

**RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU UNTUK PROSES  
TOREFAKSI PELET DARI BAHAN DASAR TANDAN KOSONG  
KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN *HEATER***

**(Skripsi)**

Oleh  
**AHMAD FITNI**  
1614071008



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### **RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU UNTUK PROSES TOREFAKSI PELET DARI BAHAN DASAR TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN *HEATER***

Oleh

**Ahmad Fitni**

Indonesia merupakan negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan produk utama tandan buahnya yang menghasilkan minyak sesudah diolah kemudian menyisakan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). TKKS selama ini dibiarkan membusuk atau langsung digunakan sebagai bahan bakar yang diolah menjadi pelet. Pelet TKKS merupakan salah satu bentuk dari energi biomassa. Akan tetapi pelet TKKS memiliki beberapa kekurangan sebagai bahan bakar yaitu konsumsi energi besar dalam pengumpulan, ketidakseragaman komposisi di dalamnya serta nilai kalor rendah. salah satu alternatif untuk meningkatkan kualitas pelet TKKS adalah menggunakan metode torefaksi. Metode torefaksi merupakan salah satu metode untuk pengolahan awal biomassa agar kualitas meningkat dan dapat digunakan dalam rentang waktu lama. Akan tetapi selama ini torefaksi masih menggunakan peralatan manual yang memiliki keterbatasan sehingga diperlukan penyempurnaan untuk mengatasinya yaitu dengan perancangan sistem kendali suhu menggunakan mikrokontroler untuk proses torefaksi pelet sehingga panasnya *heater* dapat dikontrol dengan baik.

Tujuan umum dari penelitian ini adalah merancang sistem kendali suhu pada alat torefaksi pelet berbahan dasar tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan *heater* dengan variasi suhu, variasi waktu, akurasi, kecepatan respon, stabilitas dan respon sistem. Tujuan khusus dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan sistem kendali suhu secara otomatis sesuai dengan variasi suhu yang diinginkan menggunakan *heater* pada saat proses torefaksi. Penelitian ini dilakukan pada bulan September sampai dengan Februari 2023 di Laboratorium Daya Alat dan Mesin, Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dihasilkan sistem kendali kontrol suhu alat torefaksi menggunakan mikrokontroler yang telah memenuhi kriteria desain yang mampu mengontrol nyala dan hidupnya *heater*, sehingga suhunya dapat dikontrol dengan baik. Hasil pengujian keakuratan suhu *setting point* pada suhu 50, 100, 150, 200, 250 dan 300 selama 15 menit berjalan dengan sangat baik tanpa adanya hambatan dalam proses mengatur *setting point* bawah dan *setting point* atas yang secara otomatis. Untuk hasil pengujian *hidrophobicity* sampel suhu diatas 200°C pada proses perendaman selama 24 jam tidak mengalami perubahan bentuk fisik. Sedangkan untuk hasil kinerja alat sistem kendali suhu menunjukkan bahwa respon sistem pengendalian suhu dalam waktu 24 menit dapat mencapai suhu 300°C. Keakurasian pengendalian suhu 92,12% dan stabilitas alat menghasilkan kinerja yang cukup stabil.

**Kata kunci:** Sistem kendali suhu, Torefaksi, pelet tandan kosong kelapa sawit dan *heater*.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR THE PELLET TOREFACTION PROCESS FROM THE BASIC MATERIAL OF EMPTY OIL PALM BUNCHES USING A *HEATER***

**By**

**Ahmad Fitni**

Indonesia is the largest palm oil producing country in the world with the main product being fruit bunches which produce oil after being processed which leaves Empty Palm Oil Bunches (EFB). OPEFB has been left to rot or directly used as fuel which is processed into pellets. OPEFB pellets are a form of biomass energy. However, OPEFB pellets have several drawbacks as fuel, namely large energy consumption in collection, non-uniform composition, and low calorific value. One alternative to improve the quality of OPEFB pellets is to use the torrefaction method. The torrefaction method is one of the methods for initial processing of biomass so that the quality increases and can be used for a long time. However, so far torrefaction still uses manual equipment which has limitations so improvements are needed to overcome this, namely by designing a temperature control system using a microcontroller for the pellet torrefaction process so that the heat heater well controlled.

The general objective of this research is to design a temperature control system for a pellet torrefaction tool made from empty palm oil bunches (EFB) using heater with temperature variations, time variations, accuracy, response speed, stability, and system response. The specific objective of this research is to obtain an automatic temperature control system according to the desired temperature variation using heater during the diffraction process. This research was conducted from September to February 2023 at the Tool and Machine Power Laboratory, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, University of Lampung.

Based on the research that has been done, a torrefaction tool temperature control system using a microcontroller that has met the design criteria is able to control the on and off, of the heater so that the temperature can be controlled properly.

The test results of the accuracy of the setting point temperature at temperatures 50, 100, 150, 200, 250 and 300 for 15 minutes run very well without any obstacles in the process of setting the lower setting point and the upper setting point automatically. For the results of hydrophobicity testing of temperature samples above 200°C in the immersion process for 24 hours does not change its physical form. As for the performance results of the temperature control system tool shows that the response of the temperature control system within 24 minutes can reach a temperature of 300°C. The accuracy of temperature control is 92.12% and the stability of the tool produces a fairly stable performance.

**Keywords:** Temperature control system, Torrefaction, empty palm oil bunch pellets and heater.

**RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU UNTUK PROSES  
TOREFAKSI PELET DARI BAHAN DASAR TANDAN KOSONG  
KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN *HEATER***

Oleh

**AHMAD FITNI**

1614071008

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Pertanian  
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK PERTANIAN  
FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2023**

Judul Skripsi : **RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI SUHU  
UNTUK PROSES TOREFAKSI PELET DARI  
BAHAN DASAR TANDAN KOSONG KELAPA  
SAWIT MENGGUNAKAN HEATER**

Nama Mahasiswa : *Ahmad Fitni*

No. Pokok Mahasiswa : 1614071008

Jurusan : Teknik Pertanian

Fakultas : Pertanian

UNIVERSITAS LAMPUNG  
**MENYETUJUI**  
1. Komisi Pembimbing

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

*Febryan*  
**Febryan Kusuma Wisnu, S.T.P., M.Sc.**  
NIP. 199002262019031012

2. Ketua Jurusan Teknik Pertanian

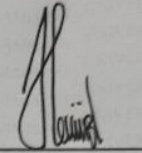
*Sandi*  
**Dr. Ir. Sandi Asmara, M.Si.**  
NIP. 196210101989021002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

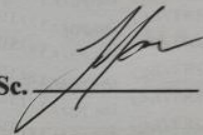
Ketua

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



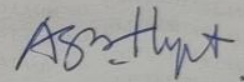
Sekretaris

: **Febryan Kusuma Wisnu, S.T.P., M.Sc.**



Penguji

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



2. Dekan Fakultas Pertanian

**Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.**  
NIP. 19611020 198603 1 002



**Dekan**  
Fakultas Pertanian,  
Universitas Lampung,  
Jalan Terpadu, Bandar Lampung,

**Prof. Dr. Ir. Purnomo, M.S.**  
NIP. 196406131987031002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **09 Juni 2023**



## PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya adalah **Ahmad Fitni** NPM **1614071008**

Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil karya saya yang dibimbing oleh Komisi Pembimbing, 1) **Dr. Mareli Telaumbanua, S.TP., M.Sc.** dan 2) **Febryan Kusuma Wisnu, S.TP., M.Sc.** berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini berisi material yang dibuat sendiri dan hasil rujukan beberapa sumber lain (buku, jurnal, dll) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil dari plagiat karya orang lain.

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

Bandar Lampung, 27 Mei 2023

Yang membuat pernyataan



**Ahmad Fitni**

**NPM. 1614071008**

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Penggawa V Ulu pada tanggal 03 April 1997 dari pasangan Bapak Ansori dan Ibu Rosna Dewi. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Negeri penggawa V Ulu pada tahun 2005-2010, Sekolah Menengah Pertama Negeri di Pondok Pesantren Darul Huffaz Lampung pada tahun 2010-2013, dan sekolah Menengah Atas di MAN 1 krui tahun 2013-2016. Penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung pada tahun 2016 melalui jalur SNMPTN.

Selama menjadi mahasiswa, penulis ikut serta di lembaga kemahasiswaan sebagai anggota Persatuan Mahasiswa Teknik Pertanian (PERMATEP) periode 2017/2018. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada bulan Januari-Februari tahun 2019 selama 40 hari di Desa Hidung Kerbau, Kecamatan Air Nanningan, Kabupaten Tanggamus.

Penulis melaksanakan Praktik Umum pada bulan Juli-Agustus tahun 2019 selama 40 hari di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) dengan judul laporan “Rancangan *Swirling Fluidized Bed* Dan Identifikasi Komponen Mesin *Hot Air* (Penyangrai Kopi) Tipe *Fluidisasi* di Pusat Penelitian Teknologi Tepat Guna (LIPI) Subang Jawa Barat.

## **PERSEMBAHAN**

**Alhamdulillahirabbil'aalamiin,**

**Kupersembahkan karya ini untuk orang-orang yang aku sayangi dan cintai  
serta sebagai wujud terimakasihku kepada**

**Ayahku Ansori, ibuku Rosna Dewi dan juga adikku Melissa Putri**

**Yang begitu tulus dan tak henti-hentinya memberikan doa, dukungan serta  
semangat disetiap langkahku untuk keberhasilan, kesuksesan dan  
kebahagianku.**

## SANWACANA

### **Bismillahirrahmanirrahim**

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Rancang Bangun Sistem Kendali Suhu Untuk Proses Torefaksi Pelet Dari Bahan Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan *Heater*”**.

