

## LAPORAN AKHIR PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN

Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPS)

### JUDUL PENELITIAN

*“Black pellet Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Proses Gasifikasi : Peningkatan Mutu Biomassa melalui Torefaksi COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Pyrolyzer”*

NO KONTRAK : PRJ-85/DPKS/2018

### KELOMPOK PENELITI

Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P (Universitas Lampung, KETUA)  
Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc (Universitas Lampung, ANGGOTA)  
Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc (Universitas Lampung, ANGGOTA)  
Dr. Eng. Dewi Agustina, S.T., M.T (Universitas Lampung, ANGGOTA)  
Dr. Amrul S.T., M.T (Universitas Lampung, ANGGOTA)  
Dr. Mareli Telaumbanua, S.T.P., M.Sc (Universitas Lampung, ANGGOTA)  
Dr. Bandung Sahari (ANGGOTA, Astra Agro Lestari)

### BIDANG PENELITIAN

Bioenergi

Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat  
Universitas Lampung

Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit  
Kementerian Keuangan

Tahun 2019

## LEMBAR PENGESAHAN

1. Judul Penelitian : *Black Pellet Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Pembangkit Listrik di Daerah Terpencil: Peningkatan Mutu Biomassa, melalui Torefaksi COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Pyrolizer*
2. Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap : Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.
- b. Jenis Kelamin : L / P
- c. NIP/NIK : 196505271993031002
- d. Jabatan Struktural : Ketua Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Unila
- e. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
- f. Lembaga Periset : Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Lampung
- g. Alamat : Jl. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145
- h. Telpon/Faks : 0721-705173 / 0721-773798
- i. Alamat Rumah : Jl. Cendana No. 199, Perumahan Bataranila, Rajabasa, Bandar Lampung, 35144
- j. Telpon/Faks/E-mail : 081379078674
3. Lembaga Mitra : -

4. Anggota Peneliti


No	Nama	Instansi
1	Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.	LPPM Universitas Lampung
2	Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc	LPPM Universitas Lampung
3	Dr. Eng. Dewi Agustina, S.T., M.T	LPPM Universitas Lampung
4	Dr. Amrul, S.T. M.T.	LPPM Universitas Lampung
5	Dr. Mareli Telaumbanua, S.T.P., M.Sc	LPPM Universitas Lampung
6	Dr. Bandung Sahari	Astra Agro Lestari

5. Pembiayaan

Uraian	Jumlah
Biaya yang dibutuhkan Tahun I	Rp811.525.000
Biaya yang dibutuhkan Tahun II	Rp1.235.795.000

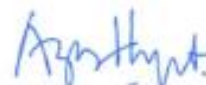
Bandar Lampung, 3 September 2019

Menyetujui,  
Ketua LPPM Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Hamim Sudarsono, M.Sc. #  
NIP 196001191984031002

Ketua Peneliti



Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.  
NIP 196505271993031002

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya :

Nama : Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.  
NIP : 196505271993031002  
Unit Kerja : Fakultas Pertanian, Universitas Lampung  
Kedudukan : Ketua Tim Peneliti Penelitian dan Pengembangan

menyatakan menyatakan bahwa pada Laporan Penelitian dan Pengembangan yang berjudul **Black pellet Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Proses Gasifikasi : Peningkatan Mutu Biomassa melalui Torefaksi COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Pyrolyzer**

tidak terdapat unsur plagiarisme berdasarkan Peraturan Perundang-undangan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

Bandar Lampung, 3 September 2019  
Yang membuat pernyataan

Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN .....	iii
DAFTAR ISI .....	iv
DAFTAR GAMBAR .....	vi
DAFTAR TABEL .....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
ABSTRAK .....	1
RINGKASAN EKSEKUTIF .....	2
BAB 1. PENDAHULUAN.....	4
1.1 Latar pelakang .....	4
1.2 Tujuan Khusus .....	5
1.3 Rumusan Masalah .....	5
1.4 Urgensi Penelitian .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
1.6 Luaran yang akan diperoleh.....	5
1.7 Kontribusi lembaga dan mitra.....	5
BAB II. STUDI PUSTAKA.....	6
2.1. Sawit Indonesia.....	6
2.2. Proses Ekstrasi Minyak Sawit .....	7
2.3. Limbah Padat .....	7
2.3.1 Cangkang dan sabut.....	7
2.3.2 Abu boiler dan Solid Decanter .....	8
2.3.3 Tandan Kosong.....	8
2.4. PKS Tanpa Kebun.....	9
2.5. Torefaksi Biomassa .....	10
2.6. Reaktor COMB .....	13
2.7. Aplikasi dan Pasar Torefaksi Biomassa .....	14
BAB III. METODE Riset .....	16
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	16
3.2. Bahan dan Perlakuan.....	16
3.2.1. Pembuatan white pellet.....	16
3.2.2. Torefaksi Pellet .....	16
3.3.3. Analisis Sifat Pelet. ....	19
3.3. Parameter dan Metode Analisis .....	19
BAB IV. LUARAN .....	20

BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	21
5.1. Pelet dan Nilai Komersial.....	21
5.2. Proses pembuatan pellet.....	21
5.3. Karakteristik Fisik Pelet TKKS.....	25
5.4. Karakteristik Energetik Pelet TKKS.....	31
5.5. Proses Torefaksi COMB.....	31
5.6. Komposisi Mineral.....	40
5.7. Problem Reaktor COMB.....	41
5.8. Torefaksi Menggunakan Oven (Solusi I).....	38
5.9. Torefaksi Menggunakan Reaktor Rotary (Solusi II).....	38
5.10. Mesin Pellet Skala Industri Kecil.....	41
5.11. Rencana Lanjutan.....	49
 BAB 6. KESIMPULAN.....	 50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN.....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.	Karakteristik energi produk torefaksi .....	12
Tabel 3.	Parameter dan metode analisis.....	19
Tabel 5.1	Hasil uji kuat tekan (dalam kgf) pellet TKKS .....	27
Tabel 5.2	Massa jenis single pelet dengan 1X penekanan .....	28
Tabel 5.3	Massa jenis single pelet dengan 2X penekanan .....	28
Tabel 5.4	Perbandingan massa jenis single pelet TKKS dengan pelet kayu .....	29
Tabel 5.5	Massa jenis kamba pelet TKKS (gr/cm <sup>3</sup> ) 1X pres dan 2X pres.....	29
Tabel 5.6	Karakteristik energi pelet TKKS .....	31
Tabel 5.7	Karakteristik energi pelet TKKS torefaksi .....	33
Tabel 5.8	Perubahan nilai elemental pellet TKKS torefaksi .....	35
Tabel 5.9	Komposisi mineral pelet TKKS .....	40
Tabel 5.10	Karakteristik kimia TKKS hasil torefaksi menggunakan reaktor rotary .....	43

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram van Krevelen untuk willow dan miscanthus .....	12
Gambar 2.2	Bagian-bagian reaktor COMB .....	14
Gambar 3.1	Roadmap Penelitian pembuatan <i>black pellet</i> dari TKKS .....	17
Gambar 3.2	Perancangan Teknis pembuatan <i>black pellet</i> dari TKKS .....	18
Gambar 5.1	Kunjungan tim peneliti ke PT. Toba Hijau Sinergy .....	21
Gambar 5.2	Diagram alir proses pembuatan pelet TKKS di PT. THS, Tebing Tinggi .....	21
Gambar 5.3	Rotary dryer untuk mengeringkan TKKS di PT. THS .....	22
Gambar 5.4	Mesin pencetak pelet TKKS tipe <i>vertical ring die</i> .....	24
Gambar 5.5	Pelet TKKS yang dihasilkan di PT. Toba Hijau Sinergy .....	24
Gambar 5.6	Penampang melintang dan bentuk pelet TKKS yang diperbesar .....	25
Gambar 5.7	Bentuk pelet TKKS: 1X pres (kiri) dan 2X press (kanan).....	25
Gambar 5.8	Penyimpanan pelet TKKS lebih dari 1 bulan (rusak) .....	26
Gambar 5.9	Hasil uji kuat tekan (flexural strength) pelet TKKS .....	27
Gambar 5.10	Perubahan massa (kiri) dan kadar air (kanan) pellet TKKS selama penyimpanan di udara ruang .....	30
Gambar 5.11	Fasilitas COMB Pyrolyzer Universitas Lampung untuk torefaksi .....	32
Gambar 5.12	Bagian inti COMB Pyrolyzer untuk proses torefaksi .....	32
Gambar 5.13	Pelet TKKS (dari kiri: white, brown, dan black pellet) .....	33
Gambar 5.14	Spectra FTIR pellet TKKS sebelum dan sesudah torrefaksi.....	34
Gambar 5.15	Perbaikan nilai kalori pelet melalui torefaksi.....	35
Gambar 5.16	Uji hydrophobicity pelet putih (tanpa torefaksi).....	36
Gambar 5.17	Uji hydrophobicity pelet torefaksi (brown).....	36
Gambar 5.18	Uji hydrophobicity pelet torefaksi (black) .....	36
Gambar 5.19	Perbedaan mikroskopis pellet TKKS berdasarkan foto SEM (atas: pellet putih; tengah: Pellet setengah torefaksi; bawah: Pellet torefaksi penuh).....	38
Gambar 5.20	Skema reaktor torefaksi tipe rotary .....	42
Gambar 5.21	Penurunan masa jenis pelet tunggal akibat torefaksi .....	43
Gambar 5.22	Mesin pellet biomassa skala industri kecil, mesin 24 HP.....	44
Gambar 5.23	Pellet TKKS yang dicetak mesin 24 HP (kiri: 1X pres, kanan 4X press) .....	45



## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Rekapitulasi Penggunaan Dana .....	51
Lampiran 2. Surat Pernyataan Tanggung Jawab Belanja (SPTJB) .....	52
Lampiran 3. Publikasi .....	58
Lampiran 4. Daftar HAKI / Paten .....	120
Lampiran 5. Status Komersialisasi .....	120



## ABSTRAK

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat dengan persentase paling besar yang dihasilkan dari proses pengolahan CPO yaitu sekitar 21-23 %. Selama ini TKKS umumnya dikembalikan ke lahan sebagai mulsa maupun sebagai kompos. Untuk Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit (PPKS) yang tidak mempunyai kebun, limbah TKKS tetap akan menjadi masalah. Salah satu alternatif pemanfaatan TKKS di luar kebun adalah menjadikannya sebagai bahan bakar. TKKS berpotensi digunakan sebagai sumber energi karena mempunyai nilai kalor yang relatif tinggi dan jumlahnya sangat melimpah. Tetapi, seperti biomassa lainnya, TKKS memiliki kelemahan bila digunakan sebagai sumber energi, yaitu kadar air yang tinggi (50-60%); densitas energi ( $\text{MJ/m}^3$ ) yang rendah; kadar bahan menguap tinggi (~70%); abu dengan kandungan logam alkali tinggi (Na, K); tinggi kadar oksigen; higroskopis; berat jenis (*bulk density*) rendah; bentuk tidak teratur; dan sulit digiling. Salah satu upaya untuk mengatasi kekurangan tersebut yaitu melalui proses peletisasi dilanjutkan dengan torefaksi.

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas pelet TKKS menjadi bahan bakar padat (*black pellet*) yang memiliki karakteristik dan mutu energetik lebih baik (densitas energi tinggi, kadar volatile rendah, dan *hydrophobic*). Pelet TKKS diperoleh dari pabrik pelet di Tebing Tinggi, Medan dengan ukuran diameter sekitar 8 mm. Pada awalnya proses torefaksi direncanakan menggunakan fasilitas reactor COMB (*Counter current flow Multi Baffle*) pada variasi temperatur 200-320°C dengan *residence time* 3 menit. Tetapi, ternyata reaktor ini tidak bisa bekerja untuk pelet TKKS karena lebih berat dibandingkan pelet kayu sehingga jatuh lebih cepat dan *residence time* tidak tercapai. Torefaksi akhirnya dilanjutkan secara batch menggunakan oven pada variasi suhu antara 200-300 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses selama 30 menit torefaksi menghasilkan pelet hitam dengan nilai energi mencapai 20,5 MJ/kg. Penelitian dilanjutkan dengan produksi pelet hitam menggunakan reaktor rotary pada waktu antara 20 hingga 40 menit, putaran lambat 16, 24, 31, dan 37 RPM, dan beban 100, 200, dan 300 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor rotary dapat bekerja dengan baik menghasilkan pelet hitam dengan rendemen sekitar 80%. Pelet hitam hasil torefaksi memiliki kadar air 1-2% dan nilai kalori antara 16.27 – 18.52, naik dari nilai pelet biasa 15,82 MJ/kg. Selain itu pelet torefaksi memiliki sifat *hydrophobic* dan bertahan direndam di dalam air hingga 12 jam tanpa mengalami keruntuhan fisik.

**Kata Kunci :** *Black pellet*, biomassa, bahan bakar, Torefaksi, TKKS.

## RINGKASAN EKSEKUTIF

Indonesia merupakan negara penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia dengan kontribusi mencapai hampir 60%. Eksport produk kelapa sawit merupakan sumber devisa yang penting dan industri pengolahan kelapa sawit (PKS) telah menyediakan kesempatan kerja bagi jutaan rakyat Indonesia. Selain volume produk utama berupa CPO, PKS juga menghasilkan limbah yang sangat besar, diantaranya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang mencapai 21-23% dari tandan buah segar (TBS) dan mencakup sekitar 50% dari total limbah padat yang dihasilkan PKS. TKKS umumnya dikembalikan ke lahan sebagai mulsa atau kompos. Bagi PKS yang tidak memiliki kebun, limbah TKKS tidak bisa dikembalikan ke lahan. Hal ini berpotensi pada pembusukan TKKS yang akan memicu GRK. Pada saat ini diperkirakan terdapat sekitar 20% PKS yang tidak memiliki kebun.

Pemakaian TKKS sebagai bahan bakar pembangkit listrik independen sampai saat ini masih sangat terbatas, baru sekitar 5%. Pemanfaatan TKKS sebagai sumber energi di dalam PKS kurang menarik. Secara teknis, TKKS belum diminati untuk dijadikan sebagai bahan bakar padat pada sistem pembakaran (*steam power plant*) atau gasifikasi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik TKKS yang tidak sesuai untuk bahan bakar, misalnya kadar air tinggi, densitas kamba rendah, nilai kalori rendah, dan densitas energi rendah, dan tidak homogen. Salah satu pilihan yang menarik untuk dikaji adalah konversi TKKS menjadi bahan pelet yang dilanjutkan dengan peningkatan mutu melalui proses torefaksi untuk menghasilkan *black pellet* yang memiliki karakteristik dan mutu energetik lebih baik (densitas energi tinggi, kadar volatile rendah, dan *hydrophobic*).

Pelet TKKS diperoleh dari pabrik pelet di Tebing Tinggi, Medan dengan ukuran diameter sekitar 8 mm. Pada awalnya proses torefaksi direncanakan menggunakan fasilitas reactor COMB (*Counter current fLOW Multi Baffle*) pada variasi temperatur 200-320°C dengan *residence time* 3 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor ini tidak bisa bekerja untuk pelet TKKS karena lebih berat dibandingkan pelet kayu sehingga jatuh lebih cepat dan *residence time* tidak tercapai. Torefaksi akhirnya

dilanjutkan secara batch menggunakan oven pada variasi suhu antara 200-300 °C. Hasil penelitian secara batch menunjukkan bahwa proses selama 30 menit torefaksi menghasilkan pelet hitam dengan nilai energi mencapai 20,5 MJ/kg. Penelitian dilanjutkan dengan produksi pelet hitam menggunakan reaktor rotary pada waktu antara 20 hingga 40 menit, putaran lambat 16, 24, 31, dan 37 RPM, dan beban 100, 200, dan 300 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor rotary dapat bekerja dengan baik menghasilkan pelet hitam dengan rendemen sekitar 80%. Pelet hitam hasil torefaksi memiliki kadar air 1-2% dan nilai kalori antara 16.27 – 18.52, naik dari nilai pelet biasa 15,82 MJ/kg. Selain itu pelet torefaksi memiliki sifat *hydrophobic* dan bertahan direndam di dalam air hingga 12 jam tanpa mengalami keruntuhan fisik.

## BAB I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kelapa sawit merupakan komoditas yang penting bagi ekonomi Indonesia. Eksport produk kelapa sawit merupakan sumber devisa yang penting dan industri pengolahan kelapa sawit (PKS) telah menyediakan kesempatan kerja bagi jutaan rakyat Indonesia. Oleh karena itu peningkatan produksi kelapa sawit sangat berkaitan dengan pertumbuhan daerah-daerah terpencil, menurunnya kemiskinan, dan meningkatnya standar hidup penduduk pedesaan (PASPI, 2014).

Selain volume produk utama berupa CPO, PKS juga menghasilkan limbah yang sangat besar, diantaranya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang mencapai 21-23% dari tandan buah segar (TBS) yang diolah dan mencakup sekitar 50% dari total limbah padat yang dihasilkan PKS. TKKS umumnya dikembalikan ke lahan sebagai mulsa atau kompos. Bagi PKS yang tidak memiliki kebun, limbah TKKS tidak bisa dikembalikan ke lahan. Hal ini berpotensi pada pembusukan TKKS yang akan memicu GRK. Pada saat ini diperkirakan terdapat sekitar 20% PKS yang tidak memiliki kebun.

Pemanfaatan TKKS sebagai sumber energi di dalam PKS kurang menarik. Hal ini terutama disebabkan PKS juga menghasilkan bahan bakar lain yang lebih baik, yaitu cangkang dan sabut sawit. Pemakaian TKKS sebagai bahan bakar pembangkit listrik independen sampai saat ini masih sangat terbatas, baru sekitar 5%. Secara teknis, TKKS belum diminati untuk dijadikan sebagai bahan bakar padat pada sistem pembakaran (*steam power plant*) atau gasifikasi, atau dijadikan komoditi perdagangan yang bernilai tambah. Hal ini disebabkan oleh karakteristik TKKS yang tidak sesuai untuk bahan bakar, misalnya kadar air tinggi, densitas kamba rendah, nilai kalori rendah, dan densitas energi rendah, dan tidak homogen.

Oleh karena itu, perlu dikembangkan sistem pengolahan TKKS menjadi bahan bakar padat dengan sifat fisik dan kimia yang lebih baik. Kulatitas TKKS sebagai bahan bakar dapat ditingkatkan melalui proses torefaksi, yaitu proses termal suhu 200 – 300°C dalam keadaan tanpa oksigen dan laju pemanasan rendah atau waktu tinggal (*residence time*) cukup lama. Melalui torefaksi akan dihasilkan *black pellet*, bahan bakar

mirip batubara. Bahan bakar ini lebih baik daripada biomassa asal karena memiliki nilai energi, densitas kamba, dan densitas energi lebih tinggi, bersifat *hydrophobic* (kurang menyerap air), dan memiliki rasio O/C lebih rendah.

