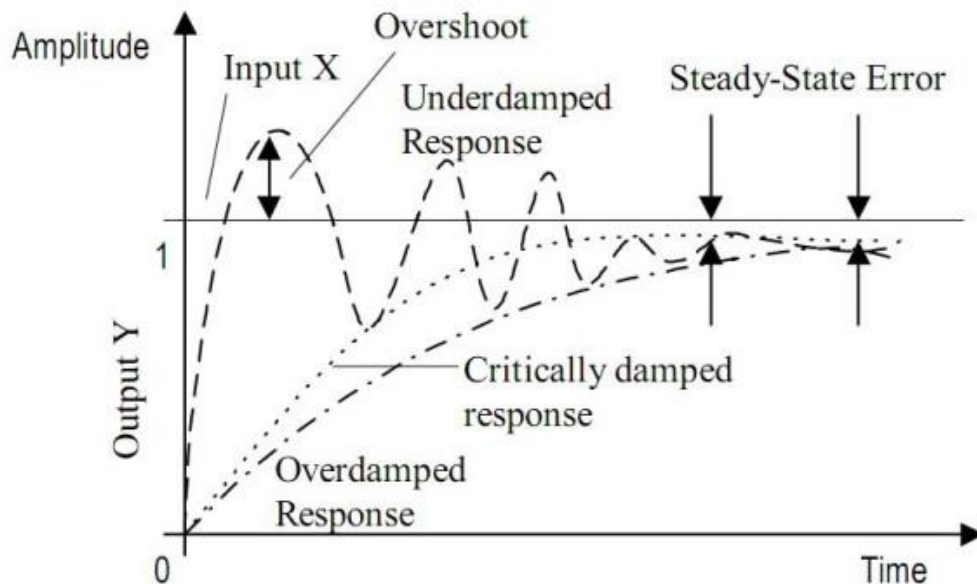
Setelah menyelesaikan proses perencanaan dan perancangan sistem kendali, tahapan berikutnya dilakukan pengujian sistem. Pengujian yang dilakukan berupa analisis kinerja aktuator dan kehandalan dari sistem kendali. Beberapa parameter yang dilakukan pengujian yaitu respon sistem, stabilitas, dan akurasi. Pengujian ini dilakukan pada empat setting point suhu (50-100-150-200-250-300) selama 15 menit.

#### 3.6.1 Respon Sistem

Respon sistem memperlihatkan kecepatan kinerja suatu sistem terhadap ada atau tidaknya gangguan dan waktu. Terdapat dua jenis respon sistem berdasarkan jenis



domain yang digunakan yaitu domain waktu (*time response*) dan domain frekuensi (*frequency response*). Penelitian ini menggunakan domain waktu yang merupakan karakteristik respon yang spesifikasi performansinya berdasarkan pada pengamatan bentuk respon terhadap perubahan waktu. Terdapat dua jenis respon sistem, yaitu respon *transient* dan respon *steady state*. Respon *transient* berfungsi untuk mengukur waktu pada saat sistem pertama kali digunakan (pada titik 0) hingga mencapai kondisi tetap. Respon *steady state* berfungsi untuk mengukur waktu saat sistem sudah berada dalam kondisi stabil hingga waktu tidak terhingga. Grafik mengenai respon sistem ditunjukkan oleh Gambar 15.



Gambar 15. Sinyal Respon Transien Dan *Steady State*

([www.mitra.edukasiku.com/2019/12/karakteristik-alat-ukur-dinamis.](http://www.mitra.edukasiku.com/2019/12/karakteristik-alat-ukur-dinamis.))

### 3.6.2 Stabilitas

Stabilitas merupakan daya tahan alat atau sistem yang digunakan untuk menghasilkan kinerja yang tetap atau tidak. Stabilitas adalah hal penting yang dilakukan untuk mengetahui suatu kemampuan kinerja alat yang tetap dalam jangka waktu yang lama. Ketidakstabilan pada sistem kendali akan mempengaruhi kinerja dalam mengatur suhu pada kompor. Jika pembacaan sensor termokopel menyimpang maka pengaturan suhu akan tidak efektif.