Selama proses penyelesaian skripsi ini banyak pihak yang memberikan motivasi, bantuan, bimbingan, serta dukungan moril dan materil. Untuk itu penulis mengucapkan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak 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 Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Mareli Telaumbanua, S.TP., M.Sc. selaku Pembimbing Pertama sekaligus Pembimbing Akademik yang telah banyak memberikan masukan, motivasi dan bimbingan.
4. Bapak Febryan Kusuma Wisnu, S.TP., M.Sc. selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan saran dan bimbingan.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M. P selaku Pembahas yang telah memberikan saran dan masukan selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Ayahku Ansori dan Ibuku Rosna Dewi yang terkasih dan tersayang sebagai orang paling berarti yang tak pernah henti memberikan dukungan, do'a dan semangat.

7. Adikku tersayang Melissa Putri yang telah membantu dalam segala hal dan juga tak henti-hentinya memberikan semangat.
8. Tak lupa untuk Neta Silpia yang selalu memberikan motivasi dan dukungan selalu.
9. Keluarga Adhirajasa Gadjahsora Teknik Pertanian 2016.
10. Teman-teman seperjuangan atas segala canda tawa, bantuan serta motivasinya.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, untuk itu saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat diharapkan untuk kesempurnaan tulisan-tulisan selanjutnya.

Penulis

**Ahmad Fitni**

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Tandan Kosong Kelapa Sawit .....	4
2.2 Pelet TKKS.....	7
2.3 Teknologi Torefaksi .....	7
2.3.1 <i>State Of The Art Penelitian Torefaksi</i> .....	7
2.3.2 Proses Torefaksi .....	8
2.4. <i>Heater</i> Torefaksi.....	10
2.4.1 Klasifikasi <i>Heater</i> Torefaksi Berdasarkan Cara Pemanasan.....	10
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN.</b>	
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	35
3.2. Alat dan Bahan .....	35
3.2.1. Alat .....	35
3.2.2. Bahan.....	18
3.3. Kriteria Desain.....	18

3.4. Prosedur Penelitian.....	18
3.4.1 Studi Literatur .....	20
3.4.2 Perancangan .....	20
3.5 Uji Kinerja .....	25
3.5.1 Respon Sistem .....	25
3.5.2 Stabilitas .....	26
3.5.3 Akurasi .....	26
3.5.4. Kuat Arus (I) .....	27
3.5.5. Biaya Konsumsi Listrik.....	28
3.5.6. Kadar Air.....	29
3.5.6. <i>Hidrophobicity</i> .....	29

#### **IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Hasil Perancangan Alat Torefaksi.....	30
4.1.1 Kerangka Alat.....	31
4.1.2 Tabung Torefaksi.....	32
4.1.3 <i>Heater</i> .....	33
4.1.4 Kotak Kendali.....	34
4.2 Kalibrasi dan Validasi Sensor .....	35
4.3 Pengujian Kinerja Alat .....	37
4.3.1 Respon Sistem .....	37
4.3.2 Akurasi.....	40
4.3.3 Stabilitas .....	42
4.3.4 Kuat Arus ( I ).....	46
4.3.5 Biaya Konsumsi Listrik .....	48
4.4 Pengujian Hasil Torefaksi .....	48
4.4.1 Hasil Pengujian Kadar Air.....	48
4.4.2 Hasil Produksi Pelet.....	50
4.4.3 <i>Hidrophobicity</i> .....	51

**V. KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan.....55

5.2 Saran.....55

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 1. Rujukan Penelitian.....	13
Tabel 2. Keakurasian Sistem Kendali Suhu Pengamatan Ke-1 .....	40
Tabel 3. Keakurasian Sistem Kendali Suhu Pengamatan Ke-2 .....	40
Tabel 4. Keakurasian sistem kendali suhu pengamatan ke-3.....	41
Tabel 5. Keakurasian Sistem Kendali Suhu 200-300°C Pengamatan ke-1 .....	42
Tabel 6. Keakurasian Sistem Kendali Suhu 200-300°C Pengamatan ke-2 .....	42
Tabel 7. Keakurasian Sistem Kendali Suhu 200-300°C Pengamatan ke-3 .....	42
Tabel 8. Biaya Konsumsi Listrk .....	48
Tabel 9. Hasil Perhitungan Kadar Air U1-U3.....	49
Tabel 11. Hasil pelet yang sudah ditorefaksi .....	50
Tabel 12. <i>Hidrophobicity</i> sampel U1-U3.....	52
Tabel 13. Data validasi dan nilai RSME termokopel type K.....	60
Tabel 14. Respon sistem pada alat torefaksi uji 1-3.....	71
Tabel 15. Keakurasian alat suhu 50°C uji 1 .....	71
Tabel 16. Keakurasian alat suhu 100°C uji 1 .....	72
Tabel 17. Keakurasian alat suhu 150°C uji 1 .....	73
Tabel 18. Keakurasian alat suhu 200°C uji 1 .....	74
Tabel 19. Keakurasian alat suhu 250°C uji 1 .....	75
Tabel 20. Keakurasian alat suhu 300°C uji 1 .....	76
Tabel 21. Keakurasian alat suhu 50°C uji 2 .....	77
Tabel 22. Keakurasian alat suhu 100°C uji 2 .....	78

Tabel 23. Keakurasian alat suhu 150°C uji 2 .....	79
Tabel 24. Keakurasian alat suhu 200°C uji 2 .....	80
Tabe 25. Keakurasian alat suhu 250°C uji 2 .....	81
Tabel 26. Keakurasian alat suhu 300°C uji 2 .....	82
Tabel 27. Keakurasian alat suhu 50°C uji 3 .....	83
Tabel 28. Keakurasian alat suhu 100°C uji 3 .....	84
Tabel 29. Keakurasian alat suhu 150°C uji 3 .....	85
Tabel 30. Keakurasian alat suhu 200°C uji 3 .....	86
Tabel 31. Keakurasian alat suhu 200°C uji 3 .....	87
Tabel 32. Keakurasian alat suhu 300°C uji 3 .....	88

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
Gambar 1. TKKS yang dihasilkan pada tahun 2000-2009. ....	5
Gambar 2. Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit. ....	6
Gambar 3. Pelet TKKS. ....	7
Gambar 4. Perubahan Massa dan Energi pada Torefaksi. ....	9
Gambar 5. Diagram alir Prosedur Penelitian. ....	19
Gambar 6. Desain Rancangan Alat Torefaksi.....	21
Gambar 7. Skematik Rangkaian Alat Torefaksi. ....	23
Gambar 8. Sinyal Respon <i>Transien</i> dan <i>Steady State</i> . ....	26
Gambar 9. Cara Mengukur Kuat Arus Menggunakan Tang Ampere Digital. ....	28
Gambar 10. Hasil Penggabungan Semua Komponen Alat Torefaksi .....	30
Gambar 11. Kerangka Alat Torefaksi .....	32
Gambar 12. Tabung Torefaksi (a) Depan (b) Belakang.....	33
Gambar 13. Kotak Kendali .....	34
Gambar 14. Hasil Pengukuran Kalibrasi Sensor.....	36
Gambar 15. Validasi Sensor.....	37
Gambar 16. Pengujian Respon Sistem 1 .....	38
Gambar 18. Pengujian Respon Sistem 3 .....	39

Gambar 19. Grafik Gabungan Respon Sistem .....	39
Gambar 20. Pengukuran Stabilitas Alat Torefaksi Ke-1 .....	43
Gambar 21. Pengukuran Stabilitas Alat Torefaksi Ke-2.....	43
Gambar 22. Pengukuran Stabilitas Alat Torefaksi Ke-3.....	44
Gambar 23. Pengukuran Stabilitas Alat Torefaksi Ke-4.....	44
Gambar 24. Pengukuran Stabilitas Alat Torefaksi Ke-5.....	45
Gambar 25. Hasil Pemeriksaan Stabilitas Alat Torefaksi ke-6.....	45
Gambar 26. Hasil Pengukuran Kuat Arus 1 .....	46
Gambar 27. Hasil Pengukuran Kuat Arus 2.....	46
Gambar 28. Hasil Pengukuran Kuat Arus 3.....	47
Gambar 29. Hasil Gabungan Kuat Arus .....	47
Gambar 30. Tabung Torefaksi .....	89
Gambar 31. Kerangka Alat Torefaksi .....	89
Gambar 32. Kotak komponen Torefaksi.....	90
Gambar 33. Pelet TKKS yang akan di sangrai .....	90
Gambar 34. Hasil penyangraian pengujian respon sistem .....	91
Gambar 35. Sampel hasil penyangraian.....	91
Gambar 36. Pengukuran kuat arus (ampere).....	92
Gambar 37. Penimbangan kadar air .....	92
Gambar 38. Perendaman pelet ( <i>Hidrophobicity</i> ) .....	93

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkebunan kelapa sawit di Indonesia tersebar di wilayah Sumatera, Jawa Barat, Kalimantan, Sulawesi, Bangka Belitung, dan Papua dengan pengembangan terbesar dilakukan di Kalimantan. Indonesia merupakan negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2017 mencapai 15.081.021 ha, dengan produksi minyak sawit 49,71 ton/th (Ditjenbun, 2021). Produk utama pohon kelapa sawit yang dimanfaatkan adalah tandan buahnya yang menghasilkan minyak dari daging buah dan kernel (inti sawit). Setelah dilakukan proses pengolahan kelapa sawit tersebut, pada akhirnya menyisakan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) berkisar 20 hingga 23 persen dari jumlah panen Tandan Buah Sawit (TBS) yang dipasok ke pengolah (Sarwono 2008). Tandan kosong kelapa sawit terdiri dari berbagai macam serat dengan komposisi antara lain selulosa sekitar 45,95%, hemiselulosa sekitar 16,49% dan lignin sekitar 22,84%. Tandan kosong kelapa sawit adalah salah satu produk sampingan berupa padatan dari industri pengolahan kelapa sawit.