## 1.2. Tujuan Khusus

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan kualitas TKKS menjadi bahan bakar padat untuk umpan gasifikasi yang memiliki karakteristik: kadar air (1%), nilai kalori (LHV) 5200 kcal/kg atau 22 MJ/kg, densitas kamba 700 kg/m<sup>3</sup>, densitas energi 15 MJ/m<sup>3</sup>, kadar volatile rendah, rasio O/C 0,2-0,3, dan bersifat *hydrophobic*.

## 1.3. Rumusan Masalah

Bagaimana menghasilkan *black pellet* yang berkualitas berdasarkan faktor-faktor ukuran cacahan TKKS, suhu torefaksi, dan laju aliran gas panas.

## 1.4. Urgensi Penelitian

Hasil penelitian ini dapat meningkatkan nilai ekonomi dari limbah TKKS sebagai bahan bakar padat. *Black pellet* bersifat terbarukan dan ramah lingkungan, sehingga dapat mengurangi bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

## 1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian dapat meningkatkan nilai tambah TKKS, mengurangi permasalahan yang timbul akibat limbah menumpuknya TKKS, dan mengurangi emisi GRK dari pembusukan TKKS. Selain itu terbuka kesempatan bagi PKS tanpa kebun untuk dapat memproses TKKS menjadi produk komoditas perdagangan.

## 1.6. Luaran yang Akan Diperoleh

Luaran adalah teknologi pembuatan *black pellet* TKKS yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pada proses gasifikasi atau menjadi komoditas perdagangan.

## 1.7. Kontribusi Lembaga dan Mitra

Saat ini Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Lampung bekerjasama dengan KIER (*Korea Institute of Energy Research*) Korea Selatan dan telah menginstal reaktor COMB yang dapat digunakan untuk proses torefaksi pellet TKKS. Sementara itu mitra PTPN VII Unit Usaha Bekri akan menyediakan TKKS.

## BAB II. STUDI PUSTAKA

### 2.1. Sawit Indonesia

Industri kelapa sawit berkembang dengan dukungan pertumbuhan perkebunan yang sangat pesat, terutama pada perkebunan besar (PB) dan perkebunan rakyat (PR). Pada tahun 2015 luas perkebunan sawit total telah mencapai 11,26 juta hektar dengan komposisi PR 40,23% dan PB 59,77% (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2017). Kelapa sawit diolah menjadi minyak sawit kasar (CPO) dan minyak inti sawit (PKO). Pada tahun 2015 total produksi CPO Indonesia mencapai 31,07 juta ton dari luas perkebunan kelapa sawit 11,26 juta ha (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2017). Indonesia kini merupakan penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia, dengan kontribusi mencapai lebih dari 50%. Produksi CPO Indonesia diproyeksikan mencapai 43,93 juta ton pada tahun 2020 dari luas perkebunan kelapa sawit 13,3 juta ha (GAPKI, 2014).

Perkembangan industri kelapa sawit yang cepat dipengaruhi oleh permintaan dunia yang sangat besar terhadap produk-produk kelapa sawit. Permintaan minyak sawit dunia diprediksi mencapai 95,7 juta ton pada 2025 (Oil World Statistic, 2013). Perkembangan minyak sawit juga dipicu oleh naiknya produksi biodiesel dari CPO di negara-negara utama sawit seperti Indonesia (Caroko *et al.*, 2011), Malaysia (Sumathi *et al.*, 2007), Brazil (da Costa, 2004), dan Thailand (Pleanjai *et al.*, 2007).

Kelapa sawit telah menjadi sumber devisa bagi Indonesia. Jika pada tahun 2008, volume ekspor minyak sawit kasar (CPO) dan produk-produk terkait baru mencapai 14,29 juta ton dengan nilai US\$ 12,38 milyar, maka pada 2015, volume ekspor telah menjadi dua kali lipat (28,29 juta ton dengan nilai US\$ 16,95 milyar (BPS, 2016) dan menjadi US\$ 23 milyar pada tahun 2017 (Tim Riset PASPI, 2018).

Perkembangan ini sangat berperan dalam pertumbuhan daerah terpencil dan telah meningkatkan standar hidup penduduk pedesaan. Hal ini ditunjang oleh fakta bahwa sekitar 40% lahan kelapa sawit dimiliki oleh petani kecil. Selain itu, industri kelapa sawit termasuk industri yang padat tenaga kerja. Jumlah tenaga kerja yang terserap dalam industri kelapa sawit telah meningkat dari 2,1 juta di tahun 2000 hingga 8,4 juta pada

tahun 2015 (PASPI, 2016). Oleh karena itu, pengembangan kelapa sawit telah menciptakan lapangan kerja baru dan meningkatkan pendapatan petani.

## 2.2. Proses Ekstraksi Minyak Sawit

Untuk mengekstrak minyak sawit, tandan buah segar (TBS) akan mengalami serangkaian proses. Proses ekstraksi CPO dimulai dengan sterilisasi TBS menggunakan uap, diikuti dengan penebahan (*threshing* atau *stripping*) untuk memisahkan brondolan buah dari tangkai buah dan spikeletnya. Brondolan buah lalu dilumatkan (*digestion*) dan dipisahkan daging buahnya dari biji kelapa sawit diikuti dengan pengempaan (*pressing*) untuk memeras minyaknya. Setelah proses separasi, klarifikasi dan pengeringan minyak, maka CPO siap untuk disimpan. Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan CPO sebanyak 21,8% dari berat TBS yang diolah. Selebihnya industri kelapa sawit menghasilkan limbah padat, cair, dan gas.

## 2.3. Limbah Padat

Selain produk utama CPO, pabrik pengolahan kelapa sawit juga menghasilkan sejumlah produk samping dalam bentuk TKKS (23.0% TBS), POME (50%), sabut (13.0%), cangkang (6.5%), dan solid decanter (4%) (Ditjen PPHP, 2006). PKS juga menghasilkan limbah abu boiler sebanyak 0,5-0,6% TBS (Hasanudin *et al.*, 2007).

### 2.3.1. Cangkang dan Sabut

Cangkang dan sabut dihasilkan dari proses pelumatan dan pengempaan. Proses ini menghasilkan minyak kasar, dan produk samping biji atau kacang sawit. Kacang sawit dialirkan ke unit proses *depericarping* untuk memisahkan sabut, dan kacang yang sudah bersih dipecah untuk menghasilkan inti sawit (*kernel*). Melalui proses penampian (*winnowing*), kernel akan dipisahkan dari cangkangnya dan diproses lebih lanjut untuk menghasilkan minyak inti sawit (PKO).

Cangkang dan sabut umumnya dipakai secara langsung sebagai bahan bakar boiler terutama untuk memenuhi kebutuhan energi dan steam untuk proses pengolahan kelapa sawit. Sabut dan cangkang kelapa sawit dapat dikonversi menjadi energi dengan nilai kalor berturut-turut 19,055 MJ dan 20,093 MJ per kg bahan kering. Jumlah



sabut dan cangkang yang digunakan untuk pembangkit listrik dan uap di PKS masing-masing sekitar 85% sabut dan 55% cangkang dari total yang dihasilkan. Sisa sabut dan cangkang dijual ke industri lain seperti untuk pembangkit listrik independen.

### 2.3.2. Abu boiler dan Solid Decanter

Abu dihasilkan dari boiler pembangkit listrik dan panas proses. Abu boiler dari PKS dikembalikan ke kebun dan digunakan sebagai pupuk pengganti unsur K, terutama di lahan gambut. Kandungan nutrisi dari abu antara lain adalah 4%  $P_2O_5$ , 40%  $K_2O$ , 6%  $MgO$  dan 5%  $CaO$ . Tiap kilogram abu TKKS setara dengan dengan 0,6 Kg MOP. Abu boiler sangat higroskopis dan mempunyai pH 12. Nutrisi yang terkandung di dalamnya sangat mudah larut, sehingga harus cepat diaplikasikan.

Solid decanter dihasilkan dari proses dekantasi. Solid decanter berasal dari mesocarp atau serabut berondolan sawit yang telah mengalami pengolahan di PKS. Produksi solid decanter basah sekitar 5% dan produksi solid decanter kering sekitar 2% dari berat TBS. Solid decanter lebih mudah terurai di lapangan dan akan melapuk dalam waktu 6 minggu. Dibandingkan dengan TKKS kandungan nutrisi solid decanter lebih tinggi, yaitu N (2,9%),  $P_2O_5$  (0,46%),  $K_2O$  (4,09%), dan  $MgO$  (0,56%). Setiap 100 kg seolid decanter mengandung pupuk yang setara dengan Urea (3,52 kg), RP (0,99 kg), MOP (4,43 kg), dan Kiserit (1,36 kg).

### 2.3.3. Tandan Kosong

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dihasilkan dari proses penebahan (*stripping*) yang memisahkan buah sawit menjadi berondolan. TKKS merupakan limbah padat dengan persentase paling besar yang dihasilkan dari proses pengolahan CPO yaitu sekitar 21-23 persen. Apabila TKKS tidak dimanfaatkan dengan baik maka akan menimbulkan masalah lingkungan karena jumlahnya yang sangat besar. TKKS merupakan bahan organik yang mengandung 42,8% C, 2,90%  $K_2O$ , 0,80% N, 0,22%  $P_2O_5$ , 0,30%  $MgO$  dan unsur-unsur mikro antara lain 10 ppm B, 23 ppm Cu dan 51 ppm Zn. Mineral lain yang penting adalah potassium (1,12%) dan kalsium (0,16%) (Lim *et al.*, 2015). Dalam setiap 1 ton TKKS terkandung unsur hara yang setara dengan 3 Kg Urea, 0,6 kg RP, 12 kg MOP dan 2 kg kiserit (Singh *et al.*, 1989).



Selama ini TKKS umumnya dikembalikan ke lahan sebagai mulsa dengan dosis 37,5 ton/ha/tahun. Mulsa TKKS dapat memperbaiki pertumbuhan vegetatif, memperbaiki nutrisi yang dapat diserap oleh perakaran tanaman, dan meningkatkan produktifitas tanaman kelapa sawit. Selain itu, mulsa TKKS juga mampu mengurangi erosi, mengurangi kehilangan nutrisi, menurunkan suhu permukaan tanah, dan menyediakan suplai nutrisi secara perlahan (*slow release*) dalam waktu lama.

TKKS juga dapat diaplikasikan sebagai kompos untuk menggantikan pupuk kimia diperkebunan kelapa sawit. Kompos TKKS memiliki sifat yang menguntungkan, antara lain: (1) memperbaiki struktur tanah menjadi lebih *porous*; (2) membantu kelarutan unsur-unsur hara yang diperlukan bagi pertumbuhan tanaman; (3) homogen dan mengurangi risiko sebagai pembawa hama; (4) merupakan pupuk yang tidak mudah tercuci oleh air yang meresap dalam tanah dan (5) dapat diaplikasikan pada sembarang musim (Darnoko *et al.*, 1993).

Meskipun pengomposan tandan buah kosong dalam kondisi aerobik lebih efektif, proses ini memerlukan mesin pengaduk (pembalik) dan tenaga kerja intensif (Kananam *et al.*, 2011). Sampai sekarang, sebagian besar PKS belum memiliki unit pengomposan TKKS dan masih terus mempraktekkan metode pembakaran atau aplikasi lahan langsung sebagai mulsa (Chiew dan Shimada 2013).

#### **2.4. PKS Tanpa Kebun**

Untuk PKS yang memiliki kebun, limbah TKKS telah dimanfaatkan dengan cara dikembalikan ke kebun. Tetapi, untuk PKS yang tidak mempunyai kebun, limbah TKKS tetap akan menjadi masalah. Tidak ada data pasti mengenai jumlah PKS tanpa kebun, tetapi menurut perkiraan cukup signifikan. Hal ini dapat dirunut dari data luas kebun dan jumlah PKS di Indonesia. Pada tahun 2013 tercatat ada 1601 perusahaan sawit yang terdiri dari 159 Perusahaan Besar Negara dan 1442 Perusahaan Swasta (BPS, 2014). Berdasarkan data luas kebun pada tahun 2013 (10,465 juta ha), berarti setiap 6000 ha diperlukan satu unit PKS. Pada tahun 2006 luas perkebunan sawit total mencapai 6,59 juta ha, sehingga diperkirakan terdapat sekitar 1100 PKS. Pada tahun 2006 terdapat 219 PKS tanpa kebun yang berarti sekitar 20% dari total PKS.

## 2.5. Torefaksi Biomassa

Tandan kosong kelapa sawit juga berpotensi digunakan sebagai sumber energi karena mempunyai nilai kalor yang relatif tinggi, yaitu 18,24 MJ/ton (Maryudi, 2014) dan jumlahnya sangat melimpah. Potensi energi dari pemanfaatan TKKS adalah sekitar 1.202.880 MJ/hari atau setara 30 kiloliter solar/bulan untuk pabrik dengan kapasitas 800 ton TBS/hari. Akan tetapi, sebagaimana biomassa lainnya, TKKS mempunyai kelemahan apabila digunakan sebagai sumber energi, yaitu kadar air yang tinggi (50-60%); nilai kalori (*heating value*, MJ/ton) dan densitas energi (MJ/m<sup>3</sup>) yang rendah; tinggi kadar bahan menguap (~70%); kadar abu rendah dengan kandungan logam alkali tinggi (Na, K); tinggi kadar oksigen; higroskopis; densitas kamba (*bulk density*) rendah; bentuk tidak teratur; dan sulit digiling.

Beberapa isue penting terkait dengan bahan bakar biomassa adalah (Tumuluru *et al.*, 2011; Alamsyah *et al.*, 2017): (1) nilai energi rendah akibat tingginya kadar air; (2) densitas energi rendah akibat densitas kamba rendah; (3) densitas kamba yang rendah juga menyulitkan logistik dan transportasi; (4) sifat higroskopis menurunkan daya simpan; (5) kadar bahan volatile tinggi mengakibatkan efisiensi pembakaran rendah dan menghasilkan banyak asap; (6) kandungan bahan anorganik (Ca, Si, K) yang tinggi menimbulkan masalah terkait abu (sintering, fusi, aglomerasi, slagging); (7) ukuran, bentuk dan tipe yang tidak seragam menyulitkan penanganan dan penyimpanan.

Torefaksi, merupakan suatu proses termal, dapat mengatasi sebagian besar issue tersebut. Sebagai suatu proses, torefaksi memiliki sejarah panjang, yang dapat dijumpai pada torefaksi (penyangraian) biji kopi untuk memperoleh cita rasa khas. Tetapi, aplikasinya pada bioenergi, teknologi ini masih relatif baru, yaitu di Perancis pada pertengahan 1980-an (Acharya *et al.*, 2012). Pada dekade terakhir terjadi peningkatan perhatian yang signifikan pada torefaksi dalam kaitannya dengan bioenergi.

Torefaksi melibatkan proses pemanasan biomassa hingga suhu 200 – 300°C dalam keadaan tanpa oksigen dan laju pemanasan rendah atau waktu tinggal (*residence time*) cukup lama (30 menit – 2 jam). Torefaksi serupa dengan pirolisis pada suhu dan laju pemanasan rendah. Torefaksi menghasilkan bahan *black pellet*, bakar padat menyerupai batubara yang memiliki karakteristik bahan bakar lebih baik dibandingkan

biomassa asalnya (Chen *et al.*, 2015). Proses torefaksi menghancurkan ikatan inherent di dalam biomassa. Hemiselulosa akan terdekomposisi terlebih dahulu dan diikuti oleh selulosa dan lignin, secara berurutan (Chen dan Kuo, 2010). Struktur biomassa berubah sedemikian hingga material menjadi getas, dan lebih hydrophobic.

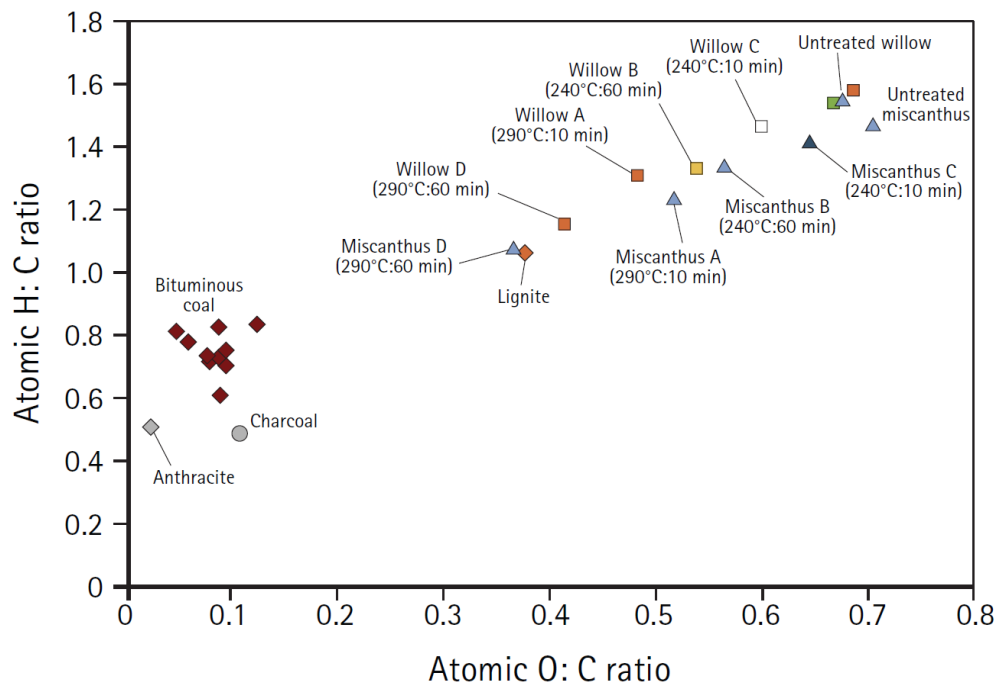
Produk torefaksi terdiri dari 80% padat (arang dan abu), 15% cair (air, organik, lemak), 5% gas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) (Acharya *et al.*, 2012; Tumuluru *et al.*, 2011). Produk padat merupakan produk yang diinginkan (Wang *et al.*, 2011). Produk padat torefaksi mirip batubara (Bergman, 2005) dan memiliki sifat sebagai berikut:

- a. Hydrophobic (kurang menyerap air) akibat hancurnya struktur ikatan O–H sehingga tidak mampu mempertahankan atau menyerap air. Hal ini sangat menguntungkan untuk proses penanganan, penyimpanan, dan transportasi.
- b. Aktivitas biologis dari biomassa (dekomposisi, jamur, pembusukan) produk torefaksi sangat rendah sehingga memperpanjang umur simpan tanpa degradasi.
- c. Menghasilkan biomassa yang lebih getas sehingga menurunkan energi untuk penggilingan hingga 80-90% dibandingkan biomassa asal. Ukuran dan distribusi partikel dari penggilingan biomassa torefaksi lebih seragam daripada biomassa asal. Biomassa torefaksi memiliki derajat giling (*grindability*) sebanding dengan batubara
- d. Porositas produk torefaksi meningkat sehingga bahan bakar menjadi lebih reaktif selama pembakaran dan gasifikasi. Biomassa torefaksi memiliki reaktivitas sebanding dengan kayu.
- e. Memudahkan proses pelletisasi biomassa karena fraksi lignin meningkat dengan 10-15% dan makin tingginya struktur lemak meningkatkan daya ikat (*binding*).
- f. Densitas energi meningkat karena massa biomassa turun menjadi sekitar 70% sedangkan nilai energi turun menjadi 90% dari nilai awal sehingga energi per satuan massa naik menjadi sekitar 1,3 kali nilai awal (Tabel 1).
- g. Torefaksi menghasilkan output yang homogen (sifat fisik dan kimia) dari biomassa campuran sehingga memungkinkan pelletisasi berbagai jenis biomassa dengan satu mesin saja dan meningkatkan ekonomi pellet biomassa.
- h. Pellet yang mengalami torefaksi lebih kuat 1,5 hingga 2 kali sehingga tidak mudah pecah dalam proses penanganan dan penyimpanan.