### 3.6.3 Akurasi

Nilai akurasi menunjukkan ketepatan kinerja suatu alat ketika mencapai suatu *settingpoint* atau batasan yang telah ditentukan. Akurasi dari tingkat kesesuaian suhu antara sensor dengan alat pengukur suhu. Akurasi dalam pernyataan ini dinyatakan dalam perbandingan antara suhu yang terbaca di sensor dengan suhu yang terbaca dengan alat ukur suhu. Secara umum dinyatakan dengan persamaan matematis sebagai berikut (Telaumbanua,2015):

$$\text{Akurasi} = \left( \frac{1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (SP - Na1)}{n} \right)}{SP} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

SP = Nilai setting point

Na1 = Nilai Aktual ke-i

n = Jumlah data

## 3.7 Pengujian Hasil Torefaksi

### 3.7.1 Kadar Air

Kadar air sangat berperan penting dalam mempengaruhi produksi gas sintesis pada saat proses pembakaran. Analisis kadar air dilakukan dengan mengambil 1 bahan sampel tanpa cawan dan diletakkan dalam cawan porselen dengan bobot yang sudah diketahui. Dikeringkan dalam oven dengan suhu 105<sup>0</sup>C selama 24 jam sampai kadar air konstan. Tahap terakhir didinginkan ke dalam desikator sampai suhu stabil dan timbang, kadar air dihitung (Nita,2019):

$$\text{Kadar Air} = \frac{Ba - Bf}{Ba} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

Ba = Berat bahan tanpa cawan sebelum dioven

Bf = Berat bahan tanpa cawan setelah dioven

### ***3.7.2 Hidrophobicity***

*Hidrophobicity* diukur dengan merendam pelet tandan kosong kelapa sawit ke dalam air dan kemudian diamati menggunakan lama waktu yang diperlukan, sehingga pelet dapat menyerap air secara sempurna dengan memperhatikan perubahan warna air dan perubahan bentuk pelet TKKS yang berada pada kondisi ekstrem (di dalam air).

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Telah dihasilkan sebuah sistem kendali suhu pada kompor gas untuk proses torefaksi berbasis microcontroller. Sistem yang dihasilkan pada alat ini telah memenuhi kriteria desain yaitu sistem dapat mengontrol besar kecilnya suhu pada kompor gas melalui aktuator berupa servo untuk menggerakkan tuas gas sehingga dapat mengontrol besaran api yang dihasilkan.
2. Hasil proses torefaksi yang didapatkan dari pengujian kadar air yang telah dilakukan menunjukkan bahwa suhu diatas 150 °C menghasilkan kadar air yang rendah yaitu sebesar 1-2%. Kemudian hasil pada pengujian hidrophobicity sampel dengan suhu diatas 200 °C dalam proses perendaman selama 24 jam tidak mengalami perubahan bentuk fisik.
3. Hasil kalibrasi tahap pertama mendapatkan nilai koefisien determinasi  $R^2=0,9297$  dan kalibrasi tahap ke dua didapatkan 0,9297. Hasil dari validasi tahap pertama didapatkan nilai koefisien determinasi  $R^2=0,9475$ , nilai RMSE 3,31 dan nilai RRMSE 2%, pada validasi tahap ke dua nilai koefisien determinasi  $R^2= 0,9607$ , nilai RMSE 4,34 dan nilai RRMSE 2%. Hasil pengujian kinerja alat sistem kendali suhu menunjukkan bahwa respon sistem pengendalian suhu dalam waktu  $\pm 30$  menit dapat mencapai suhu 300°C. Kekurasi pengendalian suhu 92,12% dan stabilitas alat menghasilkan kinerja yang baik pada *setting point* 50°C dan 100°C.