Limbah kelapa sawit dengan jumlah besar adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Selama ini, TKKS dibiarkan membusuk atau langsung digunakan sebagai bahan bakar. TKKS dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif, tetapi TKKS memiliki beberapa kendala untuk digunakan sebagai bahan bakar yaitu konsumsi energi besar dalam pengumpulan, ketidakseragaman komposisi di dalamnya serta nilai kalor rendah. Perlu dilakukannya suatu metode dengan adanya kendala tersebut

untuk meningkatkan kualitas TKKS sebagai salah satu alternatif bahan bakar yang ramah lingkungan. Metode torefaksi merupakan salah satu metode untuk pengolahan awal biomassa agar kualitas meningkat dan biomassa dapat dipergunakan dalam rentang waktu lama (Basu 2010).

Degradasi termal dengan laju pemanasan yang rendah merupakan suatu torefaksi. Pada temperatur 200°C-300°C dengan membatasi udara pada tabung pemanas (Baud *et al.*, 2006) menyatakan nilai kalor merupakan parameter pengamatan yang sangat penting untuk menentukan kualitas pelet. Semakin tinggi nilai kalor maka semakin besar nilai bahan bakar yang dikandung pada pelet TKKS. Proses torefaksi dapat mengubah sifat hidrofilik (tidak tahan terhadap air) menjadi hidrofobik (tahan terhadap air). Sifat hidrofobik dalam proses penyimpanan pelet TKKS lebih tahan lama dibandingkan penyimpanan pelet sebelum ditorefaksi (Nasrin *et al.* 2011).

Selama ini proses torefaksi masih menggunakan alat berskala kecil yang sudah menetapkan satu putaran pada alat. Alat torefaksi skala kecil yang sering digunakan hingga pada saat ini masih banyak menggunakan peralatan pengukur suhu manual sehingga tidak efektif dan tidak efisien yang menyebabkan sulitnya mendapatkan suhu yang optimum. Maka dari itu dibutuhkan suatu alat torefaksi yang dapat mengontrol suhu secara otomatis, sehingga lebih mudah dan lebih efisien di waktu pengerjaannya. Maka dari itu diperlukan penelitian tentang rancang bangun sistem kendali suhu untuk proses torefaksi pelet berbahan dasar TKKS menggunakan *heater*. Alat torefaksi ini dimodifikasi menjadi lebih sederhana dari alat penyangrai kopi dan dengan menambahkan sistem kendali suhu agar kita dapat mengoperasikan alat tersebut dengan otomatis untuk menghasilkan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang baik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah desain dari rancang bangun sistem kendali suhu untuk proses torefaksi pelet dari bahan dasar Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) menggunakan pemanas *heater* ini?
2. Bagaimana ujikinerja dari sistem kendali yang dirancang dalam proses torefaksi pelet dari bahan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang baik?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat sistem kendali suhu untuk proses torefaksi pelet dari bahan dasar Tandan Tosong Kelapa Sawit (TKKS) menggunakan *heater*.
2. Mengatur suhu secara otomatis sesuai dengan yang kita inginkan dengan menggunakan *heater* pada saat proses torefaksi.
3. Menguji kinerja alat torefaksi pelet dari bahan dasar Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) menggunakan *heater* dengan variasi suhu, variasi waktu, akurasi, kecepatan respon, stabilitas, respon sistem.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari melakukan penelitian ini adalah:

1. Untuk mempermudah kerja dari alat torefaksi pelet dari bahan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) secara otomatis.
2. Untuk memberikan informasi penggunaan alat torefaksi pelet dari bahan dasar Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tandan Kosong Kelapa Sawit

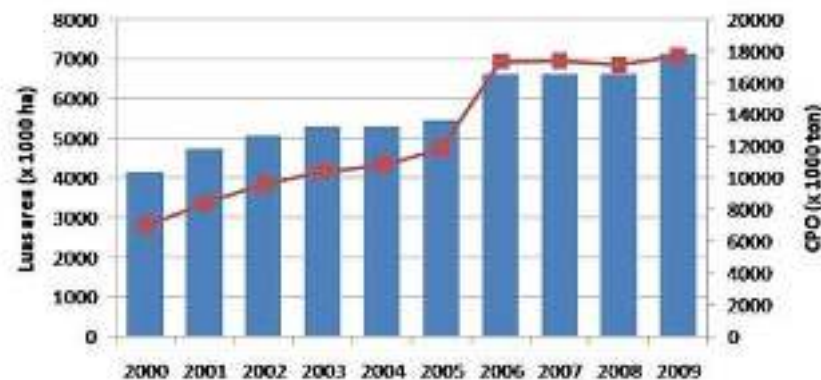
Kelapa sawit merupakan produk yang banyak diminati oleh para investor karena nilai ekonominya yang cukup tinggi. Saat ini luas areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 7,077,207 ha atau meningkat 12,95% jika dibandingkan akhir tahun 2005 yang hanya 5,453,817 ha. Volume ekspor minyak sawit pada tahun 2009 mencapai 14, 628, 000 ton dengan nilai 10,971 miliar US\$. Jumlah tersebut tergolong tinggi bila dibandingkan dengan komoditas perkebunan lain yaitu: kakao, 463, 632 ton dengan nilai 924,157 juta US\$; kopi, 350.000 ton dengan nilai 630 juta US\$, dan minyak kelapa, 739, 923 ton dengan nilai 570,410 juta US\$ (Dirjen Perkebunan 2009). Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan produk berupa limbah kelapa sawit. Berdasarkan tempat pembentukannya limbah kelapa sawit dapat digolongkan menjadi dua jenis yaitu limbah perkebunan kelapa sawit dan limbah industri kelapa sawit. Limbah industri kelapa sawit adalah limbah yang dihasilkan pada proses pengolahan kelapa sawit. Limbah jenis ini digolongkan dalam tiga jenis yaitu limbah padat, limbah cair, serta limbah gas (Fauzi et al. 2002).

Peningkatan produksi pabrik kelapa sawit memiliki konsekuensi berupa peningkatan limbah kelapa sawit yang dihasilkan. Limbah pabrik kelapa sawit dapat digolongkan dalam tiga jenis yaitu limbah padat, limbah cair, dan limbah gas. Salah satu jenis limbah padat yang paling banyak dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yaitu sekitar 22 – 23% dari total Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah (Fauzi dkk, 2002). Total jumlah



limbah TKKS seluruh Indonesia pada tahun 2009 diperkirakan mencapai 4.200.000 ton. Salah satu alternatif pengelolaan TKKS adalah dengan melakukan pengomposan. Setelah dikomposkan, limbah berupa TKKS dapat digunakan sebagai media tanam jamur merang maupun digunakan sebagai pupuk organik.

Berdasarkan data dari (Dirjen Perkebunan, 2017), potensi limbah TKKS sangat besar dan diperkirakan jumlah ini semakin meningkat dengan meningkatnya produksi kelapa sawit di Indonesia. Oleh karena itu limbah TKKS harus diolah menjadi produk yang lebih bernilai. Jumlah TKKS yang dihasilkan setiap tahun di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. TKKS yang dihasilkan pada tahun 2000-2009.

TKKS adalah salah satu produk sampingan atau limbah padatan yang berasal dari Industri pengolahan kelapa sawit. Ketersediaan TKKS cukup signifikan bila ditinjau berdasarkan rata rata produksi TKKS terhadap total jumlah Tandan Buah Segar (TBS) yang diproses. Rata –rata produksi tandan kosong kelapa sawit adalah berkisar 22% hingga 24% dari total berat tandan buah segar yang diproses dipabrik kelapa sawit. Jenis limbah kelapa sawit pada generasi pertama adalah limbah padat yang terdiri dari tandan kosong, pelepah, cangkang, dan lain-lain. Selain limbah padat juga dihasilkan limbah cair. Limbah padat dan cair pada generasi berikutnya dapat diolah lagi menjadi suatu produk yang dapat memiliki manfaat serta nilai ekonomi.

TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) di Indonesia adalah limbah pabrik kelapa sawit yang jumlahnya sangat melimpah. Pengolahan 1 ton TBS (Tandan Buah Segar) dihasilkan TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) sebanyak 22–23% TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) atau sebanyak 220–230 kg TKKS.

Limbah ini belum dimanfaatkan secara baik oleh sebagian besar pabrik kelapa sawit (PKS) dan masyarakat di Indonesia. Pemanfaatan TKKS oleh PKS masih sangat terbatas. Pabrik kelapa sawit (PKS) di Indonesia masih membakar TKKS dalam *incinerator*, meskipun cara ini sudah dilarang oleh pemerintah. Alternatif pengolahan lainnya adalah dengan menimbun (*open dumping*), dijadikan mulsa di perkebunan kelapa sawit, atau diolah menjadi kompos. Tandan kosong kelapa sawit merupakan limbah terbesar yang dihasilkan oleh perkebunan kelapa sawit. Jumlah tandan kosong mencapai 30-35 % dari berat tandan buah segar setiap pemanenan. Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit belum digunakan secara optimal hingga saat ini (Hambali 2007). Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit.

## 2.2 Pelet TKKS

Pelet tandan kosong kelapa sawit merupakan salah satu bentuk dari energi biomassa, pertama kali biomassa pelet diproduksi di Swedia sekitar tahun 1980 an. Di Swedia pelet biomassa digunakan sebagai pemanas ruang. Pelet dibuat dari hasil samping terutama serbuk kayu, ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pelet TKKS.