Tabel 1. Karakteristik energi produk torefaksi (Dutta and Leon, 2011)

Karakteristik	Chip Kayu	Chip Torefaksi	Pellet kayu	Pellet Torefaksi
Densitas energi (GJ/m <sup>3</sup> )	6,5	7,5	11	16
Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )	400	300	800	700
Kadar air (%)	35	4	8	4

- i. Memungkinkan pemanfaatan beragam jenis biomassa kayu untuk energi dengan satu peralatan pembakaran sehingga meningkatkan ketersediaan bahan bakar, reliabilitas suplai, dan menurunkan biaya bahan bakar dan mengurangi ongkos penanganan dan penyimpanan.
- j. Biomassa torefaksi memiliki rasio O/C (Gambar 2.1) dan kandungan zat-zat volatil rendah sehingga meningkatkan kualitas pembakaran (tanpa asap) dan menghasilkan efisiensi yang tinggi selama gasifikasi.



Gambar 2.1 Diagram van Krevelen untuk willow dan miscanthus (Tumuluru *et al.*, 2011)

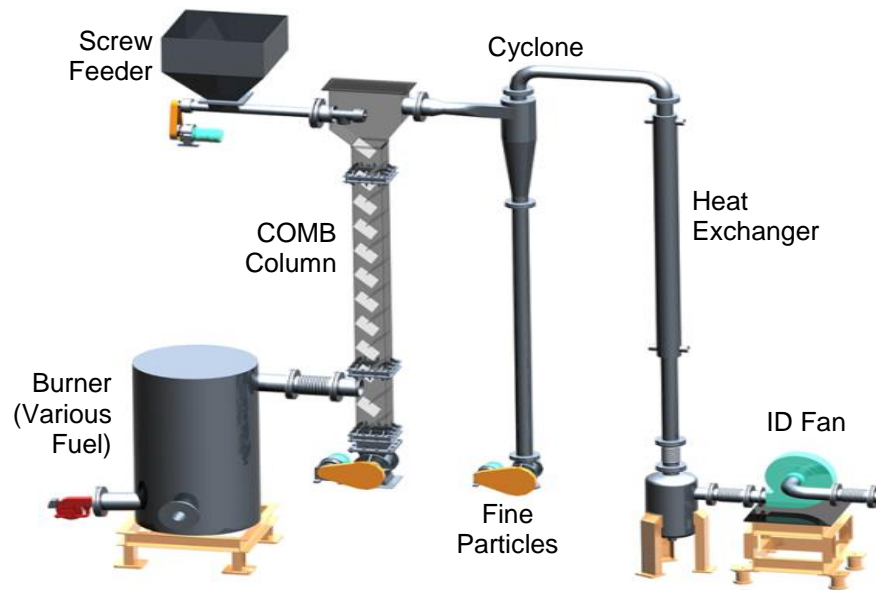
Torefaksi digunakan sebagai perlakuan awal (*pre-treatment*) pada teknologi konversi biomassa seperti gasifikasi dan *co-firing* (pembakaran bersama dengan batubara) (van der Stelt *et al.*, 2011). Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Semakin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun (Irawan *et al.*, 2014). Tabel 1 menunjukkan perbandingan karakteristik produk torefaksi terhadap kayu dan pellet kayu.

Bergantung pada jenis dan kondisinya, biomassa perlu melalui serangkaian proses untuk menjadi *black pellet*. Beberapa tahapan penting meliputi pengeringan, pengecilan ukuran (*chipping, chopping, atau cutting*), penggilingan (*grinding, milling*), peletisasi, torefaksi, dan pendinginan. *Black pellet* sebagai produk utama torefaksi dapat dihasilkan melalui dua rute. Pertama, biomassa dibuat menjadi pellet (*white pellet*) lalu dilanjutkan dengan torefaksi untuk menghasilkan *black pellet*. Pilihan kedua, biomassa mengalami torefaksi lebih dahulu, lalu digiling dan dibuat menjadi *black pellet*. Pilihan pertama memberikan kemungkinan dihasilkannya dua produk pellet (hitam dan putih). Meskipun hanya menghasilkan satu produk (pellet hitam), pilihan kedua menawarkan kemudahan dalam penggilingan biomassa torefaksi yang lebih hemat energi.

## 2.6. Reaktor COMB

Berkat kerjasama dengan KIER (Korea Institute of Energy Research) Korea Selatan, kini LPPM Unila telah memiliki reaktor (dryer/pyrolizer) COMB (*Counter current fLOW Multi Baffle*) yang dapat digunakan untuk melakukan proses torefaksi pellet TKKS. Reaktor ini memiliki kapasitas proses 20 kg/jam dengan suhu bervariasi antara 200 hingga 300°C dan waktu tinggal 3 menit (Lee, 2017).

Reaktor COMB merupakan suatu reaktor yang selain berfungsi untuk melaksanakan reaksi pirolisis pada kondisi inert. Reaktor torefaksi COMB memiliki enam bagian, yaitu: bagian pengumpanan (*feeding*) biomassa; bagian kolom reaktor, dimana biomassa mengalami torefaksi; bagian pendinginan gas (*gas cooler*); bagian pembakar (*combustor*); bag filter untuk menyaring partikel dari gas hasil torefaksi; dan induction drag fan untuk menyedot gas hasil torefaksi (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Bagian-bagian reaktor COMB

Selain berfungsi sebagai reaktor torefaksi, alat ini juga berfungsi sebagai alat pengering. Pada reaktor ini, biomassa diumpankan pada bagian atas kolom, sedangkan aliran gas panas dialirkan dari bagian bawah kolom. Oleh karena di dalam kolom dilengkapi dengan *baffle* yang disusun pada kemiringan tertentu, maka pellet biomassa akan jatuh ke bawah dan kontak dengan aliran gas panas. Panas yang diperlukan untuk proses torefaksi diperoleh dari pembakaran LPG pada combustor. Gas panas hasil pembakaran dialirkan ke reaktor dari bagian bawah kolom. Selanjutnya gas panas akan berkontak secara berlawanan arah dengan pellet yang jatuh melalui sudu setiap *baffle*. Beberapa keuntungan menggunakan reaktor ini adalah: (1) rasio gas terhadap padatannya rendah, (2) waktu tinggal sangat singkat (3 menit), (3) temperature difference terjadi di sepanjang kolom, (4) sangat fleksibel dan mudah diatur posisinya.

## 2.7. Aplikasi dan Pasar Torefaksi Biomassa

Aplikasi dan pasar torefaksi biomassa meliputi pemanfaatan sebagai bahan bakar untuk pemanasan fasilitas perumahan dan komersial, bahan bakar untuk pembangkit listrik baik melalui co-firing pada pembangkit batu bara maupun menggunakan unit gasifikasi sendiri. Prins *et al.* (2006) menyimpulkan bahwa gasifikasi produk torefaksi lebih efisien dibandingkan dengan gasifikasi kayu tanpa torefaksi. Biomassa torefaksi juga dimanfaatkan untuk bahan bakar pada pabrik (peleburan) baja. Melalui proses



Fischer–Tropsch juga dapat dihasilkan bahan bakar cair (bio-gasoline) untuk transportasi dari biomassa torefaksi. Kini, bahan bakar padat produk torefaksi juga menjadi komoditas ekspor yang kompetitif di pasaran USA dan Eropah.

## BAB III. METODE Riset

### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan selama 2 (dua) tahun, sejak tahun 2018 hingga tahun 2019 di Workshop Teknologi Hasi Hutan Laboratorium Lapang Terpadu, Laboratorium Bioproses Jurusan Teknik Pertanian, Laboratorium Kimia Terapan Jurusan Teknik Kimia, dan Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung. Roadmap penelitian selama dua tahun disajikan pada Gambar 3.1.

### 3.2. Bahan dan Metode

Bahan baku untuk penelitian ini adalah pelet TKKS yang diperoleh dari PT. Toba Hijau Sinergy, Tebing Tinggi, Sumatera Utara. Bahan lain untuk analisis kimia meliputi aquades, bahan kimia  $H_2SO_4$ . Tahap-tahap proses pembuatan *black pellet* terlihat pada Gambar 3.2

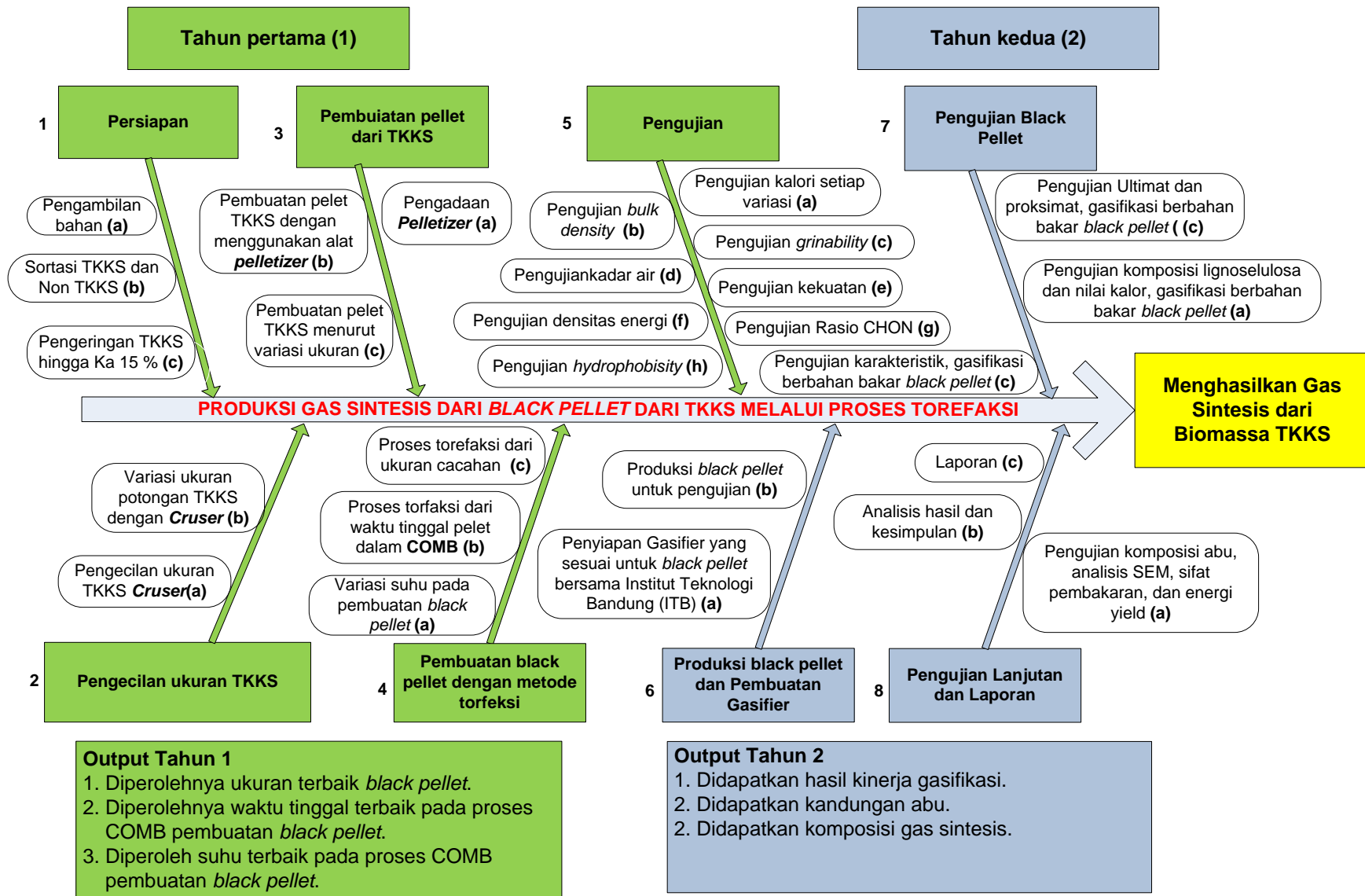
#### 3.2.1. Pembuatan *White Pellet*

Untuk mengetahui pembuatan pelet TKKS, kami melakukan kunjungan lapangan ke PT. Toba Hijau Sinergy, Tebing Tinggi, Sumatera Utara.

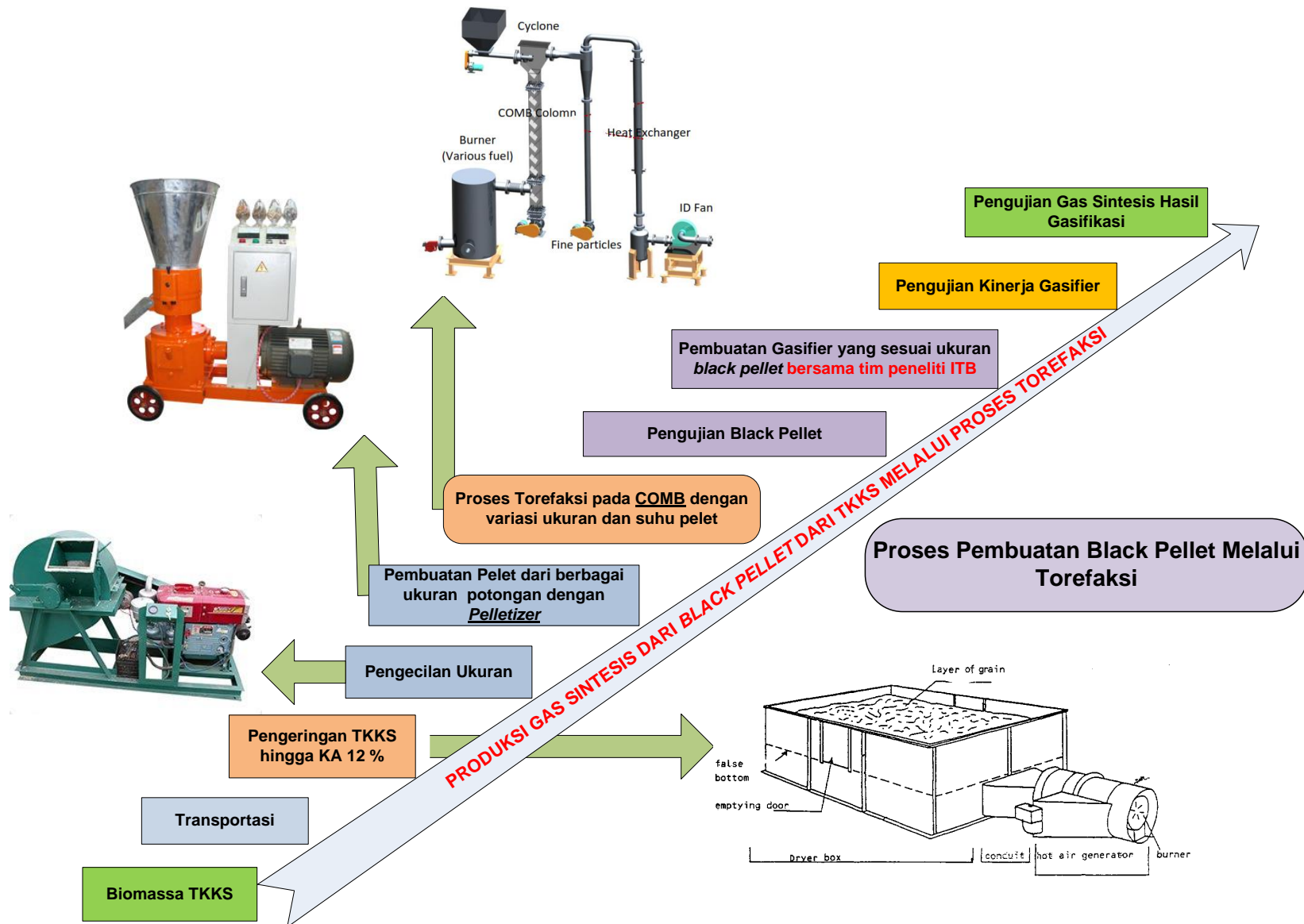
#### 3.2.2. Torefaksi Pellet

Torefaksi *White Pellet* dilakukan pada suhu antara 200 – 300°C dengan waktu tinggal 3 menit. Penjelasan teknis peralatan yang digunakan dijelaskan pada Gambar 3.2.





Gambar 3.1 Roadmap Penelitian pembuatan *black pellet* dari TKKS



Gambar 3.2 Perancangan Teknis pembuatan *black pellet* dari TKKS

### 3.2.3 Analisis Sifat Pelet

Analisis proksimat pelet dilakukan untuk mengetahui karakteristik seperti kadar air, kadar abu, nilai kalori dan komposisi kimia. Sedangkan analisis ultimat dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia abu. Uji hydrophobicity pelet dilakukan dengan cara merendam pelet di dalam air dan mengamati perubahannya selama 12 jam.