## **5.2 Saran**

Tabung torefaksi yang digunakan sebaiknya dilakukan beberapa modifikasi dibagian penutup agar lebih mudah saat memasukkan dan mengeluarkan bahan, selanjutnya dibagian penghubung dinamo dan peletakan sensor agar memudahkan saat penggunaan alat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abelloncleanenergy. 2009. *Cofiring with biopellets: An efficient way to reduce greenhouse greenhouse gas emissions*.
- Anton, I. 2015. *Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Kandungan Hemiselulosa dan Uji Kemampuan Penyerapan Air*. Reaktor, 15(3): 190-195.
- Ali, N., N.M. Tabi, F.A. Zakil, W.N.F.M. Fauzai, O. Hassan. 2013. *Yield Peformance And Biological Efficiency Of Empty Fruit Bunch (EFB) And Palm Pressed Fibre (PPF) As Substrates For The Cultivation Of Pleurotus ostreatus*. Faculty of Chemical Engineering. University Teknologi Malaysia. Malaysia; 64(1): 93-99.
- Baene, EK. 2020. *Rancang Bangun Sistem Kendali Pintu Air Irigasi Otomatis Dengan Integrasi Panel Surya Berbasis Microcontroller Dan Internet Of Things (IoT)*. (Skripsi) UNILA: Lampung.
- Basu, P. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (2nd ed). New York: Elsevier Inc.
- Bhattacharya SC. 1998. *Appropriate Biomass Energy Technologies: Issues and Problems. Invited Paper for Seminar on Renewable Energy Sources for Rural Areas*, Nadi, Fiji, 20-25 July, 1998.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2022. *Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2020-2022 Kelapa Sawit*. Kementerian Republik Indonesia.
- El Bassam N, Maegaard P. 2004. *Integrated renewable energy on rural communities. Planning guidelines, technologies and applications*. Elsevier. Amsterdam.
- Fantozzi S, and Buratti C. 2009. *Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant*. *Biomass Energy* 34 (2010): 1796-1804.
- Hardianto T, Suwono A, Pasek AD, Amrul. 2011. *Balance energi pada proses torefaksi sampah kota menjadi bahan bakar padat ramah lingkungan setara batubara untuk memperhitungkan tingkat kelayakan*. Di dalam: Surya YI, Wahyudi S, Pratikto, Wardhana, Murdani A, Prawara B, editor. *Optimalisasi Peran Teknik Mesin dalam Meningkatkan Ketahanan Energi*

- dan Seminar Nasional Teknik Mesin X; 2011 Nov 2-3; Malang, Indonesia. Malang (ID): Universitas Brawijaya. Hlm 1553-1557.
- Irma., K, Soekarno M.,P, Asmini, B, dan TW, Darmono. 2017. *Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Arang Hayati dan Asap Cair*. Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia: Bogor.
- Isroi. 2008. *Kompos*. Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Bogor.
- Jupar P T, A, 2013, *Analisa Pengaruh Metode Torefaksi Terhadap Kenaikan Nilai Kalor Biobriket Campuran 75 % Kulit Mete Dan Sekam Padi 25 % Dengan Persentase Berat*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Kadir, A. 2013. *Buku Pintar Programmer Pemula PHP*. Mediakom. Yogyakarta
- Kadir, Abdul, 2012. *Panduan Praktis Mempelajari Mikrokontroler dan Pemogramannya Menggunakan Arduino*. Jakarta
- Komang, G. 2019. Proses Torefaksi untuk Meningkatkan Nilai Kalor Cangkang Sawit dengan Metode COMB. *Risalah fisika*, 3(2): 47-50.
- Kong, GT. 2010. *Peran Biomassa Bagi Energi Terbarukan*. Jakarta: Elex Media Komputindo.
- Koppejan J, Sokhansanj S, Melin S, Madrali S. 2012. *Status overview of torrefaction technologies. Final Report*. IEA Bioenergy Task 32 report.
- Lehtikangas P. 2001. *Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark*. *Biomass and Bioenergy* 20(5): 351-360.
- Mani S, Tabil LG, Sokhansanj S. 2006. *Effects of Compressive Force, Particle Size and Moisture Content on Mechanical Properties of Biomass Pellets from Grasses*. *Biomass and Bioenergy* (30): 648 – 654
- Monika, S. 2016. Torefaksi Batang Sawit: Pengaruh Konsisi Proses Terhadap Nilai Kalor Produk Torefaksi. *Jom Fteknik*, 3(2): 1-4.
- Muhammad, Z. 2019. Bahan Bakar Padat dari Tandan Kosong Sawit Menggunakan Proses Torefaksi dengan Variasi Suhu dan Waktu Torefaksi. *Jom Fteknik*, 6(1): 1-5.
- Nita, R. 2019. *Pengaruh Putaran dan Lama Waktu Torefaksi Terhadap Kualitas Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit*. (Skripsi) UNILA: Lampung.
- Nugraha, D, A, W. 2019. *Desain Kendali Remot Kontrol Untuk Setir Traktor Tangan Berbasis Aplikasi Bluetooth Android*. (Skripsi) UNILA: Lampung.
- Pahan, I. 2008. *Panduan Lengkap Kelapa Sawit: Manajemen Agribisnis dari Hulu hingga Hilir*. Penebar Swadaya.