Sekarang ini bahan baku pembuatan pelet biomassa dapat menggunakan bahan yang lainnya. Di Swedia, pelet memiliki ukuran diameter 6-12 mm serta panjang 10-20 mm.

## 2.3 Teknologi Torefaksi

### 2.3.1 *State Of The Art Penelitian Torefaksi*

Torefaksi adalah proses termokimia tanpa kehadiran oksigen, dimana biomassa dipanaskan secara perlahan dalam kisaran suhu yang ditentukan dan ditahan untuk waktu yang ditentukan sehingga mengakibatkan degradasi kandungan hemiselulosa dengan tujuan untuk memaksimalkan hasil massa dan energi dari produk padat (Basu 2010).

Dalam aplikasinya, proses torefaksi berlangsung pada tekanan atmosfer pada kisaran suhu antara 200-300°C bahan bakar padat yang dihasilkan dari proses torefaksi harus mampu dicapai tanpa kehilangan terlalu banyak energi selama proses, misalnya energi kimia yang menguap bersama zat volatil sebagai bagian dari produk torefaksi dalam bentuk gas. Oleh karena itu, perolehan massa dan energi dianggap parameter penting dalam proses torefaksi (Bergman et al. 2005). Proses torefaksi membuat kandungan karbon tetap meningkat dan kandungan zat-zat terbang akan menurun sehingga kualitas biomassa akan meningkat. Kemudian, keuntungan lain dari proses torefaksi adalah kandungan air dari produk makin menurun serta sifat makin sulit menyerap air dari udara sehingga densitas energinya meningkat, manfaat tambahannya adalah mengurangi atau menghilangkan bahan mudah menguap yang tidak diinginkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur. Kandungan oksigen lebih rendah maka rasio oksigen terhadap karbon akan menurun sehingga biomassa memiliki karakteristik mendekati batubara.

### **2.3.2 Proses Torefaksi**

Torefaksi adalah proses termal yang sebenarnya merupakan bagian dari pirolisis ditandai dengan parameter suhu reaksi berkisar antara 200-300°C, berlangsung pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan pirolisis. Ilustrasi sederhana terkait proses torefaksi ditunjukkan pada Gambar 4.



(Skema reaktor  
Counter-Flow Multi Baffle (COMB) (Sulistio dkk., 2020))

Gambar 4. Perubahan Massa dan Energi pada Torefaksi.

Dalam menjadikan sebuah produk torefaksi biomassa mengalami beberapa pemanasan yang bertahap. Pemanasan dalam proses torefaksi biomassa ini berhubungan dengan perubahan massa, suhu dan konsumsi energi dari biomassa pada proses torefaksi.

Perlakuan awal torefaksi adalah pemanasan awal (*predrying*) yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air pada permukaan biomassa (*surface moisture*). Proses ini ditandai dengan perubahan temperatur, dari temperatur kamar menuju suhu pengeringan (100 °C). Dilanjutkan dengan tahap pengeringan (*drying*), air akan lepas dari ikatan dengan reaksi kimia (*inherent moisture*). Air tersebut dihasilkan dari proses termokondensasi pada temperatur 160 °C. Setelah mengalami pengeringan biomassa dipanaskan lebih lanjut (*post drying*) (200 °C) sebelum tahap torefaksi.

Selama proses ini, semua unsur kelembaban, senyawa organik telah hilang dari biomassa. Reaksi eksotermik akan terjadi pada temperatur 180° 270 °C, dan hemiselulosa mulai terdekomposisi. Proses dekomposisi ini akan menyebabkan perubahan warna pada biomasa dan lepasnya air, CO<sub>2</sub>, asam asetat, fenol, dan volatile matter lainnya. Pada temperatur diatas 280 °C produksi CO<sub>2</sub>, asam asetat, fenol dan hidrokarbon akan meningkat, keseluruhan proses akan menjadi

eksotermik. Pada akhir proses torefaksi akan terbentuk padatan yang memiliki struktur polimer yang lebih pendek dan lebih sederhana dibandingkan sebelum ditorefaksi. Produk dari hasil torefaksi yang keluar memiliki suhu tinggi sehingga dikhawatirkan akan terjadi oksidasi setelah berkontak dengan udara untuk itu diperlukan proses terakhir yakni tahap pendinginan. (Basu 2010).

Proses dekomposisi zat-zat volatil dan karbon terbesar pada polimer biomassa diperoleh pada tingkat temperatur yang berbeda. Hemiselulosa: 225-300 °C, Selulosa : 305-375 °C dan lignin 250-500 °C.

## **2.4. Heater Torefaksi**

Reaktor torefaksi adalah tempat berlangsungnya proses torefaksi, di dalam reaktor terjadi empat proses yang berbeda yakni proses pemanasan awal, proses pengeringan, proses torefaksi dan proses pendinginan. Masing-masing menempati area yang berbeda dimana berlangsung reaksi termal dan kimia yang berbeda. Berbagai jenis reaktor torefaksi yang digunakan dan dikembangkan saat ini, secara garis besar dapat dibagi menjadi beberapa kelompok, berdasarkan dua aspek proses torefaksi yakni perpindahan panas (*heat transfer*), dan kontak padat (*solid contacting*) (Basu 2010).

### **2.4.1 Klasifikasi Heater Torefaksi Berdasarkan Cara Pemanasan**

Pemanasan merupakan bagian terpenting dalam proses torefaksi. Media membawa panas dan memindahkan panas tersebut ke partikel biomassa. Perpindahan panas ke partikel biomassa dapat terjadi melalui salah satu cara berikut ini antara lain: gas – partikel konveksi, dinding – partikel konduksi, pemanasan elektromagnetik pada biomassa, partikel – partikel perpindahan panas, cairan – partikel perpindahan panas (Basu 2010). Berdasarkan cara pemanasannya, reaktor dapat dikelompokkan menjadi dua macam yakni reaktor tipe pemanasan langsung (*directly heated type*) dan reaktor tipe pemanasan tidak langsung (*indirectly heated type*).

### 2.4.1.1 *Heater Pemanas Langsung*

Pada reaktor dengan pemanas langsung, biomassa dipanaskan secara langsung dengan media penghantar panas, dan proses perpindahan panas melalui kontak antara biomassa dan penghantar panas. Jenis dari reaktor pemanas langsung antara lain:

#### a. *Heater Tipe Fixed Bed*

Reaktor ini merupakan reaktor yang biasa digunakan pada proses torefaksi. Pada reaktor jenis ini partikel biomassa dalam kondisi tetap diam terhadap dinding reaktor. Reaktor ini mempunyai karakteristik *heating rate* yang rendah sehingga koefisien perpindahan panas yang terjadi rendah, oleh karena itu ketika massa sampel yang diuji lebih besar suhu tidak seragam dalam sampel, dan bahan baku didekomposisi pada temperatur berbeda secara bersamaan. Karena kurang efisiennya reaktor ini sehingga jarang digunakan dalam skala besar.

#### b. *Heater Tipe Fluidized Bed*

*Reaktor fluidized bed* adalah jenis reaktor yang menggunakan fluida (cairan atau gas) yang dialirkan melalui biokatalis (biasanya berbentuk butiran butiran kecil) dengan kecepatan yang cukup sehingga biokatalis akan terolak dan akhirnya katalis tersebut dapat dianalogikan sebagai fluida juga (Chen et al. 2014). Reaktor jenis ini

#### c. *Heater Tipe Hidrotermal*

Reaktor *hidrotermal* digunakan dalam pengolahan biomassa dengan kadar air tinggi. Air digunakan dalam proses ini dan direaksikan dikisaran suhu 300-350° C dan tekanan 18-20 MPa. Dalam kondisi ini air dapat menjadi katalis. Air di dalam suhu dan tekanan tinggi mempercepat perubahan wujud dari bahan yang diolah dalam reaktor (Chen et al. 2014). Pada proses awalnya sampah dimasukkan dalam reaktor. Air yang dipanaskan dalam boiler menghasilkan uap dengan tekanan dan suhu tinggi, kemudian uap tersebut dikirimkan kedalam reaktor yang telah berisikan sampah. Di dalam reaktor uap panas dan sampah diaduk selama

selang waktu yang telah ditentukan. Sehingga perpindahan panas yang terjadi adalah antara uap dan sampah. Selain produk reaktor ini juga menghasilkan sisa uap air yang dapat didaur ulang untuk proses selanjutnya. Dalam penerapan teknologi hidrotermal memiliki biaya investasi yang tinggi, tingginya biaya ini disebabkan oleh biaya yang timbul untuk proses dalam tekanan tinggi dan material yang digunakan.

#### **2.4.1.2 Heater Pemanas Tidak Langsung**

Pada reaktor dengan pemanas tidak langsung, media penghantar panas tidak berkontak langsung dengan biomassa, melainkan panas dihantarkan melalui dinding reaktor. Reaktor jenis ini memiliki dua kelebihan utama diantaranya fluida pemanas dapat menjadi lebih panas dan zat volatil yang dilepaskan selama proses torefaksi tidak dicairkan dengan media pemanas yang melewatinya. Sehingga produk gas torefaksi dapat dibakar secara terpisah untuk melengkapi beban termal reaktor. Karena panas tersebut dihantarkan secara perlahan dari lapisan biomassa yang bersentuhan dengan dinding reaktor panas, menghasilkan distribusi temperatur yang seragam didalam reaktor. Jenis dari reaktor pemanas tidak langsung antara lain (Basu 2010).

##### **a. Heater Tipe Rotating Drum**

Pada reaktor tipe *rotating drum*, biomassa dipanaskan melalui dinding drum yang panas. Perpindahan panas dari dinding ke partikel biomassa adalah faktor pengendali utama dan bukan perpindahan panas dari gas ke partikel.