### 3.3. Parameter dan Metode Analisis

Parameter dan metode analisis diringkas pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter dan metode analisis

Parameter	TKKS	<i>White Pellet</i>	<i>Black pellet</i>
Proksimat (KA, Volatil, FC, abu)	OK		OK
Ultimat (C, H, O, N, P)	OK		OK
Komposisi lignoselulosa	OK		OK
Nilai kalor	OK	OK	OK
Densitas	OK	OK	OK
<i>Hidropobicity</i>		OK	OK
Kekuatan mekanis (kuat tekan)		OK	OK
Komposisi abu (mineral Ca, Na, K, Si)	OK	OK	OK
Morfologi bahan	OK	OK	OK
<i>Energy density</i>	OK	OK	OK
<i>Energy yield</i>	OK	OK	OK

## BAB IV. LUARAN

Luaran yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Teknologi pembuatan pellet hitam dari TKKS
2. Produk pellet hitam
3. Publikasi pada jurnal (nasional/internasional)

## V. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Pelet dan Nilai Komersial

Pelet biomasa merupakan bahan yang memiliki nilai komersial menjanjikan. Pertama, pelet dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk rumah tangga, industri kecil, maupun industri besar. Penggunaan pelet sebagai bahan bakar dapat menghasilkan nyala api yang lebih bersih karena berkurangnya asap. Hal ini akan meningkatkan kesehatan lingkungan rumah tangga. Berdasarkan survey kami, pelet biomasa digunakan sebagai bahan bakar pada industri tahu di Bandar Lampung. Sebuah industri tahu dengan kapasitas 1 ton kedelai per hari memerlukan bahan bakar pelet sebanyak setengah ton per hari. Industri tersebut membeli pelet kayu dengan harga 1500 Rp/kg. Harga ini cukup menarik bagi produsen pelet yang bahan bakunya tersedia secara cuma-cuma, misalnya dengan memanfaatkan limbah padat seperti TKKS yang dihasilkan dari suatu pabrik pengolahan kelapa sawit. Oleh karena itu, pelet TKKS memiliki prospek ekonomi yang menjanjikan.

Kegunaan lain yang diperoleh dari survei lapangan adalah penggunaan pelet untuk alas kandang kelinci atau hamster. Kelinci menghasilkan kotoran dan air kencing yang banyak. Lingkungan yang basah dan kotor tidak baik bagi kelinci karena menjadi sumber berbagai penyakit dan juga menghasilkan bau tidak sedap bagi pekerja. Penggunaan pelet kayu akan menyerap air kencing kelinci dan menghasilkan lingkungan kandang yang baik.

Selain menjadi bahan bakar, pelet yang sudah mengalami proses torefaksi juga dapat digunakan sebagai bahan amendement tanah untuk sumber karbon. Proses pelepasan karbon dari pelet torefaksi akan berlangsung lambat sehingga bisa bertahan lama di dalam tanah.

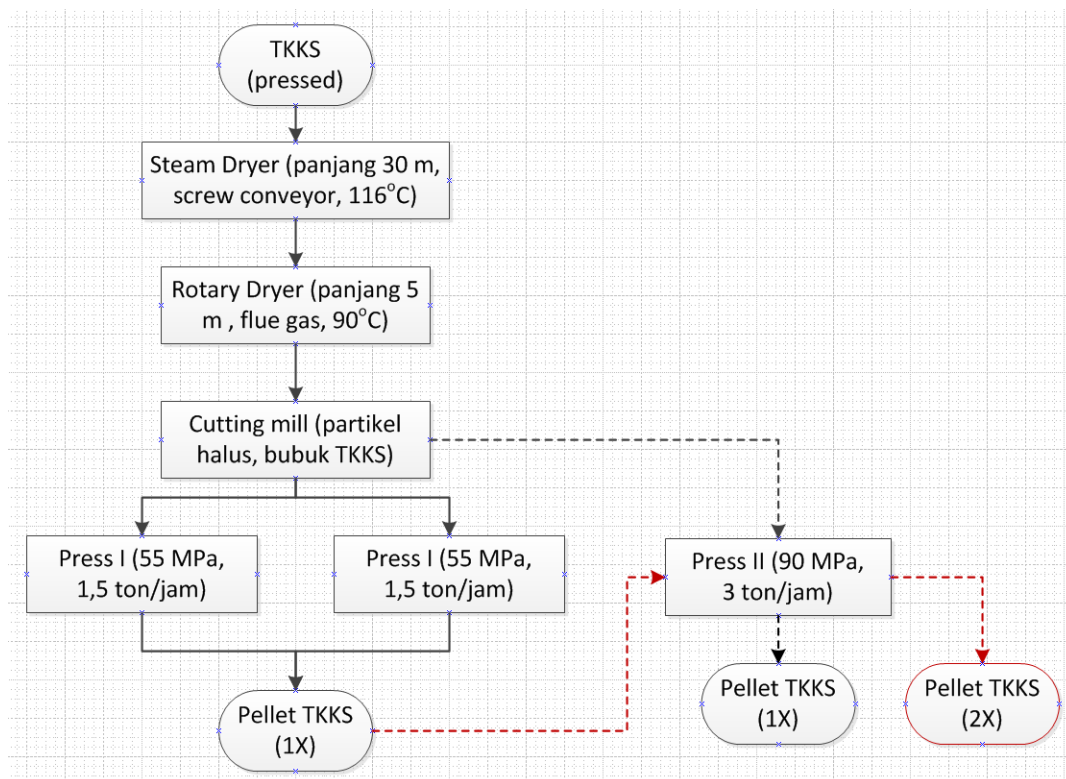
### 5.2 Proses pembuatan pelet

Untuk mengetahui proses pembuatan pelet TKKS, tim peneliti BPDP melakukan kunjungan ke pabrik pengolahan sawit PT. Tunas Harapan Sawit di

Tebing Tinggi (Sumatera Utara) pada 7 januari 2019 (Gambar 5-1). Perusahaan ini mengolah TKKS menjadi pelet di bawah naungan PT. Toba Hijau Sinergy.



Gambar 5-1. Kunjungan tim peneliti ke PT. Toba Hijau Sinergy



Gambar 5-2. Diagram alir proses pembuatan pelet TKKS di PT. THS, Tebing Tinggi (garis putus-putus adalah jalur optional)



Proses pembuatan pelet TKKS di PT. Toba Hijau Sinergy dapat dijelaskan secara ringkas melalui diagram alir pada Gambar 5-2. Mula-mula TKKS yang sudah dicacah (*shredded*) dialirkan dalam suatu pengering uap (*steam dryer*) melalui *screw conveyor* sepanjang 30 m yang bersuhu 116 °C. Steam yang digunakan untuk pengeringan diperoleh dari sisa steam dari pabrik pengolahan kelapa sawit. Keluar dari steam dryer, TKKS dikeringkan lagi di dalam rotary dryer (Gambar 5-3) sepanjang 5 m dan suhu 90 °C. Rotary dryer memanfaatkan gas buangan (*flue gas*) dari pabrik sawit. Dengan demikian panas yang digunakan pada proses pengeringan TKKS diperoleh secara cuma-cuma dari pabrik sawit.



Gambar 5-3. Rotary dryer untuk mengeringkan TKKS di PT. THS

Selanjutnya TKKS yang sudah kering dihancurkan (dicacah) di dalam *cutting mill* menjadi partikel halus. Bubuk TKKS selanjutnya dialirkan ke mesin pencetak pelet I tipe *vertical ring die* yang bekerja pada tekanan 55 MPa. Tersedia dua mesin pencetak pelet I dengan kapasitas masing-masing 1,5 ton/jam (Gambar 5-4). Pelet yang dihasilkan dari mesin pencetak pelet I dinamakan pelet single pres (1X). Jika konsumen menghendaki pelet yang lebih keras, pelet single pres dialirkan ke mesin pencetak pelet II yang bekerja dengan tekanan 90 MPa dan kapasitas 3 ton/jam. Pelet yang dihasilkan dari mesin ini dinamakan pelet double pres (2X). Jika

permintaan pelet tinggi, maka mesin pelet pres II dapat dioperasikan sebagai mesin pres 1X sehingga total kapasitas bisa mencapai 6 ton/jam (pelet 1X pres). Jika dioperasikan semua dengan sekali pengepresan, kapasitas total PT. Toba Hijau Sinergy adalah 6 ton/jam. Dengan kapasitas ini, PT. Toba Hijau Sinergy mampu menangani semua TKKS yang dihasilkan dari PT. Tunas Harapan Sawit.



Gambar 5-4. Mesin pencetak pelet TKKS tipe *vertical ring die*.



Gambar 5-5. Pelet TKKS yang dihasilkan di PT. Toba Hijau Sinergy



Dapat diduga bahwa pelet 2X memiliki masa jenis lebih tinggi daripada pelet single pres. Warna pelet double pres juga lebih gelap jika dibandingkan pelet single pres. Dari contoh pelet yang kami peroleh, pelet single pres lebih rapuh dibandingkan pelet double pres yang terlihat dari banyaknya serbuk serpihan (rontokan) pelet selama perjalanan.

### 5.3 Karakteristik Fisik Pelet TKKS

Karakteristik pelet TKKS sangat penting dalam kaitannya dengan proses torefaksi yang akan dilaksanakan. Pelet TKKS kami terima dari PT. Toba Hijau Synergi, Tebing Tinggi, Sumatera Utara. Pelet TKKS yang kami terima ada dua jenis berdasarkan tekanan yang diberikan pada saat pembuatan pelet, yaitu pelet 1X pres dan pelet 2X pres. Kedua jenis pelet ini memiliki penampang melintang berbentuk heksagonal (segi 6 beraturan) seperti pada Gambar 5-6.



Gambar 5-6. Penampang melintang dan bentuk pelet TKKS yang diperbesar (D = diameter dalam)



Gambar 5-7. Bentuk pelet TKKS: 1X pres (kiri) dan 2X press (kanan)

Secara visual pelet TKKS 2X pres memiliki warna yang lebih gelap dibandingkan pellet 1X. Pelet 2X juga memiliki tekstur lebih keras, dan bobot lebih besar. Tetapi pelet 2X pres memiliki ukuran (diameter) lebih kecil. Gambar 5-7 memperlihatkan perbedaan visual dari kedua jenis pelet ini.

Pelet TKKS ternyata memiliki sifat yang mudah rusak (hancur), terutama jika disimpan di ruang terbuka. Seperti diketahui wilayah tropis seperti Indonesia memiliki udara lingkungan dengan kelembaban tinggi. Pelet yang belum mengalami torefaksi memiliki sifat higroskopis dan mudah menyerap air yang terkandung di dalam udara yang lembab sehingga pelet menjadi cepat rusak. Pelet TKKS yang disimpan di ruang terbuka tidak akan bertahan sampai satu bulan. Pelet akan menjadi rapuh dan kehilangan konsistensi sehingga hancur menjadi serbuk tanpa ikatan. Gambar 5-8 memperlihatkan kondisi pelet TKKS yang telah rusak akibat disimpan dengan cara yang tidak benar.

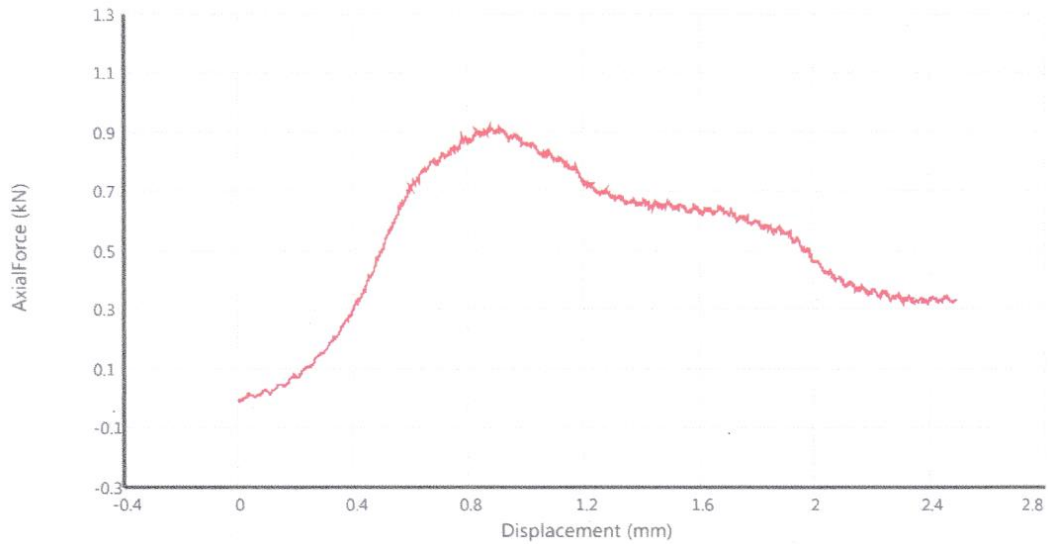


Gambar 5-8. Penyimpanan pelet TKKS lebih dari 1 bulan (rusak)

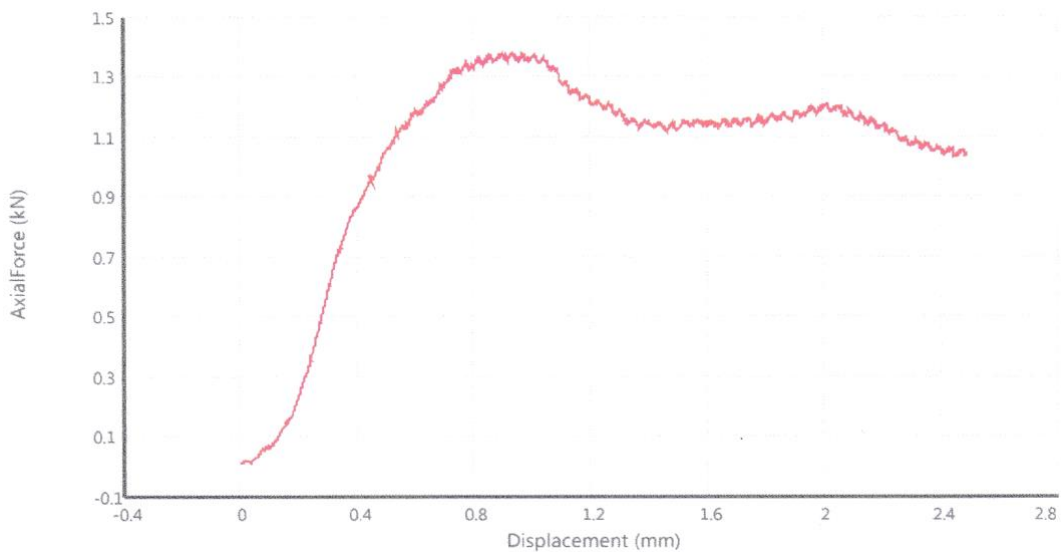
Hasil pengujian menunjukkan bahwa pellet 2X memiliki kekuatan lebih besar daripada pellet 1X. Pellet TKKS 2X memiliki kekuatan tekan proporsional (flexural force) rata-rata 110,23 kgf, lebih tinggi daripada pellet 1X (100,53 kgf) seperti diberikan pada Tabel 5-1. Gambar 5-9 memperlihatkan contoh hasil pengujian kekuatan tekan pellet menggunakan alat uji sesuai dengan standar ASTM C2293.

Tabel 5-1. Hasil uji kuat tekan (dalam kgf) pellet TKKS

Uji	Pellet 1X	Pellet 1X
1	107.385	79.836
2	93.676	51.329
Rata-rata	100.531	110.228



Flexural strength proportional 93.676 kgf (Pellet TKKS 1X)



Flexural strength proportional 140.619 kgf (Pellet TKKS 2X)

Gambar 5-9. Hasil uji kuat tekan (flexural strength) pelet TKKS

Hal ini berarti bahwa tekanan yang dipalikasikan dalam proses pembuatan pellet sangatlah penting untuk menghasilkan pellet yang berkualitas. Menurut Stelte et al. (2012) tekanan yang diberikan dalam pembuatan pelet berpengaruh terhadap densitas dan durabilitas pellet yang dihasilkan. Pembuatan pellet biomassa umumnya memerlukan tekanan lebih dari 50 MPa.

Tabel 5-2 menampilkan karakteristik pelet tunggal (*single*) TKKS 1X pres dan Tabel 5-3 untuk pelet tunggal TKKS 1X pres. Terlihat bahwa pelet TKKS 1X pres memiliki diameter lebih besar (selisih hampir 1 mm) daripada pelet TKKS 2X pres. Tetapi pelet TKKS 2X pres memiliki masa jenis lebih besar (**1,551**) dibandingkan pelet 1X pres (**1,395**). Masa jenis pelet tunggal sangat penting dalam kaitannya dengan proses torefaksi.

Tabel 5-2. Massa jenis single pelet TKKS 1X penekanan

Sampel	Diameter (mm)	Panjang (mm)	Massa (gr)	Massa Jenis (gr/cm <sup>3</sup> )
1	9,54	40,91	3,390	1,402
2	9,65	42,98	3,690	1,419
3	9,70	40,04	3,350	1,368
4	9,70	42,54	3,610	1,390
Rerata	<b>9,65</b>			<b>1,395</b>

Tabel 5-3. Massa jenis single pelet TKKS dengan 2X penekanan

Sampel	Diameter (mm)	Panjang (mm)	Massa (gr)	Massa Jenis (gr/cm <sup>3</sup> )
1	9,03	40,54	3,190	1,486
2	8,87	48,98	3,790	1,515
3	8,91	50,53	4,030	1,546
4	8,70	43,12	3,510	1,657
Rerata	<b>8,88</b>			<b>1,551</b>

Pelet TKKS memiliki massa yang lebih berat dibandingkan pelet kayu pada umumnya. Tabel 5-4 memperlihatkan bahwa masa jenis pelet TKKS lebih tinggi

dibandingkan pelet kayu jabon dan kayu karet. Dapat dilihat bahwa pelet TKKS memiliki masa jenis lebih besar dibandingkan pelet kayu Jabon dan kayu Karet.

Tabel 5-4. Perbandingan massa jenis single pelet TKKS dengan pelet kayu

Parameter	TKKS 1X	TKKS 2X	Kayu Jabon	Kayu Karet
Diameter (mm)	9,65	8,88	8,50	6,00
Masa jenis (g/cm <sup>3</sup> )	1,395	1,551	1,18	1,29

Hasil pengujian menunjukkan bahwa masa jenis pelet dipengaruhi oleh tekanan yang digunakan pada saat pengepresan pelet. Dengan 1X pres (tekanan 55 MPa) menghasilkan pelet dengan diameter rata-rata **9,65** mm, masa jenis pelet tunggal **1,395** kg/cm<sup>3</sup>. Pelet TKKS yang dihasilkan dengan 2X pres (tekanan 90 MPa) memiliki diameter rata-rata lebih kecil, yaitu **8,88** mm, masa jenis pelet tunggal lebih besar (**1,551** kg/cm<sup>3</sup>), lebih tinggi dari pelet dengan 1X pres. Karena masa jenis pelet TKKS lebih tinggi daripada pelet biomasa kayu, maka TKKS harus dipotong-potong untuk mendapatkan berat yang sesuai untuk pelaksanaan proses torefaksi.