- Prasetyo, B, D. 2017. *Rancang Bangun Sistem Kendali Otomatis Ph Limbah Cair Industri Tahu Sebagai Larutan Nutrisi Hidroponik Berbasis Mikrokontroler*. (Skripsi) UNILA: Lampung.
- Prihandana, Rama dan Roy Hendroko. 2007. *Energi Hijau*. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Rina, M, Komalasari, Zuchra H. 2017. Pembuatan Bahan Bakar Padat Dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Pad Variasi Suhu Waktu Torefaksi. *Jom Fteknik Vol 4 No.1*. Universitas Riau: Pekanbaru.
- Rubianti, T. 2019. Karakterisasi Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) Hasil Torefaksi dengan Menggunakan Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*, 7(3): 321-331.
- Sadaka S, Negi S. 2009. *Improvements of biomass physical and thermomechanical characteristics via torrefaction process*. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 28, 435-440.
- Sigit, R, 2007. *Robotika, Sensor dan Akuator*, Yogyakarta. Graha Ilmu.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2014). *Pelet kayu*. (SNI 8021-2014). Badan Standardisasi Nasional.
- Suganal. 2019. Bahan Bakar *Co-firing* dari Batubara dan Biomassa Tertorefaksi dalam Bentuk Briket (Skala Laboratorium). *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 15(1): 31-48.
- Sugiyono. 2007. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. Alfabeta. Bandung
- Surjosatyo, A. dan F. Vidian. 2004. *Studi Co-gasifikasi Tandan Kosong dan Tempurung Kelapa Sawit Menggunakan Gasifier Aliran ke Bawah*. Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Jakarta. Hal 13-27.
- Susilowati, Komalasari, dan Zuchra H. 2017. Bahan Bakar Padat Dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu dan Ukuran Bahan Baku. *Jom Fteknik Vol 4 No.1*. Universitas Riau: Pekanbaru.
- Telaumbanua, M. 2015. Model Pengendalian Iklim Mikro dan Nutrisi Otomatis pada Pertumbuhan Sawi (*Brassica rappa Var. Parachinensis* L) Secara Hidroponik. (Disertai). Program Pascasarjana, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gajah Mada. Yogyakarta. 264 hlm.
- Yang YB, Ryu C, Khor A, Yates NE, Sharifi VN, Switthenbank J. 2005. *Effect of fuel properties on biomass combustion. Part I. Department of Chemical and Process Engineering, Sheffield University Waste Incineration Centre (SUWIC), Sheffield, UK*.



Wilén C, Jukola P, Järvinen T, Sipilä K, Verhoeff F, Kiel J. 2013. *Wood torrefaction-pilot tests and utilisation prospects*. Energy research Centre of the Netherlands. Espoo 2013. VTT Technology 122. 73 pp.

Windarwati S. 2011. *Seminar Nasional Teknologi Kimia Kayu*. Bogor.

Zainal AN, dan Harry P. L. 2017. Pembuatan Arang Cangkang Kelapa Sawit Dengan Proses Torefaksi. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan* 12(1): 14-20