##### **b. Heater Tipe Tubular**

Reaktor jenis *tubular* merupakan jenis reaktor berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut. Reaktor tubular umumnya dipanaskan dengan sistem panas eksternal, dan dalam beberapa penelitian bahan baku di dalam material bergerak dengan sistem *screw conveyor*, reaktor bujur sangkar yang material digerakan dengan sistem *vibro-fluidiser*, atau tabung dengan *inner mixer*. Keuntungan dari reaktor ini meliputi, reaktor berjalan secara kontinyu, reaktor bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas



yang lebih besar, dan gas sintetis yang mudah bereformasi. Reaktor tipe ini mudah untuk dirancang jika koefisien perpindahan panasnya diketahui karena sederhana dan *safety*. Ciri khas dari reaktor tubular adalah *screw conveyor* reaktor dengan operasional dan biaya konstruksi yang rendah. Untuk desain ini, kecepatan *screw* dapat bervariasi dari 0,5rpm -25 rpm, dengan demikian *residence time* reaktor dapat diubah. (Chen et al. 2014). Berbagai macam penelitian tentang torefaksi sampah sudah banyak dilakukan untuk menghasilkan karakteristik dan performance yang baik, hasil dari penelitian penelitian tersebut ditunjukkan pada table 1 berikut ini.

Tabel 1. Rujukan Penelitian.

No	Nama	Metode	Hasil
1	(Sukiran et al. 2017)	Proses torefaksi pada limbah padat kelapa sawit untuk menghasilkan bahan bakar bio ( <i>biofuel</i> ).	Hasil evaluasi menggunakan teknologi torefaksi tersebut terbukti meningkatkan karakteristik limbah padat kelapa sawit. Temperatur proses memiliki peranan yang paling penting diikuti dengan <i>residence time</i> . Pada temperatur optimum 200-250°C dan <i>residence time</i> 30-60 menit (untuk perolehan massanya sekitar 73-95%) sedangkan temperatur 270-300°C dan <i>residence time</i> lebih dari 30 menit menghasilkan nilai kalor berkisar 17 MJ/kg – 25 MJ/kg.
2	(Eidha 2012)	Penentuan sifat fisik mekanik papan serat kerapatan sedang dengan menggunakan perekat tanin urea formaldehida.	Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa semua parameter sifat fisik dan mekanik papan serat memenuhi standar JIS A 5905 sampai 2003.
3	(Muhammad 2019)	Bahan bakar dari tandan kosong kelapa sawit menggunakan proses torefaksi dengan variasi suhu dan waktu torefaksi.	Efek kenaikan temperatur dan torefaksi memberikan waktu efek terhadap kualitas produk. Peningkatan suhu dan torefaksi waktu memberikan peningkatan pada nilai kalor, kadar abu, dan karbon tetap.
4	(Rahman 2011)	Uji keragaan biopellet dari biomassa limbah	Torefaksi menyebabkan penurunan kandungan selulosa

		sekam padi ( <i>Oryza savita</i> sp.) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan	dan hemiselulosa, peningkatan kandungan lignin dan peningkatan nilai kalor antara 1,71-18,32% seiring dengan peningkatan suhu torefaksi
5	(Komang 2019)	Proses torefaksi untuk meningkatkan nilai kalor cangkang sawit dengan Metode <i>Counter of Flow Baffle</i> (COMB).	Kelebihan Metode <i>Counter of Flow Baffle</i> (COMB) merupakan suatu proses dengan waktu yang singkat yaitu sebesar 5 menit, sedangkan metode batch memerlukan waktu 15 menit sampai 60 menit, sehingga kebutuhan energi untuk prosesnya lebih besar.
6	(Nachenius et al. 2015)	Proses torefaksi kayu pinus menggunakan reaktor kontinu tipe <i>screw conveyer double stage</i> menggunakan kontrol elemen pemanas elektrik.	Hasil yang diperoleh bahwa reaktor yang dirancang dan dibuat memiliki kapasitas 2,5 kg/jam dan menurutnya menggunakan reaktor kontinu dan prosesnya lebih menarik untuk digunakan karena pertimbangan terintegrasinya antara massa yang terus berkesinambungan dengan laju aliran panas.
7	(Anton 2015)	Proses torefaksi tandan kosong kelapa sawit untuk kandungan hemiselulosa serta uji kemampuan penyerapan air.	Memperlihatkan bahwa temperatur torefaksi lebih tinggi serta waktu tahan torefaksi yang lama akan meningkatkan kandungan energi serta menurunkan kemampuan menyerap air tetapi menghilangkan massa TKKS lebih banyak.
8	(Irawan et al. 2015)	Proses torefaksi tandan kosong kelapa sawit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air.	Hasil penelitian peningkatan kandungan energi diikuti dengan semakin tinggi temperatur torefaksi dan waktu tinggal torefaksi. Menggunakan variasi yang dilakukan yakni dengan temperatur antara 250°C-350°C serta waktu tinggal torefaksi 15-60 menit.
9	(Rubiyanti 2019)	Karakteristik pelet kayu karet ( <i>Hevea brasiliensis</i> ) hasil	Torefaksi pelet kayu karet dilakukan dengan menggunakan reaktor <i>Counter</i>

		torefaksi dengan menggunakan reaktor <i>Counter of Flow Baffle</i> (COMB).	<i>of Flow Baffle</i> (COMB), suatu alat yang dapat melakukan torefaksi dengan waktu tinggal yang singkat (hingga 5 menit).
10	(Indah 2016)	Pengujian analisis proksimat, nilai kalor <i>SEM</i> ( <i>Scanning Electron Microscope</i> ) menggunakan proses torefaksi dan non torefaksi	Hasil nya adalah temperatur 300°C dalam waktu 60 menit sebesar 6287,3022 kal/g, sedangkan terendah pada kondisi temperatur 200°C dalam waktu 15 menit sebesar 5349,8800 kal/g sedangkan dibandingkan dengan briket buah karet tanpa torefaksi hanya sebesar 5205,9554 kal/g.
11	Arter, 2012	Proses torefaksi terhadap sampah kota dengan bahan baku berupa simulasi campuran komponen sampah ( <i>simulated separated MSW</i> ).	Hasil torefaksi menunjukkan bahwa peningkatan nilai kalor tertinggi diperoleh pada temperatur 350°C dan waktu tinggal 9 menit, yakni sebesar 43% pada basis kering.
12	Hui Li, 2012	Proses torefaksi pada serbuk gergaji menggunakan <i>fluidized bed reactor</i> .	Diperoleh hasil bahwa semakin tinggi temperatur torefaksi maka nilai kalor yang diperoleh semakin tinggi, akan tetapi <i>energy yield</i> yang dihasilkan semakin turun diiringi dengan meningkatnya proses torefaksi yang terlalu tinggi.
13	Monika, 2016	Torefaksi batang sawit merupakan pengaruh kondisi proses terhadap nilai kalor produk torefaksi.	Bahan baku torefaksi dapat berupa batang sawit. Suhu torefaksi, waktu torefaksi, serta laju alir gas masing-masing memberikan pengaruh terhadap perubahan respon nilai kalor dan analisa proksimat berupa kadar zat volatil, kadar karbon terikat, kadar abu, dan kadar air.
14	Hardianto, 2010	Kaji eksperimental untuk mendapatkan karakteristik nilai kalor dan gas emisi pembakaran bahan bakar padat hasil torefaksi yang berasal dari sampah kota dibandingkan dengan sampah langsung	Hasil penelitian diperoleh torefaksi sampah mempunyai nilai kalor setara dengan batubara subbituminous dan menghasilkan gas buang yang lebih ramah lingkungan dibandingkan gas emisi hasil pembakaran sampah kota secara langsung.

---

		melalui simulasi menggunakan software <i>cyclo tempo</i> .	
15	Anton, 2015	Proses torefaksi tandan kosong kelapa sakit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air.	Memperlihatkan bahwa temperatur torefaksi lebih tinggi serta waktu tahan torefaksi yang lama akan meningkatkan kandungan energi serta menurunkan kemampuan menyerap air tapi menghilangkan massa TKKS lebih banyak.

---

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2022 sampai Maret 2023 di Laboratorium Daya Alat dan Mesin Pertanian, Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

#### 3.2. Alat dan Bahan

##### 3.2.1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini, sebagai berikut:

1. *Heater* yang telah dimodifikasi berfungsi sebagai pemanas untuk penyangraian
2. Tang untuk memotong dan menahan benda yang keras
3. Gunting sebagai alat pemotong
4. Obeng untuk membuka dan mengencangkan mur dan baut
5. Mikrokontroler Arduino uno salah satu komponen untuk mengirim dan menerima perintah dari modul pendukung lainnya
6. LCD 12C yaitu untuk menampilkan semua informasi yang diterima oleh arduino
7. *Power supply 3 ampere 12 volt*
8. Termokopel tipe K sensor untuk mengukur suhu
9. Kabel jumper sebagai penghubung antar komponen
10. Relay untuk memustuskan suatu arus secara otomatis
11. *Thermometer* sebagai pengukur suhu eksternal
12. Modul max6675 digunakan untuk converter pembacaan suhu termokopel tipe K
13. Dinamo dc 12volt dengan *gearbox*.