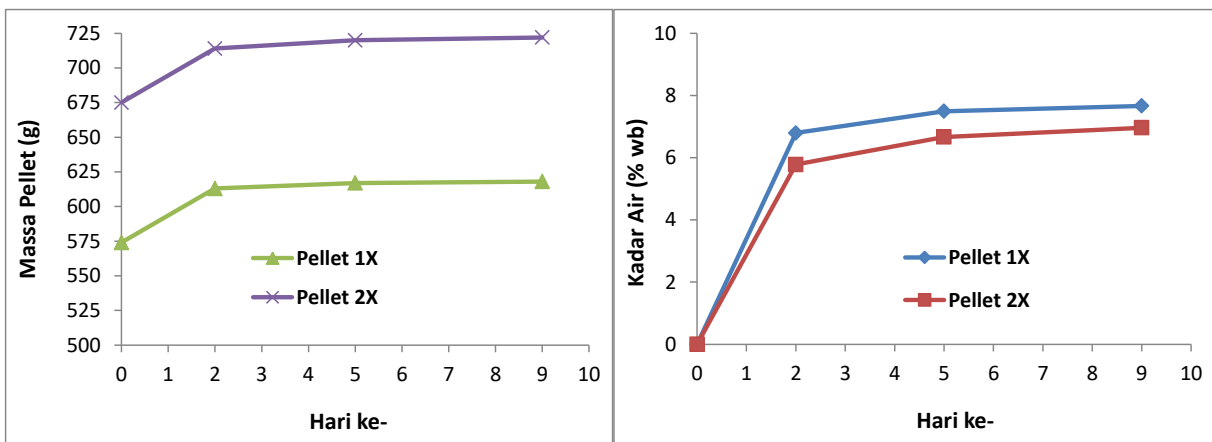
Tabel 5-5 Massa jenis kamba pelet TKKS (gr/cm<sup>3</sup>) 1X pres dan 2X pres

Pengukuran	Pelet TKKS 1X pres	Pengukuran	Pelet TKKS (2X pres)
1	0,567	1	0,692
2	0,598	2	0,680
3	0,574	3	0,701
4	0,584	4	0,676
5	0,572	5	0,694
6	0,587	6	0,675
Rata-rata	<b>0,580</b>	Rata-rata	<b>0,686</b>

Masa jenis kamba berkaitan dengan pengemasan, transportasi, dan handling pelet. Tabel 5-5 menyajikan masa jenis kamba (*bulk density*) dari pelet TKKS. Masa jenis kamba pelet TKKS 1X pres adalah 0,580 g/cm<sup>3</sup> dan untuk pelet TKKS 2X pres 0,686 g/cm<sup>3</sup>. Masa jenis kamba lebih rendah daripada masa jenis pelet tunggal karena tidak semua pelet menempati ruangan, masih terdapat rongga

udara. Nilai masa jenis kamba mengindikasikan bahwa dalam kemasan pelet TKKS 1X pres hanya menempati 42% ruang, sedangkan pelet TKKS 2X pres menempati 44% ruangan. Hal ini sesuai dengan ukuran (diameter) pelet TKKS 2X pres yang lebih kecil, sehingga mampu menempati lebih banyak ruangan.

Kami telah mengukur kadar air keseimbangan (equilibrium moisture content) pellet TKKS dengan cara menyimpan pellet kering oven di dalam wadah terbuka di dalam ruangan dan diukur perkembangan (perubahan) masanya seiring dengan waktu. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 5-10. Terlihat pelet bertambah berat secara signifikan hingga hari kedua seiring waktu penyimpanan. Hal ini terjadi sebagai akibat absorpsi kelembaban yang ada di dalam udara oleh pellet. Setelah hari kedua, pellet masih menyerap kelembaban udara, tetapi sudah tidak signifikan.



Gambar 5-10. Perubahan massa (kiri) dan kadar air (kanan) pellet TKKS selama penyimpanan di udara ruang.

Ditambah dengan proses biologis pada pellet, hal ini mengisyaratkan bahwa pellet TKKS akan mengalami kerusakan selama dalam penyimpanan. Kerusakan pelet ini dapat dicegah melalui proses torefaksi, dengan cara memanaskan pelet hingga suhu 250 – 350 °C pada kondisi tanpa udara. Proses torefaksi ini tidak hanya mampu meningkatkan nilai kalori, tetapi juga meningkatkan sifat *hydrophobicity* (melawan air) dari pelet tersebut. Pelet menjadi tidak menyerap air sehingga tahan lama dalam penyimpanan.



## 5.4 Karakteristik Energetik Pelet TKKS

Tabel 5-6 menyajikan sifat pelet TKKS yang berkaitan dengan kegunaannya sebagai bahan bakar. Terlihat bahwa pelet TKKS memiliki kadar air lebih rendah dibandingkan dengan bahan baku TKKS yang sudah dikeringkan. Kadar air pelet dipengaruhi oleh tekanan kerja selama pembuatan pelet. Dengan sekali pres (tekanan 55 kg/cm<sup>2</sup>), kadar air pelet mencapai 8,6%. Sedangkan dengan dua kali pres (tekanan 90 kg/cm<sup>2</sup>) kadar air turun lagi menjadi 5,6%. Hal ini terjadi karena selama proses kompresi pada saat pencetakan pelet, terjadi kenaikan suhu yang berdampak pada turunnya kadar air.

Tabel 5-6. Karakteristik energi pelet TKKS

Parameter	TKKS1*	TKKS2**	Pelet 1X	Pelet 2X
Kadar air (% db)	11,5	12,2	8,6	5,6
Kadar abu (% TS)	7	6	4	12
Ekstraktif (%)	38,9	24,2	33,1	11,7
Komposisi kimia (%):				
Selulose	35,3	40,4	32,1	33,9
Hemiselulose	8,3	20,5	17,6	38,6
Lignin	17,5	15,0	17,2	15,8

\*) TKKS keluar dari steam drier; \*\*) TKKS keluar dari rotary drier

## 5.5 Proses torfaksi COMB

Torefaksi merupakan suatu proses termal untuk mengubah biomassa menjadi *black pellet*, material menyerupai batubara, yang memiliki karakteristik bahan bakar lebih baik dibandingkan biomassa asalnya. Proses torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit, telah berhasil dilakukan menggunakan COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Pyrolyzer seperti terlihat pada Gambar 5-11. Burner pada COMB Pyrolyzer menggunakan bahan bakar LPG dengan kapasitas termal 200.000 kkal/jam, tekanan 1,96 kPa dan kisaran suhu antara 100-500 °C. Sistem burner juga dilengkapi dengan detektor api (flame) menggunakan sensor UV.

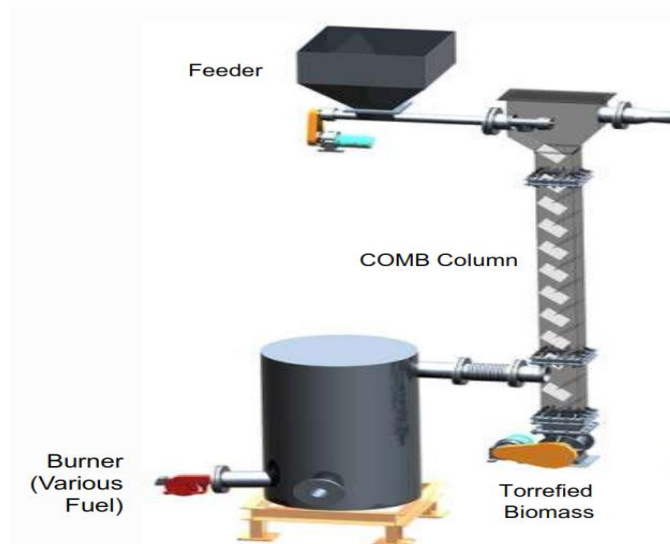
Jantung proses torefaksi terletak di bagian kolom COMB vertikal yang dilengkapi dengan bafel (5-12). Kolom COMB memiliki ukuran ukuran tinggi 3,5 m

dan penampang kubus (20 X 20 cm). Bafel memiliki sudut 45° dengan rasio bukaan 35-40%. Kolom dilapisi dengan insulasi eksternal dari wool keramik setebal 10 cm dengan kasing aluminium.

Kondisi optimum proses torefaksi yang diperoleh adalah suhu torefaksi 320 °C dan flow rate gas panas sebesar 4,10 m<sup>3</sup>/menit. Proses torefaksi telah mengubah karakteristik pelet putih (*white pellet*) menjadi pelet coklat (*brown pellet*) dan pelet hitam (*black pellet*) seperti terlihat pada Gambar 5-13.



Gambar 5-11. Fasilitas COMB Pyrolyzer Universitas Lampung untuk torefaksi.



Gambar 5-12. Bagian inti COMB Pyrolyzer untuk proses torefaksi.





Gambar 5-13. Pelet TKKS (dari kiri: white, brown, dan black pellet)

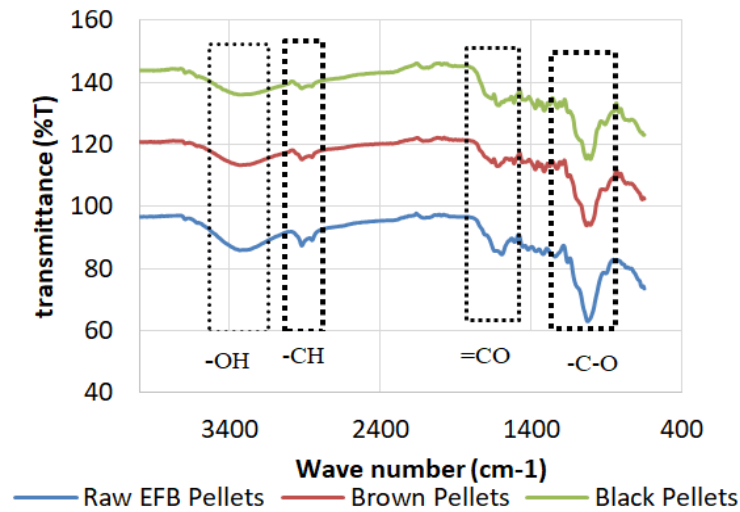
Tabel 5-7 memperlihatkan perubahan karakteristik pelet setelah mengalami torefaksi. Kadar air turun signifikan dari 7,1% (pelet putih) menjadi 2,7% (*brown pellet*) dan menjadi 1,4% (*black pellet*). Sementara itu kadar abu meningkat dari 8% menjadi 10% (*brown pellet*) dan 12% (*black pellet*) sebagai akibat berkurangnya komponen ekstraktif yang menguap selama proses torefaksi. Hemiselulose turun signifikan dari 25,16% menjadi 12,53% (*brown pellet*) dan 9,23% (*black pellet*). Kita ketahui bahwa hemiselulose merupakan komponen yang secara termal paling mudah terdekomposisi.

Tabel 5-7. Karakteristik energi pelet TKKS torefaksi

Parameter	Kontrol	Brown Pelet	Black Pelet
Kadar air (% db)	7,11	2,73	1,44
Kadar abu (% TS)	7,74	10,18	12,19
Ekstraktif (%)	28,18	21,07	17,79
Komposisi kimia (%):			
Selulose	33,33	36,51	39,97
Hemiselulose	25,16	12,53	9,23
Lignin	13,33	29,88	33,01

Perubahan struktur kimia pelet TKKS akibat torefaksi juga kami pelajari menggunakan FTIR spectroscopy. Data spectral data yang dihasilkan memberikan perbandingan antara pelet tanpa dan dengan proses torefaksi (Gambar 5-14). Semua peak spektral sesuai dengan data literatur (Iryani *et al.*, 2017; Pastorova *et al.*, 1993). Data spectral FTIR menunjukkan peak di kisaran  $3300\text{ cm}^{-1}$  untuk gugus

-OH. Berdasarkan data spectral kita melihat ada kecenderungan penurunan gugus -OH setelah torefaksi. Hasil ini sesuai dengan perubahan kadar air pellet TKKS setelah torefaksi. Hal ini mengindikasikan bahwa ikatan hidrogen gugus -OH pada hemisellulose secara gradual mengalami degradasi. Perubahan peak yang paling jelas terjadi pada black pellet. Peak pada kisaran bilangan gelombang 2928–2940  $\text{cm}^{-1}$  berkaitan dengan gugus aliphatic  $\text{CH}_n$  melemah dan menunjukkan adanya fragmentasi dan dekomposisi rantai polimer. Pada kisaran bilangan gelombang 1720–1740  $\text{cm}^{-1}$  mewakili C=O (ketone, carbonyls, ester groups) dan ikatan C=O dari gugus acetyl pada xylan (hemicellulose) makin lemah setelah torefaksi.



Gambar 5-14. Spectra FTIR pellet TKKS sebelum dan sesudah torrefaksi.

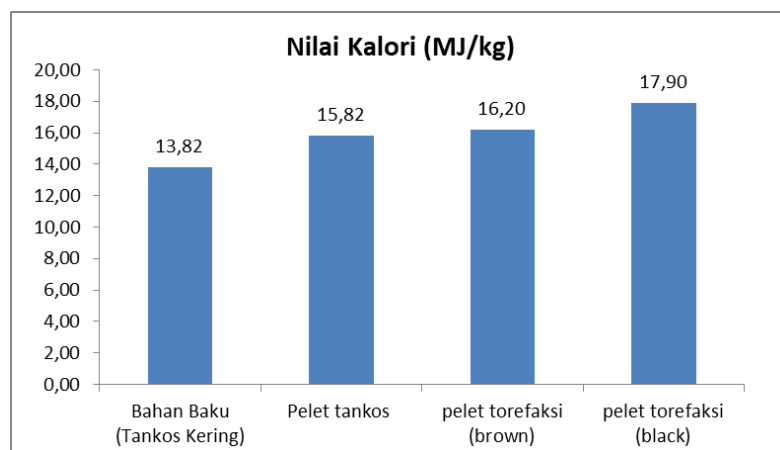
Peak C–O–C ikatan aryl–alkyl ether terdeteksi pada sekitar bilangan gelombang 1247  $\text{cm}^{-1}$ . Peak ikatan  $\beta$ -glycosidic antara glukosa di dalam sellulosa teramati pada kisaran bilangan gelombang 874–897  $\text{cm}^{-1}$ . Peak sekitar 1608, 1500, and 1408  $\text{cm}^{-1}$  berhubungan dengan ikatan C=C gugus aromatik pada lignin. Dengan memperhatikan peak di sekitar 1608 dan 1408  $\text{cm}^{-1}$  terlihat bahwa lignin stabil selama torefaksi dan tetap ada di dalam produk torefaksi.

Pada proses torefaksi, kadar volatil matter mengalami penurunan (Tabel 5-8) dari 27,08% menjadi 22,21% (*brown pellet*) dan 18,05% (*black pellet*) sebagai akibat pemanasan dan terjadinya penguapan pada komponen ini. Tabel 5-8 juga memperlihatkan bahwa perubahan juga terjadi pada komposisi elemental dimana

perbandingan O:C turun dari 0,96 menjadi 0,5. Sebelumnya telah diperlihatkan pada Diagram van Krevelen (Gambar 2-1) bahwa biomassa torefaksi memiliki kisaran nilai rasio O:C antara 0,4 hingga 0,6.

Tabel 5-8. Perubahan nilai elemental pellet TKKS torefaksi

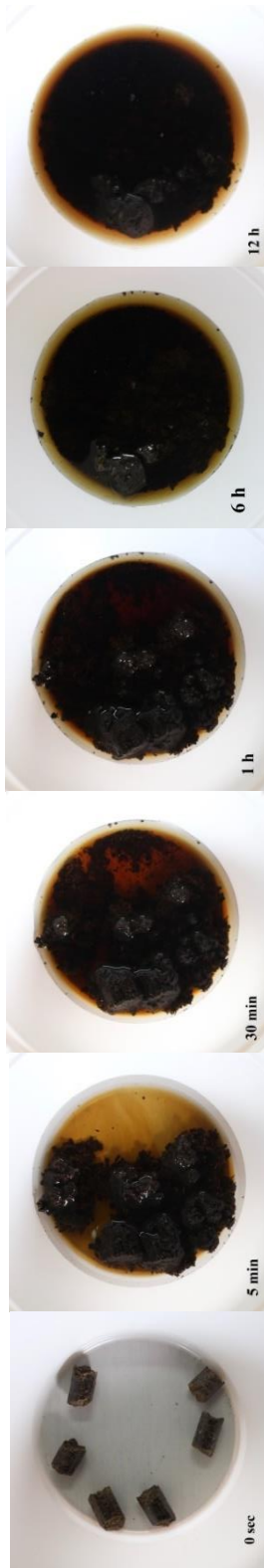
Sampel Pellet	C	H	N	O (diff)	VM	FC	HV (MJ/kg)
Raw	47.24	6.63	0.82	45.32	27.08	63.61	15.82
Brown	47.70	6.35	0.99	45.54	22.21	69.84	16.20
Black	62.06	5.76	0.63	30.96	18.05	72.84	17.90



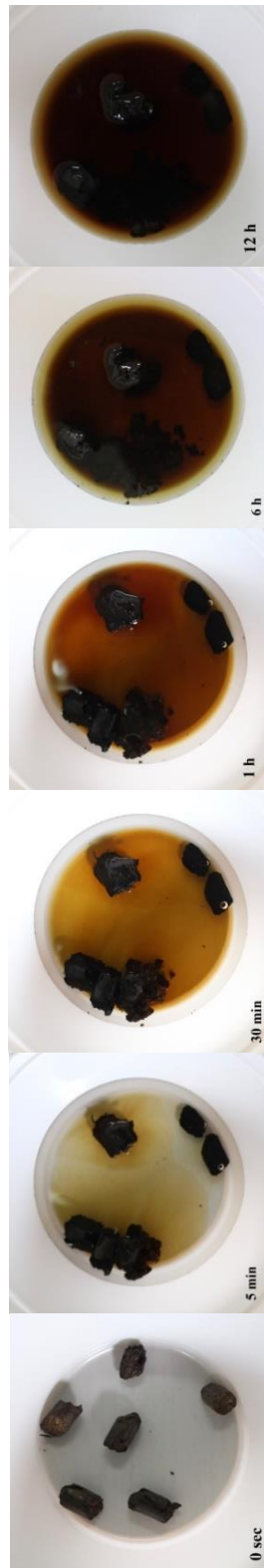
Gambar 5-15. Perbaikan nilai kalori pelet melalui torefaksi

Karakteristik lain yang berubah adalah nilai kalori pelet seperti diberikan pada Gambar 5-15. Hasil yang diperoleh dari pelet tandan kosong dapat meningkatkan nilai kalori dari 13,82 MJ/kg menjadi 16,20 MJ/kg (*brown pellet*) dan 17,90 MJ/kg (*black pellet*). Kita perhatikan bahwa kenaikan nilai energi tidak terlalu tinggi, yang mungkin disebabkan oleh kadar abu yang tinggi di dalam pelet TKKS.

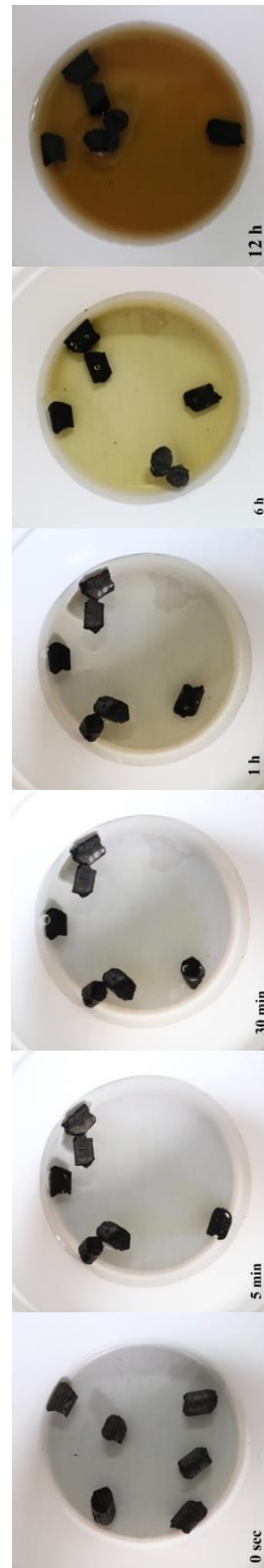
Proses torefaksi juga memperbaiki sifat hydrophobicity pelet. Pelet TKKS yang belum mengalami torefaksi mudah menyerap air. Sedangkan pelet torefaksi tahan terhadap air. Pengujian dengan merendam pelet di dalam air menunjukkan bahwa pelet yang belum ditorefaksi sudah hancur dalam waktu 5 menit (Gambar 5-16). Selama itu, komponen ekstraktif juga sudah banyak yang keluar yang ditandai dengan perubahan warna air yang makin hitam. Pelet torefaksi bisa bertahan lebih



Gambar 5-16. Uji hydrophobicity pelet putih (tanpa urefaksi)



Gambar 5-17. Uji hydrophobicity pelet urefaksi (brown)



Gambar 5-18. Uji hydrophobicity pelet urefaksi (black)

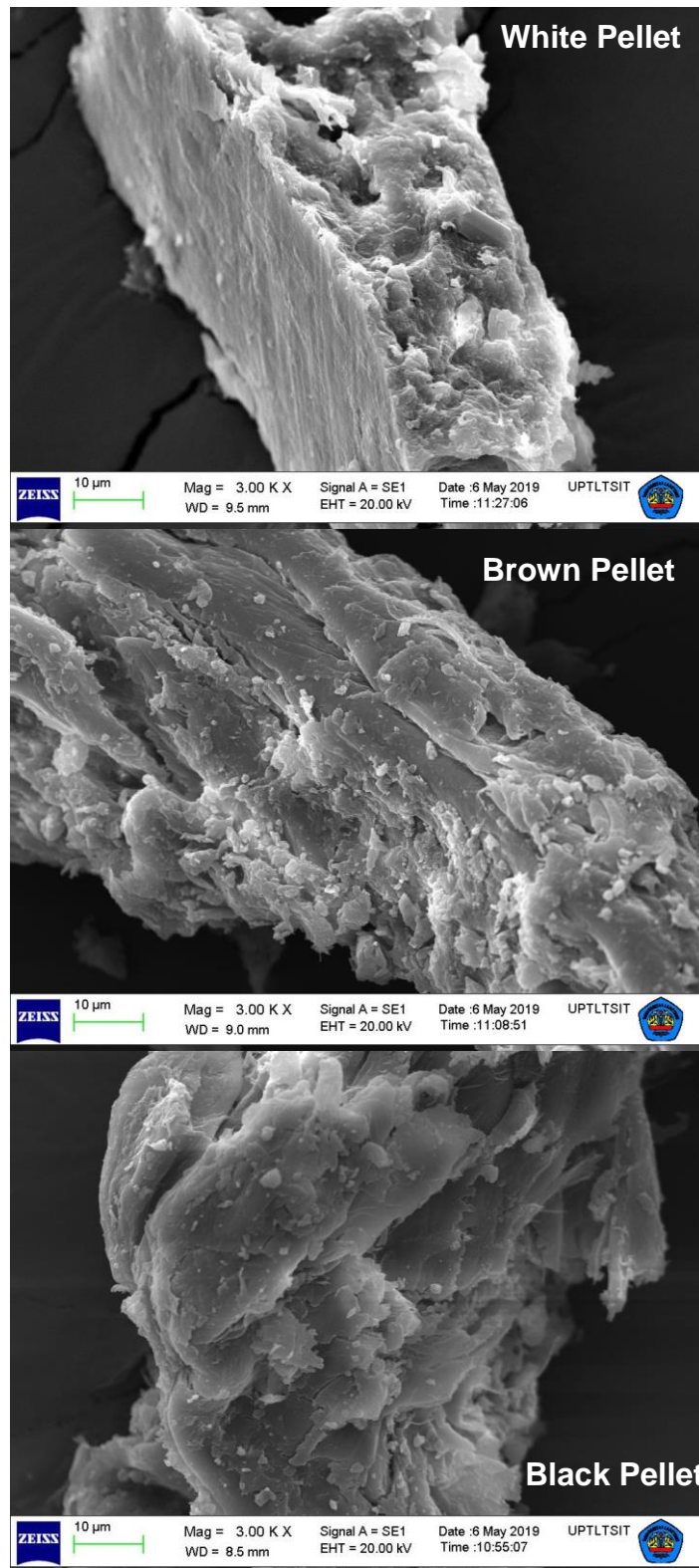
lama (hingga 12 jam) tanpa mengalami kerusakan struktur pelet. Pelet torefaksi yang masih coklat menunjukkan proses torefaksi yang belum sempurna. Pelet ini masih bertahan pada perendaman selama 2 jam. Tetapi beberapa bagian sudah menunjukkan kerontokan setelah 6 jam hingga 12 jam perendaman (Gambar 5-17). Makin sempurna proses torefaksi menghasilkan pelet hitam. Pelet ini bertahan hingga 12 jam perendaman tanpa mengalami kerusakan struktural (Gambar 5-18). Ekstraktif yang keluar dari pelet hitam setelah 12 jam lebih sedikit dibandingkan jika ekstraktif yang keluar dari pelet coklat hingga pada 30 menit. Hal ini menunjukkan superioritas pelet hitam dibandingkan pelet coklat.

Sifat hydrophicity ini sangat penting bagi pelet biomasa. Pelet tanpa torefaksi memiliki sifat higroskopis sehingga mudah menyerap air. Air yang terkandung di dalam biomasa akan memicu aktivitas mikroorganisme melakukan dekomposisi dalam tumpukan pelet. Reaksi anaerobik di dalam tumpukan pelet ini akan meningkatkan suhu tumpukan pelet secara signifikan. Jika suhu melampaui suatu batas tertentu, maka akan mengakibatkan reaksi aerobik yang bisa mengakibatkan "self ignition". Jika terjadi "self ignition" maka tumpukan pelet akan terbakar dengan sendirinya.

Pelet yang sudah mengalami torefaksi menjadi hydrophobic (takut air) sehingga tidak menyerap air selama penyimpanan. Oleh karena itu, pelet torefaksi menjadi lebih tahan karena terhindar dari dekomposisi oleh mikroorganisme. Selain lebih tahan lama, penyimpanan pelet torefaksi memberikan keamanan yang lebih tinggi dari bahaya kebakaran akibat proses "self ignition".

Secara mikroskopis terjadi perubahan struktur pellet setelah proses torefaksi seperti yang ditunjukkan oleh citra yang diambil melalui SEM (scanning electron microscope) pada Gambar 5-19. Sebelum proses torefaksi, pellet mempunyai matrik yang rapat dan halus. Setelah proses torefaksi, pellet mengalami perubahan fisik yang sangat jelas terutama pada perbedaan matrik pellet. Setelah proses torefaksi matrik pelet terlihat pecah dan permukaan cenderung lebih kasar (Gambar tengah dan bawah). Hal ini menunjukkan adanya sebagian material dan fraksi lignoselulosa yang terdegradasi. Data analisis kadar air, proximate, ultimate dan FTIR, memberikan konfirmasi bahwa proses torrefaksi menurunkan kadar air pellet,





Gambar 5-19. Perbedaan mikroskopis pellet TKKS berdasarkan foto SEM (atas: pellet putih; tengah: Pellet setengah torefaksi; bawah: Pellet torefaksi penuh)

menurunkan persentase zat volatil (VM) dan menurunkan kandungan hemisellulosa, tetapi meningkatkan kadar karbon tetap dan kandungan lignin. Menurut Zhu (2014), zat volatil (VM) terutama terdiri dari material atau gas-gas yang mudah terbakar seperti hidrogen, karbon monosikda, hidrokarbon, tar, amonia, dan juga gas-gas lain seperti carbon dioksida dan uap air. Pada proses torefaksi, material-material tersebut meninggalkan matrik pellet sehingga membuat perubahan struktur matrik.

Pada black pellet, foto SEM menunjukkan struktur matrik yang lebih kasar dan sebagian material halus yang menempel pada permukaan matrik. Apabila dihubungkan dengan kenaikan kandungan lignin pada black pellet dapat disimpulkan adanya proses kondensasi yang terjadi selama proses torefaksi. Sesuai dengan data analisa komposisi, pellet pada awalnya mengandung lignin dengan kadar sebesar 17%, brown pellet mempunyai kadar lignin sebesar 21% dan black pellet 31%. Analisis lignin Klason dilaksanakan dengan cara hidrolisis menggunakan asam sulfat pekat (72%) dimaksudkan untuk memisahkan struktur karbohidrat dengan lignin. Proses hidrolisis menyebabkan struktur karbohidrat mendegradasi ikatan glikosidik karbohidrat, dan mengubahnya menjadi gula monomer, namun asam sulfat tidak akan melarutkan fraksi lignin Klason. Jika residu padat setelah hidrolisis asam mewakili kandungan lignin yang sebenarnya dalam biomassa, maka seharusnya jumlah residu dalam sampel produk torrefaksi mempunyai kandungan lignin Klason yang berkurang atau setidaknya mempunyai nilai kandungan dengan persentase mendekati jumlah awal. Namun, sampel setelah proses torefaksi teramati bahwa jumlah persentase residu tidak larut asam (*insoluble acid residue*) meningkat dari sekitar 17% menjadi 21% dan lalu 31%. Hal ini mengindasikan bahwa adanya pembentukan struktur yang terkondensasi menjadi produk yang terdegradasi atau termodifikasi secara termal. Ketika temperatur selama proses torrefaksi meningkat, maka energi panas dapat menyebabkan pembentukan produk-produk lain yang tahan terhadap asam asetat, seperti tar. Tar tersebut merupakan karbon hasil proses degradasi ikatan glikosidik dari karbohidrat yang selanjutnya lengket di atas permukaan sampel produk setelah proses torefaksi sehingga meningkatkan kandungan produk tahan asam (acid



insoluble residue) atau lignin Klason. Adanya zat terkondensasi tersebut selain menambah perestase kandungan klason lignin juga mempengaruhi gelapnya warna dari pellet.

## 5.6 Komposisi Mineral

Salah satu masalah dengan pemanfaatan TKKS sebagai bahan bakar adalah kandungan mineral yang tinggi. Beberapa mineral seperti kalium (K) menyebabkan terjadinya pengerakan (slagging) pada perkakas yang bekerja pada suhu tinggi. Mineral lain seperti silikon (Si) bersifat abrasif. Tabel 5-9 menyajikan perbandingan komposisi mineral pelet tanpa dan dengan proses torrefaksi. Komposisi mineral ini diperoleh dari analisis abu menggunakan X-ray fluorescence (XRF). Hasil mengkonfirmasi kehadiran  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  dan  $Fe_2O_3$  dalam pelet TKKS. Tabel tersebut juga mengindikasikan bahwa proses torrefaksi dapat menurunkan sedikit kandungan mineral seperti  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $CaO$  and  $K_2O$ .

Tabel 5-9. Komposisi mineral pelet TKKS

Element	Unit	Raw	Brown Pellet	Black Pellet
MgO	%	1,21	1,35	1,44
$Al_2O_3$	%	11,549	10,06	10,36
<b><math>SiO_2</math></b>	<b>%</b>	<b>10,45</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
$P_2O_5$	%	2,457	1,292	0
$SO_3$	%	3,57	2,418	2,34
Cl	%	6,60	6,62	5,97
<b><math>K_2O</math></b>	<b>%</b>	<b>51,58</b>	<b>44,25</b>	<b>46,19</b>
CaO	%	17,71	14,87	14,83
$TiO_2$	%	0,19	1,03	1,03
$Cr_2O_3$	%	0,31	0,48	0,68
MnO	%	0,35	0,83	0,869
$Fe_2O_3$	%	5,08	15,94	15,76
ZnO	%	0,733	0,19	0,18
$Rb_2O$	%	0,22	0,45	0,500

## 5.7 Problem Reaktor COMB

Pada laporan kemajuan sudah disampaikan bahwa torefaksi pellet TKKS menggunakan reaktor COMB sulit dikerjakan karena pellet TKKS memiliki density lebih berat dibandingkan pelet kayu. Hal ini mengakibatkan pellet TKKS jatuh lebih cepat di dalam reaktor sehingga residence time yang direncanakan tidak tercapai. Akibatnya pellet masih belum mengalami torefaksi ketika keluar dari reaktor. Sebagian kecil pellet TKKS dengan ukuran kecil (panjang  $\pm 1$  cm) mengalami torefaksi dan menjadi pellet hitam. Oleh karena itu pelet tunggal harus dikurangi dengan cara pelet dipotong-potong sehingga panjangnya sekitar 1 hingga 2 cm. Ini pun masih belum menyelesaikan masalah sehingga proses torefaksi perlu diulang beberapa kali (4-5 pengulangan) untuk memperoleh hasil *black pellet* yang diinginkan. Tetapi, mengecilkan ukuran pellet dengan cara memotong menjadi panjang  $\pm 1$  cm merupakan langkah yang tidak masuk akal. Oleh karena itu tim peneliti melakukan torefaksi dengan oven dan reaktor tipe rotary.

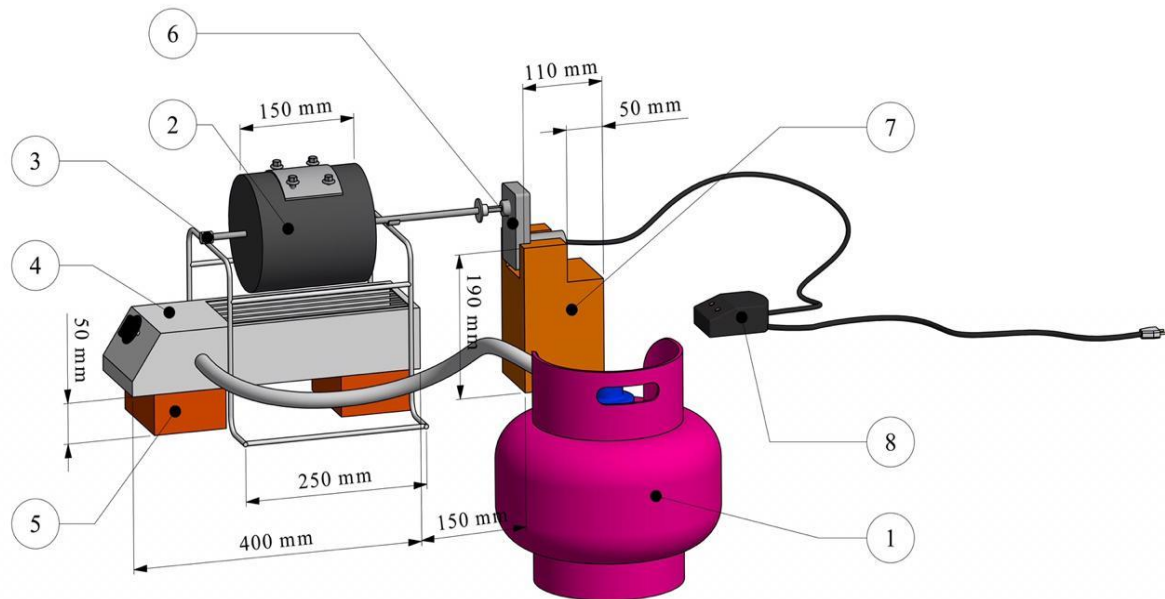
## 5.8 Torefaksi Menggunakan Oven (Solusi I)

Proses torefaksi pellet TKKS akhirnya dipelajari secara batch menggunakan oven pada suhu 200 hingga 300 °C dan waktu proses 20 hingga 40 menit. Dalam hal ini, pellet TKKS dibungkus dengan kertas aluminium foil untuk mengurangi ketersediaan oksigen. Terjadi perubahan sifat fisik pellet selama torefaksi di dalam oven yang terlihat dari perubahan warna pelet. Dari uji persendaman, proses ini juga meningkatkan hidropobicity dari pellet. Selain itu terjadi peningkatan nilai kalori pellet torefaksi mencapai 20,5 MJ/kg (terutama untuk pelet berukuran pendek dan medium) dibandingkan nilai kalori pellet TKKS tanpa torefaksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses torefaksi memerlukan waktu 30 menit.

## 5.9 Torefaksi Menggunakan Reaktor Rotary (Solusi II)

Berdasarkan hasil torefaksi menggunakan oven, kami merancang reaktor torefaksi tipe rotary skala kecil seperti diperlihatkan pada Gambar 5-20. Reaktor ini memiliki ukuran panjang 150 mm dan diameter 150 mm. Reaktor torefaksi

dirancang dengan kecepatan putar bervariasi. Reaktor memperoleh panas eksternal dari pemanas dengan bahan bakar LPG. Reaktor juga dilengkapi dengan penyambung as cepat (*quick coupling*) sehingga memudahkan penyambungan as ke motor listrik.