### 3.2.2. Bahan

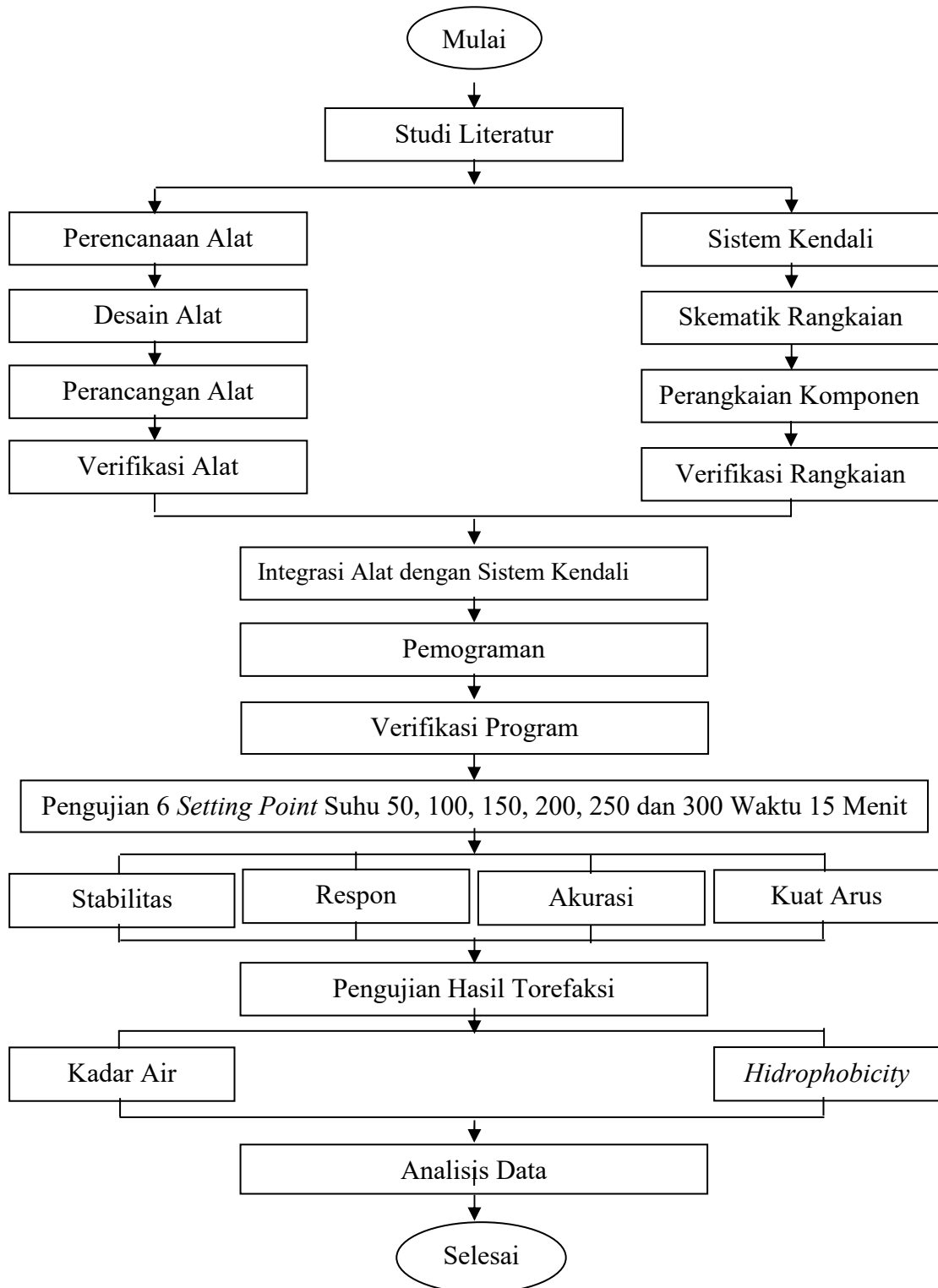
Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pelet tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang siap untuk dilakukan torefaksi.

### 3.3. Kriteria Desain

Pada penelitian penggunaan *heater* digunakan sebagai bahan bakar utama. Bentuk dari alat ini yaitu berbentuk tabung silinder yang memiliki diameter 30 cm dan tinggi 35 cm. Alat torefaksi ini dirancang untuk dapat bekerja secara otomatis dalam proses pengendalian suhu saat proses torefaksi berlangsung. Untuk menggerakkan silinder terintegrasi yaitu menggunakan dinamo dc 12 volt. Penggunaan mikrokontroler arduino uno pada penelitian ini digunakan sebagai pengatur seluruh proses kendali otomatis. Selain diharapkan memiliki kapasitas 5 kg per jam, alat ini juga diharapkan pada proses torefaksi mampu mencapai suhu 300°C. Dalam rentang waktu 10 menit kendali suhu yang diharapkan stabil. Saat proses torefaksi diharapkan memiliki kematangan yang sempurna pada pelet yang dihasilkan.

### 3.4. Prosedur Penelitian

Penelitian ini merupakan suatu kegiatan merancang sistem pengendali suhu pada proses torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit menggunakan *heater* sebagai alat pemanasnya. Mekanisma perputaran alat torefaksi dalam penelitian ini berputar 360° dengan bantuan dynamo dc dan *gearbox*. Pembuatan sistem pengendali ini dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu studi literatur, penggabungan alat dengan sistem kendali, pemograman, verifikasi pemograman, pengujian hasil torefaksi, dan analisis data. Berikut adalah diagram penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir Prosedur Penelitian.

### **3.4.1 Studi Literatur**

Tahapan studi literatur merupakan tahapan yang bertujuan untuk pengumpulan referensi yang digunakan untuk pedoman dalam melakukan perancangan alat. Tahapan pada studi literatur terbagi menjadi dua tahapan, tahapan pertama yaitu tahapan pembuatan alat yang digunakan pada penelitian ini dapat berupa perencanaan alat, desain alat, perancangan alat, serta verifikasi alat, sedangkan tahapan kedua yaitu tahapan pembuatan sistem kendali yang digunakan pada penelitian ini dapat berupa sistem kendali, skematik rangkaian, perangkaian komponen, dan verifikasi rangkaian.

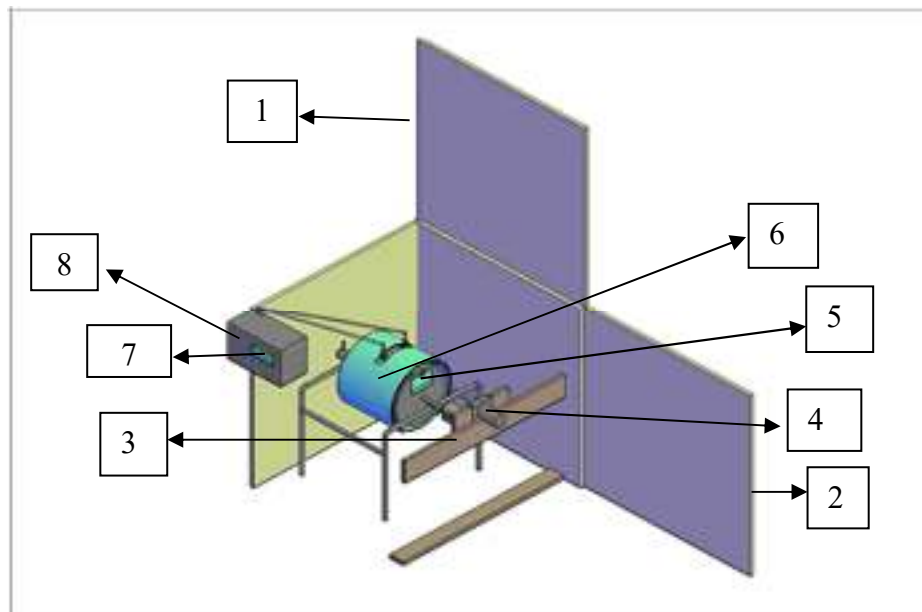
### **3.4.2 Perancangan**

Tahapan perancangan terbagi menjadi dua yaitu sebagai berikut :

#### **3.4.2.1 Rancangan Struktural**

Rancangan struktural merupakan perancangan yang terdiri dari perancangan alat dan perancangan sistem kendali. Perancangan alat dan perancangan sistem kendali dibagi menjadi tiga tahapan. Tahapan perancangan yaitu berupa tahapan desain alat, tahapan perangkaian alat, serta tahapan verifikasi alat, sedangkan tahapan perancangan sistem kendali yaitu berupa tahapan skematik rangkaian, tahapan perangkaian komponen, dan tahapan verifikasi rangkaian. Pada tahapan desain alat yaitu dilakukan proses mendesain alat menggunakan AutoCAD 2007. Tampilan desain rancangan ditunjukkan pada Gambar 6.





Gambar 6. Desain Rancangan Alat Torefaksi.

Keterangan :

1. Tutup tabung sangrai
2. Tutup kerangka samping
3. Dudukan dynamo dc
4. Dynamo DC dan *gearbox*
5. Tabung sangrai
6. *Heater band*
7. LCD
8. Kotak Kendali

Desain rancangan terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut:

#### 1. Tutup Tabung Sangrai

Tutup tabung sangrai terletak pada bagian atas alat torefaksi. Tutup tabung sangrai dipergunakan sebagai penghalang agar udara panas yang dihasilkan alat torefaksi saat beroperasi tidak menyebar, dipergunakan sebagai tempat memasukan pelet tandan kosong kelapa sawit, serta dipergunakan untuk mempertahankan suhu

yang dibutuhkan pada saat melakukan penyangraian pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit.

## 2. Tutup Kerangka Samping

Tutup kerangka samping terbagi pada empat sisi bagian alat torepaksi, yaitu bagian depan, bagian belakang, bagian samping kanan, serta bagian samping kiri alat torepaksi. Empat bagian tutup kerangka samping berfungsi untuk menjaga agar suhu tetap stabil dan digunakan untuk mengeluarkan hasil dari penyangraian.

## 3. Dudukan Dinamo DC

Dudukan dinamo DC terbuat dari bahan baku kayu dan terletak pada bagian samping alat torefaksi. Dudukan dinamo DC berfungsi sebagai penyangga agar dinamo sejajar dengan tabung penyangrai.

## 4. Dinamo DC dan *Gear Book*

Dinamo DC berfungsi untuk memutar as pada alat torefaksi yang digunakan sebagai pemutar tabung penyangrai. Sedangkan *Gear book* berfungsi untuk memperlambat putaran dari dinamo DC supaya putaran yang disalurkan untuk menyangrai sesuai dengan yang diperlukan.

## 5. Tabung Sangrai

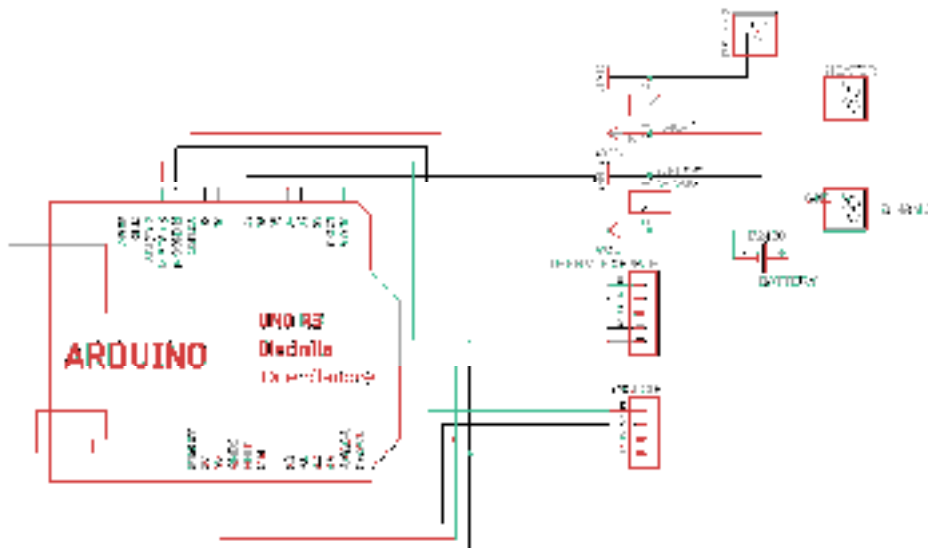
Tabung sangrai berfungsi untuk menampung pelet yang telah di sangrai pada alat torefaksi. Pada penelitian ini tabung yang digunakan berdimensi diameter 15 cm, tinggi 27 cm dan volume  $4.768,875 \text{ cm}^3$ .

## 6. *Heater Band*

*Heater band* terletak diatas tabung penyangrai dan di dalam kerangka alat, serta *heater band* berfungsi untuk memanaskan tabung yang digunakan pada penyangraian pelet.

### 3.4.2.2 Rancangan Fungsional

Rancangan fungsional berfungsi untuk mengendalikan suhu pada saat proses torefaksi. Semua proses torefaksi diatur dan terintegrasi menggunakan mikrokontroler. Skematik rangkaian pada rancangan fungsional terdiri dari beberapa bagian, yaitu *staker*, relay, arduino, *heater type band*, LCD, termokopel tipe K, modul max6675, serta dinamo DC. Skematik rangkaian ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Skematik Rangkaian Alat Torefaksi.

Skematik rangkaian terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut:

1. *Staker* atau Colokan

*Staker* atau colokan diperuntukan pada *heater* sebagai penghubung kelistrik 220 V supaya mendapatkan daya untuk memanaskan *heater* pada alat torefaksi.

2. Relay

Relay merupakan komponen pada alat torefaksi yang mendapat perintah dari arduino untuk memutus dan menyambung arus listrik. Ketika pembacaan suhu pada termokopel tipe K maka *heater* dapat menyesuaikan tingkatan suhu yang dibutuhkan pada saat penyangraian menggunakan alat torefaksi.

### 3. Arduino

Arduino merupakan komponen terpenting dalam pembuatan alat torefaksi. Arduino dipergunakan untuk menerima data serta mengirim data dari komponen-komponen berikut, seperti modul max6675, termokopel tipe K, relay, dan LCD. Semua data komponen pada alat torefaksi berpusat pada perintah yang telah di *input* kedalam arduino.

### 4. Heater type band

*Heater type band* digunakan untuk memanaskan *drum* penyangrai supaya mencapai suhu yang diinginkan pada alat torefaksi. *Heater type band* disambungkan dengan kabel positif dan negatif pada *staker*. Kabel positif pada *heater* dan *staker* tersambung pada COM (*Common Pin*) dan NO (*Normally Open*), agar pada saat mencapai suhu *setting point* atas dan *setting point* bawah dapat terputus serta tersambung.

### 5. LCD

Fungsi dari LCD ini pada alat torepaksi yaitu untuk menampilkan semua informasi yang diterima oleh arduino. Tanpa harus melihat tampilan suhu yang telah di baca oleh sensor termokopel tipe K di *serial monitor* pada laptop.

### 6. Termokopel tipe K

Termokopel tipe K merupakan sensor suhu temperatur yang digunakan pada alat torefaksi untuk mengetahui pembacaan suhu pada alat torefaksi. Termokopel tipe K ini dibantu oleh modul max6675 untuk menampilkan pembacaan suhu yang telah dibaca oleh sensor suhu termokopel tipe K tersebut.

### 7. Modul max6675

Modul max6675 terbuat dari kompensasi *cold-junction* yang mempunyai *output* digital dari sinyal termokopel tipe K. *Output* ini miliki resolusi 12-bit dan mendukung komunikasi SPI mikrokontroler secara umum. Data dapat dibaca

dengan mengkonversi hasil pembacaan 12-bit data suhu untuk ditampilkan di LCD pada rangkaian alat torefaksi secara otomatis.

## 8. Dinamo DC

Dinamo DC merupakan suatu jenis motor listrik yang membutuhkan tegangan arus searah (DC) seperti dari batu baterai, aki, dan *power supply*. Dinamo DC berfungsi untuk memutar tabung silinder torefaksi pada saat melakukan penyangraian pelet dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) agar penyangraian mendapat hasil yang sempurna.

### 3.5 Uji Kinerja

Tahapan uji kinerja merupakan tahapan pengujian yang dilakukan pada analisis kinerja aktuator dan kehandalan dari sistem kendali. Parameter yang diamati pada tahapan uji kinerja sebagai berikut:

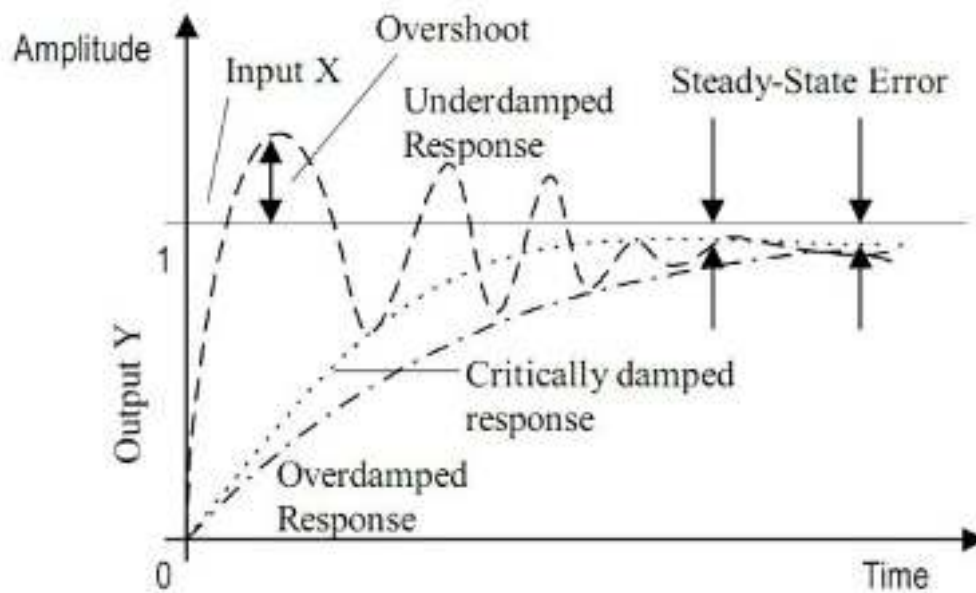
#### 3.5.1 Respon Sistem

Berdasarkan jenis *domain*, respon sistem terbagi menjadi dua bagian yaitu *domain waktu* (*time response*) dan *domain frekuensi* (*frequency response*) (Plant, 1985).

Penelitian ini menggunakan *domain waktu* (*time response*) yang merupakan karakteristik respon yang spesifikasi performa didasarkan pada pengamatan bentuk respon terhadap perubahan waktu. Respon sistem memperlihatkan kecepatan kinerja suatu sistem terhadap ada atau tidaknya gangguan dan waktu.

Berdasarkan jenis *domain waktu* respon sistem dibagi menjadi dua tahapan yaitu spesifikasi respon *transient* dan spesifikasi respon *steady state*. Respon *transient* ini berguna dalam pengukuran waktu ketika sistem memulai kinerja sampai terjadi perubahan atau gangguan yang masuk hingga sampai posisi *steady state*.

Kemudian respon *steady state* digunakan untuk mengukur waktu saat sistem atau respon dalam keadaan stabil sampai waktu yang tak terbatas. Grafik mengenai respon sistem ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. Sinyal Respon *Transien* dan *Steady State*.