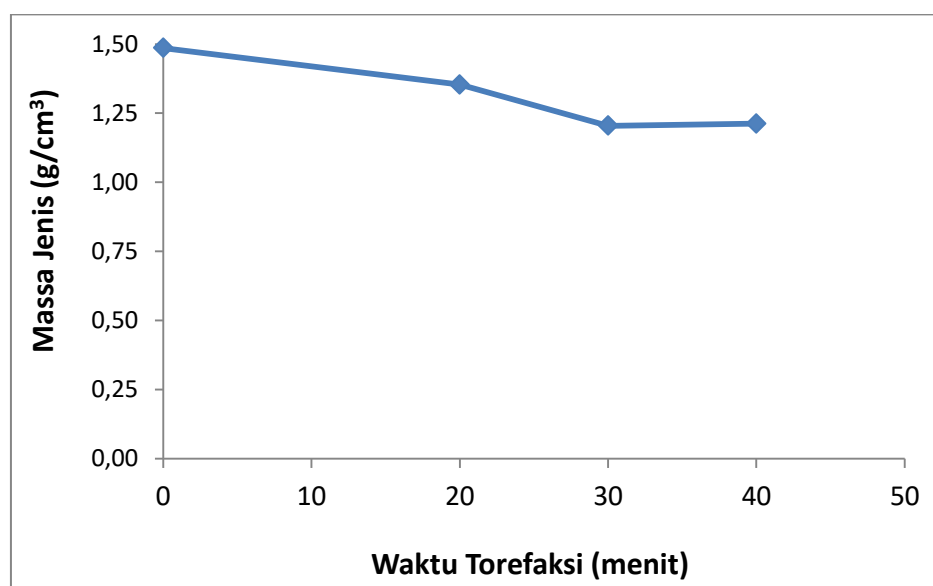


Gambar 5-20. Skema reaktor torefaksi tipe rotary (1: LPG, 2. Reaktor rotary dengan RPM variabel, 3: As dengan quick coupling ke motor listrik, 4: pemanas, 5: Dudukan pemanas, 6: Motor listrik variable speed, 7: Dudukan motor, 8: Adaptor)

Karakteristik pelet hasil torefaksi menggunakan reaktor tipe rotary pada variasi waktu 20 hingga 40 menit dan suhu kerja antara 200 hingga 250 °C diberikan pada Tabel 5-10. Terlihat bahwa komponen hemiselulosa mengalami penurunan selama proses torefaksi, sedangkan selulosa cenderung tetap dan lignin naik. Komponen ekstraktif juga turun, terutama pada waktu torefaksi 30-40 menit. Hal ini terjadi karena hemiselulosa merupakan komponen yang paling mudah terdekomposisi dibandingkan komponen lain (selulosa dan lignin). Nilai komponen selulosa dan lignin yang mengalami kenaikan terjadi akibat penurunan hemiselulosa dan komponen ekstraktif, sehingga secara relatif nilai komponen selulosa dan lignin menjadi naik.

Tabel 5-10. Karakteristik kimia TKKS hasil torefaksi menggunakan reaktor rotary.

Bahan	Eks (%)	Hemi (%)	Selu (%)	Lign (%)	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)
Kontrol	17,43	26,22	33,64	24,62	7,89	92,62	9,33	8,81
Torefaksi 20'	16,84	24,81	25,44	31,65	4,58	88,64	12,37	19,15
Torefaksi 30'	14,32	24,83	34,07	39,20	2,40	86,74	13,60	24,46
Torefaksi 40'	12,39	16,71	47,36	39,69	2,16	85,94	14,48	26,38
Torefaksi 16 rpm	14,57	23,49	34,06	41,44	2,21	86,24	11,19	22,73
Torefaksi 24 rpm	16,30	23,53	30,04	38,67	1,35	84,64	14,34	28,35
Torefaksi 31 rpm	16,10	22,55	34,18	32,75	1,34	84,29	15,73	30,10



Gambar 5-21. Penurunan masa jenis pelet tunggal akibat torefaksi

Pellet TKKS juga mengalami penurunan massa jenis selama torefaksi. Seperti terlihat pada Gambar 5-21, massa jenis tunggal pellet TKKS turun dari 1,49 g/cm<sup>3</sup> (pellet segar) hingga 1,21 g/cm<sup>3</sup> pada torefaksi 30-40 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa produksi pellet torefaksi dapat dilakukan menggunakan reaktor rotary dengan waktu proses antara 30 hingga 40 menit. Waktu proses dapat diturunkan secara signifikan dengan menaikkan suhu proses. Dalam reaktor mini kami, suhu proses berkisar dari 200 hingga 250 °C.

## 5.9 Mesin Pellet Skala Industri Kecil

Karakteristik pelet TKKS sangat berpengaruh pada proses torefaksi, sehingga sangatlah penting mengetahui faktor-faktor penting yang menghasilkan pelet TKKS yang sesuai dengan COMB pyrolizer. Oleh karena tim peneliti bekerja sama dengan CV. Karya Baru di Sekampung, Lampung Timur, sudah merancang mesin pembuat pellet TKKS tipe *screw press* dengan daya mesin 24 HP (Gambar 5-22). Mesin dilengkapi dengan alat pencacah (penghancur) TKKS. Mesin pellet dilengkapi beberapa piringan cetak dengan lubang keluaran berbeda.



Gambar 5-22. Mesin pellet biomassa skala industri kecil, mesin 24 HP

Hasil sementara menunjukkan bahwa mesin dapat mencetak pellet TKKS (Gambar 5-23). Tetapi hasilnya masih kasar dan perlu beberapa kali pengepresan. Oleh karena itu perlu penelitian dan perbaikan lebih lanjut, baik yang terkait dengan bahan baku seperti kelembutan partikel TKKS yang dihasilkan dari mesin pencacah, kadar air, dan penambahan bahan aditif, atau yang terkait dengan kerja mesin seperti tekanan kerja mesin pellet, putaran (RPM) ulir mesin pellet, dan panjang ulir.



Gambar 5-23. Pellet TKKS yang dicetak mesin 24 HP (kiri: 2X pres, kanan 4X press)

### 5.10 Rencana Lanjutan

Berdasarkan hasil-hasil yang sudah diperoleh pada tahun pertama ini, tim peneliti akan melakukan beberapa kegiatan sebagai lanjutan:

1. Membuat pelet TKKS dan mengkaji parameter-parameter yang penting.
2. Membuat reaktor torefaksi pellet tipe rotary dengan kapasitas lebih besar dengan parameter suhu yang dapat dikontrol sehingga dapat digunakan untuk produksi pellet torefaksi secara lebih cepat.
3. Melakukan produksi pelet torefaksi pada kondisi proses yang optimum.
4. Melakukan uji pellet torefaksi dalam penyimpanan terbuka yang meliputi perubahan ketahanan selama penyimpanan, penyerapan kadar air, penurunan nilai kalori, keterbasahan melalui sudut kontak, dan penurunan kekuatan fisik.
5. Melakukan kajian teknis dan ekonomi pemanfaatan pelet TKKS sebagai bahan bakar di industri kecil-menengah (misalnya industri tahu).
6. Menyiapkan publikasi hasil penelitian melalui seminar maupun jurnal ilmiah (nasional maupun internasional).



## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang sudah dicapai, dapat disimpulkan bahwa TKKS sangat berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar dengan cara kompaksi menjadi pelet. Produksi pelet berpeluang untuk dikerjakan menggunakan mesin pencetak skala industri kecil dengan kapasitas mesin 24 HP. Pelet TKKS dapat ditingkatkan mutunya melalui proses torefaksi. Proses ini selain meningkatkan nilai kalori pellet TKKS juga meningkatkan hidropobisitas pellet sehingga tidak mudah rusak selama penyimpanan. Produksi pelet torefaksi dapat dikerjakan menggunakan reaktor rotary dengan kecepatan rendah (sekitar 20-30 RPM).



## DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, B., Sule, I. dan Dutta, A. 2012. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conv. Bioref.* **2**:349–369.
- Alamsyah, R., Siregar, N.C., dan F. Hasanah. 2017. Torrefaction study for energy upgrading on Indonesian biomass as low emission solid fuel. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* **65**: 1-10. DOI:10.1088/1755-1315/65/1/012051
- Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Kiel, J.H.A., Prins, M.J., Ptasiński, K.J., and Janssen F.G.G.J. 2005. Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass. Report ECN-C--05-026.
- BPS. 2014. *Direktori Perusahaan Perkebunan Kelapa Sawit 2013*. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- BPS. 2016. *Indonesian Oil Palm Statistics 2015*. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Caroko, W., Komarudin, H., Obidzinski, K. and Gunarso, P. 2011. Policy and institutional frameworks for the development of palm oil-based biodiesel in Indonesia. Working Paper 62. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Chen, W-H., Peng, J., dan Bi, X.T. 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **44**: 847–866.
- Chen, W.H. dan Kuo, P.C. 2010. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy* **35**: 2580–2586.
- Chiew, Y.L. dan Shimada, S. 2013. Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer—a case study of Malaysia. *Biomass Bioenergy* **51**:109–124
- da Costa, R.C. 2004. Potential for producing bio-fuel in the Amazon deforested areas. *Biomass and Bioenergy* **26**:405-415.
- Darnoko, Poeloengan, Z. dan Anas, I. 1993. Pembuatan pupuk organik dari tandan kosong kelapa sawit. *Buletin Penelitian Kelapa Sawit* **2**: 89-99.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2017. *Statistik Perkebunan Indonesia 2015-2017: Kelapa Sawit*. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan, Jakarta. 69 hal.

- Ditjen PHPP. 2006. Pedoman Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit. Departemen Pertanian, Jakarta: 81 hal.
- Dutta, A. dan Leon, M.A. 2011. Pros and Cons of Torrefaction of Woody Biomass. *Short-Rotation Afforestation and Agroforestry Systems for Energy Purposes and GHG Reduction: Joint ecoETI & CEF Projects Workshop*. March, 2011.
- GAPKI (Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia). 2014. *Industri Minyak Sawit Indonesia Menuju 100 Tahun NKRI (Indonesia's Crude Palm Oil Industries towards 100 Years of The United Nation of The Republic of Indonesia)*. 265 pages.
- Hasanudin, U. (2007). *Biomass Utilization from Agroindustries in Indonesia*. Indonesia-Japan Joint Symposium "Toward Sustainable Asia with Sound Material Cycle and Emission Minimization", March, 5<sup>th</sup> 2007, ITB Bandung.
- Irawan, A., Riadz, T., dan Nurmalisa. 2015. Proses torrefaksi tandan kosong kelapa sawit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air. *Reaktor*, 15(3): 190-195.
- Iryani, D.A., Kumagai, S., Nonaka, M., Sasaki, K., Hirajima, T. (2017). Characterization and production of solid biofuel from sugarcane bagasse by hydrothermal carbonization. *Waste Biomass Valor.* 8:1941–1951.
- Kananam, W., Suksaroj, T.T., dan Suksaroj, C. 2011. Biochemical changes during oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches composting with decanter sludge and chicken manure. *Sci Asia* **37(1)**:17–23.
- Lee, S. Clean Fuel Production from Forest Resources and Distributed Power Generation with Microgrid/Energy Network. UNILA-KIER Technical Workshop. Bandar Lampung, 23 November, 2017.
- Lim, P.N., Wu, T.Y., Clarke, C., and Daud, N.N.N. 2015. A potential bioconversion of empty fruit bunches into organic fertilizer using *Eudrilus eugeniae*. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **12**: 2533–2544.
- Maryudi. 2014. Karakteristik Torrefaksi dan Densifikasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Chemica* **1(2)**: 77-84
- Oil World Statistic (2013). *Palm Oil Statistic*. ISTA Milka GmbH, Hamburg, Germany, December.

- PASPI (Palm Oil Agribusiness Strategic Policy Institute). 2016. *Mitos dan Fakta Industri Minyak Sawit Indonesia dalam Isu Sosial, Ekonomi dan Lingkungan Global (Myths and Facts on Indonesia Palm Oil Industry in Social, Economy, and Environment Global Issues)*. GAPKI, Bogor, Indonesia.
- PASPI (Palm Oil Agribusiness Strategic Policy Institute). 2014. *The Sustainability of Indonesian Palm Oil Industry : Its role in Economic Growth, Rural Development, Poverty Reduction, and Environmental Sustainability*. GAPKI, Bogor, Indonesia.
- Pleanjai S., Gheewala S.H. and Garivait S. 2007. Environmental Evaluation of Biodiesel Production from Palm Oil in a Life Cycle Perspective. *Asian J. Energy Environ.* **8(1 and 2)**: 15-32
- Pastorova, I., P.W. Arisz, and J.J. Boon. (1993) Preservation of d-glucose oligosaccharides in cellulose chars. *Carbohydrate Research*. 248:151–165.
- Prins, M.J., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G. 2006. More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy* **31**: 3458–3470.
- Singh, G., Manoharan, S., dan Toh, T.S. 1989. United plantations approach to palm oil mill by product management and utilization. *Proceedings of International Palm Oil Development Conference*. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur: 225-234.
- Sumathi, S., Chai, S.P. dan Mohamed, A.R. 2008. Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 2404-2421.
- Tim Riset PASPI. 2018. Devisa sawit dan neraca perdagangan non migas Indonesia. *Monitor* Vol. 4(8): 1105-1110.
- Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, R., Wright, W.T., and Boardman, R.D. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology* : 384-401. DOI: 10.1089/ind .2011.0014
- van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., and Ptasinski, K.J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Energy* **35**: 3748-3762.
- Wang, G.J., Luo, Y.H, Deng, J., Kuang J.H., and Zhang, Y.L. 2011. Pretreatment of biomass by torrefaction. *Chinese Sci Bull.* **56**: 1442–1448.

# LAMPIRAN

Lampiran I

**REKAPITULASI PENGGUNAAN DANA**  
**Kegiatan Penelitian Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit**

Judul Penelitian : *Black pellet* Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku  
 Proses Gasifikasi : Peningkatan Mutu Biomassa melalui  
 Torefaksi COMB (*Counter Flow Multi-Baffle*) Pyrolyzer

Ketua Peneliti : **Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P**

Nilai Kontrak : Rp.811.525.000,-

Realisasi

    Tahap I : Rp.202.881.250

    Tahap II : Rp.324.610.000

    Tahap III : Rp.284.033.750

    Jumlah : Rp.811.525.000

Realisasi Penggunaan: **Rp.811.525.000**.....

Rekapitulasi Belanja

No	Uraian	Pagu (Rp) (nilai kontrak)	Realisasi	Sisa Pagu (Rp)
I	Gaji dan Upah	246.000.000	246.000.000	0
II	Biaya Pembelian bahan dan Peralatan	360.525.000	382.569.250	0
III	Biaya Perjalanan	164.000.000	141.955.700	0
IV	Biaya Operasional Institusi	41.000.000	41.000.000	0
	<b>Total</b>	<b>811.525.000</b>	<b>811.525.000</b>	<b>0</b>

2019

Bandar Lampung, 02 September

Mengetahui,  
 Ketua LPPM Unila

Ketua Peneliti,

**Prof. Dr. Ir. Hamim Sudarsono, M.Sc**  
 NIP. 196001191984031002

**Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P**  
 NIP. 196505271993031002

Lampiran II

**SURAT PERNYATAAN TANGGUNG JAWAB BELANJA (SPTJB)**

Ketua Peneliti : **Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P**  
 Unit Kerja : Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung  
 Judul Penelitian : *Black Pellet* Tandan Kosong Sawit Sebagai Bahan Baku Proses Gasifikasi: Peningkatan Peningkatan Mutu Biomassa Melalui Torefaksi COMB (*Counter Flow Multy Baffle*) Pyrolyzer  
 Nilai Kontrak : Rp.811.525.000,-  
 Realisasi Tahap I : Rp.202.881.250,-  
 Realisasi Tahap II : Rp.324.610.000,-  
 Realisasi Tahap III : Rp.237,632.000  
 Realisasi Belanja : Rp.811.525.000

Yang bertanda tangan di bawah ini Ketua Peneliti menyatakan bahwa saya bertanggung jawab secara formal dan material atas segala pengeluaran yang telah dibayar kepada yang berhak menerima serta kebenaran perhitungan pungutan dan setoran pajak yang telah dipungut atas pembayaran tersebut, dengan perincian sebagai berikut:

No	Tanggal	Penerima	Uraian	Jumlah (Rp)	Pajak yang dipungut (Rp)			
					PPN	PPh21	PPh22	PPh23
<b>I Biaya Gaji dan Upah</b>								
1	23 febuari 2019	Bapak Tukimin	Pembayaran honor narasumber dan teknisi pada pelatihan pengoperasian alat pelletizer	2.500.000				
2	20-Mei-19	Dr. Agus Haryanto (ketua)	Pembayaran Honor (Tahap 1, 2 dan3), 576 OJ, @Rp.50.000	28.800.000	-	-	-	-
3	31/09/2019	Dr. Wahyu Hidayat (Anggota 1)	Pembayaran Honor (Tahap 1, 2 dan3), 480 OJ, @Rp. 50.000	24.000.000	-	-	-	-
4	20-Sep-19	Dr. Sugeng Triyono (anggota 2)	Pembayaran Honor (Tahap 1, 2 dan3), 480 OJ, @Rp. 50.000	24.000.000				
5	20-Sep-19	Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani (anggota 3)	Pembayaran Honor (Tahap 1, 2 dan3), 480 OJ, @Rp. 50.000	24.000.000				
6	20-Sep-19	Dr. Amrul (anggota 4)	Pembayaran Honor (Tahap 1, 2 dan3), 480 OJ, @Rp. 50.000	24.000.000				
7	20-Sep-19	Dr. Mareli Telaumbanua	Pembayaran Honor (Tahap 1, 2 dan3), 480 OJ, @Rp. 50.000	24.000.000				
8	20-Sep-19	Prof. Dr. Heri Susanto (Narasumber)	Pembayaran honor Narasumber pada acara workshop dan kuliah umum "Thermal Conversion of Palm Oil Biomass Gasification"	8.000.000				
9	20-Sep-19	Dr. Bandung Sahari	Pembayaran Honor peneliti Mitra (Tahap 1, 2 dan3), 416 OJ, @Rp. 50.000	20.000.000				
10	20-09.2019		Pengolah data 20 Paket, @Rp. 1.540.000	30.000.000				

11	20-Jun-19	Prof. Udin Hasanuddin (Narasumber)	Pembayaran honor Narasumber pada acara workshop dan kuliah umum "Thermal Conversion of Palm Oil Biomass Gasification"	16.000.000				
12	20-Sep-19		Pembantu lapangan 240 OH, @Rp. 80.000	19.200.000				
13	20-Sep-19		Tenaga Administrasi, 60 OH @Rp 25.000	1.500.000				
...								
<b>Jumlah Total (I)</b>				<b>246.000.000</b>				
<b>II Biaya Pembelian bahan dan Peralatan</b>								
1	16-Jan-19	LUBNA Laboratory	Soxlet extraction	1.383.000	138.300	-	-	-
2	12 Febuari 2019	PT. Thermalindo sarana laboratoria	"PARR" Palin Jacket Calorymeter	172.000.000	17.200.000	-	-	-
3	13 Frbuari 2019	Yussi Akmal	Biaya snack dan makan siang rapat persiapan Monev	2.347.750				
4	19-Jan-19	Ahya Toko Lab kimia	Timbangan gantung 5 pcs	174.000	-	-	-	-
5	11 Febuari 2019	PT. Dunia Baru Aircon	1 Unit AC Dankin Standar	4.500.000	450.000	-	-	-
6	23 Febuari 2019	RM sederhana	Biaya makan siang acara pelatihan dan Percobaan penggunaan alat pelletizer di Lab. Lapang Unila	1.750.500				
7	06-Apr-19	PT. Toba Hijau Sinergi, SumUt	Pellet TKKS dan biaya tarnsportasi pengiriman ke Unila	3.850.000	375.000			
8	08-Apr-19	Lab. Inovasi Universitas Lampung	Biaya habis pakai bahan kimia untuk analisa SEM, FTIR dan TGA untuk 30 sampel pellet,	27.500.000				
9	12-Apr-19	Yussi Akmal dan RM. Begadang	Biaya habis pakai pelaksanaan workshop dan kuliah umum Gasifikasi dengan narasumber Prof. Dr. Herri Susanto (ITB)	1.093.000				
10	24-Apr-19	Bapak Sutrisno	Pembelian Inverter Reaktor COMB dan Ongkir	23.363.000				
11	22-Mei-19	Lab. Universitas Negeri Padang	Pembayaran analisa uji komposisi abu dengan XRF	2.800.000				
12	26-Jul-19	Bapak Tukimin	Pembelian alat Pelletizer biaya transfer dan ongkos kirim	55.000.000				
13	08-Agust-19	Ibu Wiwik Chistine	Pembelian bahan kimia analisa	5.006.500				
14	04-Sep-19	Lab. Pengelolaan Agroindustri, FP Unila	Penggantian biaya habis pakai analisa CHN untuk 30 sampel pellet @Rp. 450.000	13.500.000				
15	13-Sep-19	Laboratorium Termodinamika FT Unila cp. Dr. Amrul	Penggantian biaya habis pakai analisa CHN untuk 30 sampel pellet @Rp. 15.000	450.000				
16	13-Sep-19	Fotocopy	Fotocopy, materai dan biaya alat tulis kantor	927.250				
15	13-Sep-19	Bapak Tukimin	Biaya pembuatan 2 paket alat torefaksi, @Rp. 2500.000	5.000.000				
18	02-Sep-19	Yussi Akmal	Biaya snack dan makan siang rapat persiapan Monev Tahap II	924.250				



19	17-Sep-19	Bapak Sutrisno	Pembelian 2 buah Analytical Balance	48.000.000				
20	20-Sep-19	Ibu Wiwik Chistine	Pembelian bahan kimia analisa	13.000.000				
	....							
<b>Jumlah Total Biaya (II)</b>				<b>382.569.250</b>				
<b>III Biaya Perjalanan</b>								
1	02-Jan-19	Tiket Pesawat Ekonomi (3 Org). Bandar Lampung-Jakarta-Medan pp	Kunjungan Ke Industri Pellet , PT. Toba Hijau Sinergi Tebing Tinggi, Sumatera Utara	14.700.000	-	-	-	-
2	02-Jan-19	Prime Plaza Hotel Kualanamu	Biaya Penginapan untuk 3 Orang	1.983.600	-	-	-	-
3	06-Jan-19	Dr. Ir. Agus Haryanto (ketua)	Lumpsum berdasarkan 37 PMK/02/2018	1.100.000	-	-	-	-
4	06-Jan-19	Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T	Lumpsum berdasarkan 37 PMK/02/2018 @Rp. 370.000 OH selama 3 Hari	1.100.000	-	-	-	-
5	06-Jan-19	Dr. Eng. Dewi A. Iryani, S.T., M.T	Lumpsum berdasarkan 37 PMK/02/2018	1.100.000	-	-	-	-
6	06-Jan-19	Dr. Ir. Agus Heryanto (ketua)	Ke dan dari Bandara Lampung pp	344.000				
7	06-Jan-19	Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T	Ke dan dari Bandara Lampung pp	344.000				
8	06-Jan-19	Dr. Eng. Dewi A. Iryani, S.T., M.T	Ke dan dari Bandara Lampung pp	344.000	-	-	-	-
9	08-Jan-19	Dr. Eng. Dewi A. Iryani, S.T., M.T	Ke dan dari Medan pp	464.000	-	-	-	-
10	08-Jan-19	Dr. Ir. Agus Heryanto (ketua)	Ke dan dari Medan pp	464.000	-	-	-	-
11	08-Jan-19	Dr. Eng. Dewi A. Iryani, S.T., M.T	Ke dan dari Medan pp	464.000	-	-	-	-
12	07-Jan-19	Duta Rental Mobil	Kunjungan Ke Industri Pellet , PT. THS Tebing Tinggi, SumUt	750.000	-	-	-	-
13	17-Jan-19	Sewa kendaraan	Perjalanan Lokal PP, Lampung Timur 4OH, @Rp. 246.000	1.968.000				
		Dr. Agus Haryanto	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Sugeng T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Mareli T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Amrul	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Agus Haryanto	Penambah daya tahan tubuh, 4 OH, @Rp. 18.000	72.000				
15	04-06/08/2019	Tiket Pesawat Ekonomi (3 Org) Bandar Lampung-Jakarta pp	Mengikuti Presentasi dan pameran hasil riset di BPDPKS, Jakarta, @Rp. 1.058.200	3.174.600				
		Taksi Bandara Bandar Lampung (PP)	Mengikuti Presentasi dan pameran hasil riset di BPDPKS, Jakarta, @Rp. 330.000	990.000				
		Taksi Bandara Jakarta (PP)	Mengikuti Presentasi dan pameran hasil riset di BPDPKS, Jakarta, @Rp. 512.000	1.536.000				

		Hotel	Biaya Penginapan selama mengikuti presentasi dan pameran hasil riset di BPDPKS, Jakarta, @Rp. 656.000	656.000				
		Dr. Agus Haryanto	Lumpsum selama 2 hari @530.000	1.060.000				
		Dr. Sugeng T.	Lumpsum selama 2 hari @530.000	1.060.000				
		Dr. Mareli T.	Lumpsum selama 2 hari @530.001	1.060.000				
16	04-06/09/2019	Tiket Pesawat Ekonomi (4 Org) Bandar Lampung-Palembang pp	Mengikuti Presentasi dan Monev Tahap 2 hasil riset di BPDPKS, Palembang, @Rp. 1762200	7.048.800				
		Taksi Bandara Bandar Lampung (PP)	Mengikuti Presentasi dan Monev hasil riset Tahap 2 di BPDPKS, Palembang, @Rp. 334.000	1.336.000				
		Taksi Bandara Palembang (PP)	Mengikuti Presentasi dan Monev hasil riset Tahap 2 di BPDPKS, Palembang, @Rp. 254.000	1.016.000				
		Hotel	Biaya Penginapan selama mengikuti presentasi dan Monev hasil riset Tahap 2 di BPDPKS, Palembang, @Rp. 685.000	2.740.000				
		Dr. Agus Haryanto	Lumpsum selama 3 hari @380.000	1.140.000				
		Dr. Sugeng T.	Lumpsum selama 3 hari @380.000	1.140.000				
		Dr. Mareli T.	Lumpsum selama 3 hari @380.000	1.140.000				
		Dr. Amrul	Lumpsum selama 3 hari @380.000	1.140.000				
16.	15-Jul-19	Sewa kendaraan	Biaya Perjalanan Lokal PP, lampung Timur 4OH, @Rp. 246.000	1.968.000				
		Dr. Agus Haryanto	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Sugeng T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Mareli T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Amrul	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Agus Haryanto	Penambah daya tahan tubuh, 4OH, @Rp. 18.000	72.000				
17.	01-Agust-19	Sewa kendaraan	Perjalanan Lokal PP, Lampung Timur 4OH, @Rp. 246.000	1.968.000				
		Dr. Agus Haryanto	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Sugeng T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Mareli T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Amrul	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Agus Haryanto	Penambah daya tahan tubuh, 4 OH, @Rp. 18.000	72.000				
18.	17-Agust-19	Sewa kendaraan	Perjalanan Lokal PP, Lampung Timur 4OH, @Rp. 246.000	1.968.000				

		Dr. Agus Haryanto	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Sugeng T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Mareli T.	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Amrul	Uang harian @Rp.150.000	150.000				
		Dr. Agus Haryanto	Penambah daya tahan tubuh, 4 OH, @Rp. 18.000	72.000				
19.	14-15 September 2019	Tiket Pesawat Ekonomi (4 Org) Bandar Lampung-Bandung pp	Kunjungan Laboratorium ITB, 5OH pp @Rp. 800.000	8.000.000				
		Taksi Bandara Bd Lampung (PP)	Kunjungan Laboratorium ITB, 5OH pp @Rp. 334.000	1.670.000				
		Taksi Bandara Bandara (PP)	Kunjungan Laboratorium ITB, 5OH pp @Rp. 332.000	1.328.000				
		Hotel	Biaya Penginapan selama mengikuti Kunjungan Laboratorium Pyrolysis, ITB Bandung @Rp. 656.000	3.280.000				
		Dr. Agus Haryanto	Lumpsum 3 hari @430.000	860.000				
		Dr. Sugeng T.	Lumpsum 3 hari @430.000	860.000				
		Dr. Mareli T.	Lumpsum 3 hari @430.000	860.000				
		Dr. Amrul	Lumpsum 3 hari @430.000	860.000				
		Dr. Wahyu Hidayat	Lumpsum 3 hari @430.000	860.000				
19.	02-Sep-19	Tiket Pesawat Ekonomi (1 Org) Bandar Lampung-Jakarta pp	Pengurusan Visa Scencen (antar berkas), Republic Cheko untuk mengikuti Seminar TAE 2019	924.414				
		Taksi Bandara Bandar Lampung (PP)	Pengurusan Visa Scencen, Republic Cheko dalam Rangka mengikuti Seminar TAE 2019, @Rp. 330.000	330.000				
		Taksi Bandara Jakarta (PP)	Pengurusan Visa Scencen, Republic Cheko dalam Rangka mengikuti Seminar TAE 2019, Jakarta, @Rp. 512.000	5.120.000				
20	10-Sep-19	Tiket Pesawat Ekonomi (1 Org) Bandar Lampung-Jakarta pp	Pengurusan Visa Scencen (ambil berkas), Republic Cheko dalam Rangka mengikuti Seminar TAE 2019	895.337				
		Taksi Bandara Bandar Lampung (PP)	Pengurusan Visa Scencen, Republic Cheko dalam Rangka mengikuti Seminar TAE 2019, @Rp. 330.000	330.000				
		Taksi Bandara Jakarta (PP)	Pengurusan Visa Scencen, Republic Cheko dalam Rangka mengikuti Seminar TAE 2019, Jakarta, @Rp. 512.000	512.000				
		Kedutaan Republik Ceko	Pembayaran Visa	938.000				
21		Tiket Pesawat Ekonomi Bandar Lampung-Jakarta, menuju Prague	Perjalanan Seminar TAE 2019,	535.000				

22	15-22 September 2019	Tiket Pesawat Ekonomi Jakarta-Singapore-Prague,PP	Perjalanan Seminar TAE 2019, Prague, Republic Czech	13.526.093				
23	16-22/09/2019	Carl Inn Hotel, Prague	Biaya penginapan dalam rangka mengikuti Seminar TAE 2019, 5x1 OH	6.908.821				
24	16-22/09/2019	Dr. Eng. Dewi A. Iryani, S.T., M.T	Lumsump 5x1 OH, @Rp. 5.138.000	25.690.000	-	-	-	-
25	17 September 2019	<b>TAE Conference</b>	Pembayaran TAE "Conference fee"	5.255.202				
26	22/09/2019	Pembelian Tiket Pesawat Ekonomi Jakarta- Lampung	Biaya Perjalanan Jakarta-Bandar Lampung 1OH	626.700				
27	Sep-19	Penginapan Zest Hotel	Penginapan perjalanan pulang dari Jakarta-Bandar Lampung dalam Rangka TAE Conference	440.000				
28	Sep-19	Seminar ICSB 2019	Biaya pendaftaran seminar a.n Dr. Agus Haryanto, Mawar, Dr. Wahyu Hidayat (1), Dr. Wahyu Hidayat (2), @Rp. 2000.000 OH	8.000.000				
29	Sep-19	Seminar ICSB 2019	Uang harian @Rp.150.000, 2 OH untuk seminar ICSB 2019	300.000				
<b>Jumlah Total (III)</b>				<b>141.955.746</b>				
<b>IV. Biaya Operasional Institusi</b>								
1		Unila	Biaya Operasional Institusi	10.144.000				
2		Unila	Biaya Operasional Institusi	16.230.500				
3		Unila	Biaya Operasional Institusi	14.625.500				
<b>Jumlah Total (IV)</b>				<b>41.000.000</b>				

Bukti-bukti asli pengeluaran anggaran tersebut di atas disimpan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Lampung untuk kelengkapan administrasi dan pemeriksaan.

Bandar Lampung, 02 September 2019

Mengetahui  
Pejabat Pembuat Persetujuan  
Ketua LPPM Unila,



**Prof. Dr. Ir. Hamim Sudarsono, M.Sc**  
NIP. 196001191984031002

Ketua Peneliti



**Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P**  
NIP. 196505271993031002

## Lampiran III

### PUBLIKASI

*(diisi dengan seluruh publikasi yang dilakukan terkait penelitian/kajian yang dilakukan)*

1. Poster “Effect of Oxidative and Non-Oxidative Torrefaction on the Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunches Pellets” disajikan pada 2019 International Symposium of Institute of Forest Science (27 September 2019). Memenangkan **Best Poster Awards**.
2. Makalah TORREFACTION UPGRADING OF PALM OIL EMPTY FRUIT BUNCHES BIOMASS PELLETS FOR GASIFICATION FEEDSTOCK BY USING COMB (COUNTER FLOW MULTI-BAFFLE) REACTOR (Dewi Agustina IRYANI, Agus HARYANTO, Wahyu HIDAYAT, AMRUL, Mareli TALAMBANUA, Udin HASANUDIN, Sihyun LEE), disajikan pada 7thTAE 2019, 17 - 20 September 2019, Prague, Czech Republic.
3. Agus Haryanto, Peningkatan mutu bahan bakar biomassa melalui Torefaksi (Keynote Speaker pada Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri 2019 (SINTA 2019), Fakultas Teknik Universitas Lampung, 25 September 2019.
4. Skripsi mahasiswa S1 (Nur Rohmah, PS Teknik Pertanian, Universitas Lampung): Pemanfaatan Air Limbah Tahu untuk Menurunkan Kadar Kalium pada Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan Proses Pencucian.
5. Tesis Mahasiswa S2 (Lydia Mawar Ningsih, PS Magister Teknologi Industri Pertanian, Universitas Lampung): Pengembangan Teknologi Pencucian Kandungan Mineral Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Limbah Cair Tapioka
6. Skripsi Mahasiswa S1 (Raya Nita, PS Teknik Pertanian, Universitas Lampung): Pengaruh Putaran dan Lama Waktu Torefaksi Terhadap Kualitas Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit.
7. Agus Haryanto, Biomass Fuel from Oil Palm Empty Fruit Bunch Pellet: Potential and Challenges (INVITED SPEAKER, The 1st International Conference on Sustainable Biomass (ICSB) 2019 held on 15 – 17 October 2019 by collaboration of The Tropical Biomass Research and Development Center – University of Lampung, Gadjah Mada University (Yogyakarta), and Boras University (Sweden).
8. Makalah LEACHING OF POTASSIUM FROM EMPTY OIL PALM FRUIT BUNCH (OPEFB) USING TAPIOCA WASTEWATER (Lydia Mawar Ningsih, Agus Haryanto, Udin Hasanudin, Sugeng Triyono) Disajikan pada The 1st International Conference on Sustainable Biomass (ICSB) 2019 held on 15 – 17 October 2019.







## Effect of Oxidative and Non-Oxidative Torrefaction on the Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunches Pellets

Irma Thya Rani<sup>1</sup>, Indra Gumay Febryano<sup>1</sup>, Agus Haryanto<sup>1</sup>, Udin Hasanudin<sup>2</sup>, Dewi Agustina Iryani<sup>2</sup>, Sihyun Lee<sup>3</sup>, Wahyu Hidayat<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Agriculture, University of Lampung, Jl. Sumantri Brojonegoro 1, Bandar Lampung, 35145, Indonesia  
<sup>2</sup> Research and Development Center for Tropical Biomass, University of Lampung, Bandar Lampung 35145, Indonesia  
<sup>3</sup> Climate Change Research Division, Korean Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Republic of Korea  
 \* Corresponding author: [wahyu.hidayat@fp.unila.ac.id](mailto:wahyu.hidayat@fp.unila.ac.id)

### INTRODUCTION

Oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches (EFB) is solid wastes derived from palm oil production which has not been utilized optimally, hence it is considered as a low economic value resource. This biomass resource can be converted into bioenergy through torrefaction process. Torrefaction is a mild pyrolysis at temperatures ranging between 200 and 300°C and it is generally performed under inert (non-oxidative) atmosphere. The aim of this paper was to compare non-oxidative and oxidative torrefaction processes applying to EFB pellets.



### MATERIALS & METHODS

#### Materials

Sampel Preparation	Mass	Treatment		
		Temperature	Time	Torrefaction
Control (Without Treatment)	-	-	-	-
Oxidative	30-35 g	280°C	20 minute	Electric Furnaces
Non-oxidative	5 kg	280°C	5 minute	COMB reaktor

Table 1. Material and treatment of biomass pellets

#### Torrefaction Process

Feeding tests were carried out with different frequencies namely 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz and 25 Hz, then linear regression was performed so that the results of the feeding test were 17.6 Hz.



#### Non-oxidative Torrefaction using Reactor Counter-Flow Multi Baffle (COMB)



### RESULT

#### The appearance of raw and torrefied samples of EFB pellets



a. Non-torrefied Pellets      b. Torrefaction pellets use electric furnaces      c. Torrefaction pellets use COMB reactor

#### Water Immersion

Sample of pellets	Before immersion	5 min	30 min	1 h	6 h	12 h
CONTROL						
COMB reaktor						
Electric Furnaces						

Table 2. Water absorption test of the control and torrefied pellets.

#### Calor Value

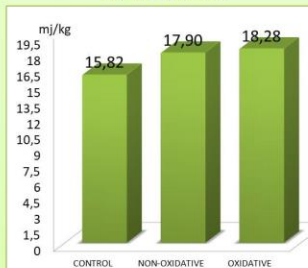


Diagram 1. analysis of calorific value

#### Density

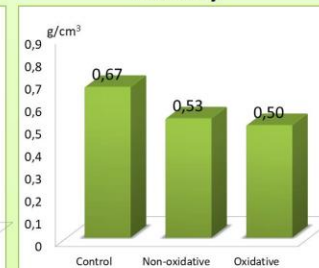


Diagram 2. density analysis

### CONCLUSION

- Non-oxidative Torrefaction with the COMB reactor produces a heating value of 17.90 MJ / kg, which is comparable to the results of oxidative torrefaction (with longer residence time) of 18.28 MJ / kg.
- The results suggested that torrefaction using a COMB reactor can provide a large improvement in the quality of biomass bioenergy properties which makes torrefied biomass very suitable for cofiring in power plants and as a raw material for gasification.

Acknowledgement : This research was supported by BPDPs under contract #PRI-85/DPKS/2018 and Forest Science & Technology Project provided by the Korean Institute of Energy Research