### 3.5.2 Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan daya tahan alat yang mampu menghasilkan kinerja tetap atau tidak (Prasetyo, 2017). Jika sistem kendali ini tidak stabil akan mempengaruhi respon termokopel tipe K yang diletakkan pada bagian tabung penyangrai pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Syarat stabilitas tidak terpenuhi apabila respon yang dihasilkan terlalu lama dan gerakan menyimpang dari perintah yang diberikan. Jika respon terlalu lama dan suhu tidak sesuai dengan perintah maka alat tersebut belum memenuhi syarat stabilitas. Respon termokopel tipe K yang diletakkan pada alat penyangrai sangat bergantung dengan kestabilan sistem kendali ini.

### 3.5.3 Akurasi

Akurasi dalam penelitian ini dinyatakan dalam perbandingan antara suhu yang terbaca di sensor dengan suhu yang terbaca dengan alat ukur suhu. Akurasi dari tingkat kesesuaian suhu antara sensor dengan alat pengukur suhu. Akurasi menunjukkan ketepatan kinerja suatu alat ketika mencapai suatu *setting point* atau

batasan yang telah ditentukan. Secara umum dinyatakan dengan persamaan 1 sebagai berikut:

$$\text{Deviasi} = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (n_i - SP)^2}{2N} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

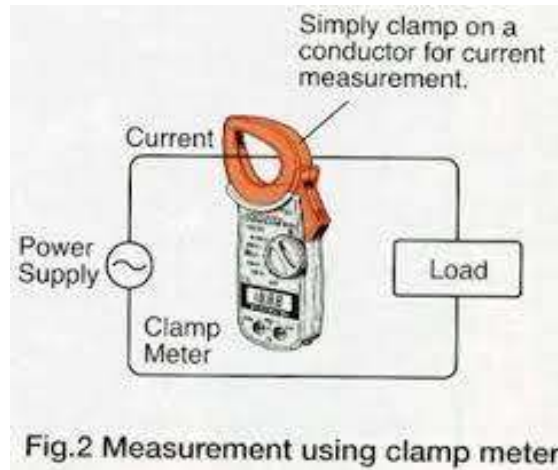
SP = Nilai setting point

n = Nilai Aktual ke-i

N = Jumlah Data

### 3.5.4. Kuat Arus (I)

Pengukuran kuat arus pada penelitian ini yang digunakan adalah perhitungan jumlah konsumsi daya suatu beban. Kuat arus listrik didefinisikan sebagai banyaknya muatan listrik yang bergerak (mengalir) melalui suatu titik di dalam rangkaian listrik persatuan waktu. Lambang kuat arus yaitu I dan dinyatakan dalam satuan ampere (A). Tang ampere digunakan untuk pengukuran kuat arus yang menggunakan skala maksimal pada arus listrik 220 volt. Cara penggunaan tang ampere yaitu dengan menghidupkan tang ampere pada tegangan yang akan diukur. Lalu menjepitkan tang ampere pada salah satu kabel yang terhubung dengan *heater*. Pada monitor tang amper akan terlihat besaran arus pada *heter*. Cara pengukuran ini ditunjukkan oleh Gambar 9.



Gambar 9. Cara Mengukur Kuat Arus Menggunakan Tang Ampere Digital.

### 3.5.5. Biaya Konsumsi Listrik

Biaya konsumsi listrik merupakan biaya minimum yang dijadikan tarif dasar tagihan suatu penggunaan listrik. Dalam proses torefaksi dilakukan sebanyak 3 kali pengukuran tiap suhu selama 15 menit dengan total keseluruhan waktu dari setiap ulangan yaitu 90 menit. Untuk menghitung daya listrik yang diserap oleh tiap kali pengukuran dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$P = V \cdot I$$

Keterangan:

P = Daya listrik (watt)

V = Tegangan listrik (Volt)

I = Arus Listrik satuan ampers

Dan untuk menghitung biaya penggunaan listrik digunakan rumus sebagai berikut:

$$W = p \cdot t$$

Keterangan:

W = Energi listrik (Kwh)

P = Daya listrik (watt)

t = waktu



### 3.5.6. Kadar Air

Produksi gas sintesis pada saat proses pembakaran merupakan pengaruh yang sangat penting dalam penggunaan kadar air. 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 °C selama 24 jam sampai kadar air konstan. Tahap terakhir didinginkan ke dalam desikator sampai suhu stabil dan timbang, kadar air dihitung menggunakan persamaan 4:

$$\text{Kadar air} = (B_a - B_f) / B_a \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

$B_a$  = Berat bahan tanpa cawan sebelum dioven

$B_f$  = Berat bahan tanpa cawan setelah dioven

### 3.5.6. *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 bearada pada kondisi ekstrem (di dalam air).

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan studi yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kendali kontrol suhu alat torefaksi menggunakan mikrokontroler telah dibuat untuk mengontrol suhu. Sistem ini memenuhi kriteria desain dengan mampu mengontrol nyala dan hidupnya *heater* dengan kendali suhu, sehingga panasnya *heataer* dapat dikontrol dengan baik.
2. Hasil pengujian suhu keakuratan suhu *setting point* pada suhu 50, 100, 150, 200, 250 dan 300 selama 15 menit berjalan dengan sangat baik tanpa adanya hambatan dalam proses mengatur *setting point* bawah dan *setting point* atas yang terjadi secara otomatis, dimana pada saat suhu mencapai *setting point* atas maka *heater* akan terputus secara otomatis sehingga tidak terjadi kenaikan suhu kembali. Sedangkan apabila suhu mencapai pada *setting point* bawah *heater* otomatis menyala kembali.
3. Hasil pengujian kinerja alat sistem kendali suhu menunjukkan bahwa respon sistem pengendalian suhu dalam waktu 24 menit dapat mencapai suhu 300°C. Keakurasi pengendalian suhu 92,12% dan stabilitas alat menghasilkan kinerja yang cukup stabil.

### 5.2 Saran

Disarankan untuk memodifikasi bagian *bering* pada as tabung penyangraian, dikarenakan sering terjadinya tidak berputar pada waktu penyangraian. Pada bagian kotak penyangraian diharapkan dapat modifikasi dengan memberikan jalur asap, agar asap yang terperangkap dapat terbang keudara. Dan juga disarankan

untuk memberi isolator pada alat torefaksi agar terhindar dari kebocoran arus listrik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anton, I. 2015. Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa Dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor* 15 (3): 190–95.
- Basu, P. 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Burlington. *MA: Academic Press*.
- Bergman, P.C.A, A.R Boersma, R.W.R. Zwart., & J.H.A Kiel. 2005. Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired. *Power Stations* 013 (05): 33–51.
- Chen, Dezhen, Lijie, Yin, Huan, Wang, Pinjing., & He. 2014. Pyrolysis Technologies for Municipal Solid Waste: A Review. *Waste Management*.
- Ditjenbun, 2021. Statistik Perkebunan Indonesia, Kelapa Sawit 2015-2017. Direktorat Jendral Perkebunan. Kementrian Pertanian. Jakarta.
- Eidha, S. 2012. Penentuan Sifat Fisik Mekanik Papan Serat Kerapatan Sedang Dengan Menggunakan Perekat Tanin Urea Formaldehida. *JTRI* 6 (12): 54–66.
- Fauzi, Y, Y.E Widiastuti, I Setyawibawa., & R Hartono. 2002. Kelapa Sawit, Budidaya, Pemanfaatan Hasil Dan Limbah, Analisis Dan Pemasaran. Penebar Swadaya, Jakarta.
- Hambali, E. 2007. Teknologi Bioenergi. Agro Media Pustaka., Jakarta.

- Indah, P. 2016. Pengujian Analisis Proksimat, Nilai Kalor SEM (ScanningElectronMicroscope) Menggunakan Proses Torefaksi Dan Non Torefaksi. *JTPA* 7 (2): 63–66.
- Irawan, Anton, Riadz, Tubagus., & Nurmaliza. 2015. Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa Dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor* 15 (3): 190-195.
- Komang, G. 2019. Torefaksi Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Cangkang Sawit Dengan Metode COMB. *Risalah Fisika* 3 (2): 47–50.
- 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.
- Nachenius, Wardt, Ronsse., & Prins. 2015. Torrefaction of Pine in a Bench-Scale Screw Conveyor Reaktor. *Elsevier. Biomassa and Bioenergi Xxx*, 1–9.
- Nasrin, A. B., Y. M. Choo, W. S. Lim, L Joseph, S Michael, M. H. Rohaya, A. A. Astimar., & S. K. Loh. 2011. Briquetting of Empty Fruit Bunch Fibre and Palm Shell as a Renewable Energy Fuel. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 6 (6): 446–51.
- Rahman. 2011. Uji Keragaan Biopellet Dari Biomassa Limbah Sekam Padi (*Oryza Sativa* Sp.) Sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan. Skripsi: 67, Institut Pertanian Bogor.
- Rubiyanti, T. 2019. “Karakterisasi Pelet Kayu Karet (*Hevea Brasiliwnis*) Hasil Torefaksi Dengan Menggunakan Reaktor Counter of Flow Multi Baffle (COMB).” *Jurnal Sylva Lestari* 7 (3): 321–31.
- Sarwono, E. 2008. “Pemanfaatan Janjang Kosong Sebagai Substansi Pupuk Tanaman Kelapa Sawit.” *Jurnal APLIKA* 8 (1): 33–45.
- Sukiran, Abnisa, Daud, Abubakar., & Loh. 2017. A Review Of Torrefaction of Oil Palm Solid Waste For Biofuel Production. *Elsevier Energy Conversion and Management* 149: 108–20.
- Sitompul, J.P., Jauhari, A.K.P., Gumilar, G.G., Calimanto, Y., & Rasrendra, C.B. 2019, Studi kondisi operasi dalam pemisahan asam laktat dari produk konversi katalitik tandan kosong sawit melalui esterifikasi- hidrolisis, *Jurnal Rekayasa Proses*, 13 (2), 122–131.