



Peningkatan Kualitas Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit melalui Torefaksi Menggunakan Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB)

Wahyu Hidayat¹, Irma Thya Rani¹, Tri Yulianto¹, Indra Gumay Febryano¹, Dewi Agustina Iryani², Udin Hasanudin¹, Sihyun Lee³, Sangdo Kim³, Jiho Yoo³, dan Agus Haryanto^{1*}

¹Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

Jl. Sumantri Brojonegoro 1, Bandar Lampung, 35145

²Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Jl. Sumantri Brojonegoro 1, Bandar Lampung, 35145

³Climate Change Research Division, Korean Institute of Energy Research
Daejeon, 34129, Republic of Korea

*Alamat korespondensi: agus.haryanto@fp.unila.ac.id

(Submisi: 11 Juni 2020; Revisi: 23 Agustus 2020; Penerimaan: 30 Agustus 2020)

ABSTRACT

*Oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches (EFB) have not been utilized optimally. Currently, it is considered as a resource with low economic value. This biomass can be converted into bioenergy through a torrefaction process. Torrefaction is a mild pyrolysis at temperatures ranging between 200 and 300 °C, and it is generally performed under an inert atmosphere. The objective of this study was to evaluate the effects of torrefaction using Counter-Flow Multi Baffle (COMB) on the properties of oil palm EFB pellets. Torrefaction was conducted at 280 °C temperature with a residence time of 4 minutes. The results showed a decrease in the equilibrium moisture content and an increase in hydrophobicity after torrefaction using the COMB reactor. The change in the hygroscopic property could make the oil palm EFB pellet more stable against chemical oxidation and microbial degradation, hence self-heating and auto-ignition during storage could be prevented. The heating value of biomass increased after torrefaction. Torrefaction with the COMB reactor resulted in a heating value of 17.90 MJ/kg, which is comparable with the results of oxidative torrefaction (with longer residence time) of 18.28 MJ/kg. The results suggested that torrefaction using the COMB reactor could provide a great improvement in the quality of the bioenergetic properties of oil palm EFB pellets. However, the high ash content of the EFB pellets implied that the EFB pellets suitable for a small-scale application, but not yet for cofiring in power plants or as a feedstock for gasification.*

Keywords: Counter-Flow Multi Baffle; oil palm empty fruit bunches; renewable; torrefaction

ABSTRAK

Tandan kosong kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) belum dimanfaatkan secara optimal. Saat ini bahan tersebut masih dianggap sebagai sumber daya bernilai ekonomi rendah. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dapat dikonversi menjadi bioenergi melalui proses torefaksi. Torefaksi merupakan proses pirolisis ringan pada suhu berkisar antara 200 dan 300 °C dan umumnya dilakukan di bawah kondisi inert. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh torefaksi dengan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) terhadap sifat-sifat pelet TKKS. Torefaksi dilakukan pada suhu 280 °C dengan waktu tinggal 4 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa torefaksi menyebabkan penurunan kadar air kesetimbangan dan menjadi hidrofobik setelah torefaksi dengan reaktor COMB. Perbaikan sifat higroskopis dapat membuat pelet TKKS lebih stabil terhadap oksidasi kimia dan degradasi mikroba, sehingga pemanasan sendiri dan pembakaran spontan selama penyimpanan dapat dicegah. Nilai kalor biomassa meningkat setelah torefaksi. Torefaksi dengan reaktor COMB menghasilkan nilai kalor 17,90 MJ/kg, yang sebanding dengan hasil torefaksi oksidatif dengan waktu tinggal lebih lama, sebesar 18,28 MJ/kg. Hasil penelitian menunjukkan bahwa torefaksi dengan reaktor COMB dapat meningkatkan kualitas energi pelet TKKS. Tetapi pelet TKKS masih memiliki kadar abu yang tinggi sehingga biomassa hasil torefaksi belum sesuai untuk *cofiring* di pembangkit listrik atau sebagai bahan baku untuk gasifikasi.

Kata kunci: *Counter-Flow Multi Baffle*; tandan kosong kelapa sawit; terbarukan; torefaksi

1. Pendahuluan

Biomassa memainkan peranan penting dalam pemenuhan energi terbarukan di Indonesia. Hal ini sejalan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan 23% bauran energi Indonesia pada tahun 2025 berasal dari sumber-sumber terbarukan termasuk dari biomassa. Biomassa dapat dianggap sebagai solusi yang menarik dan komponen penting dalam diversifikasi sumber energi, karena relatif murah (terutama bila berasal dari limbah pertanian atau kayu) dan tersedia secara luas (Szwaja dkk., 2019). Pemenuhan energi dari biomassa di Indonesia menunjukkan jumlah yang cukup signifikan. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (2019) melaporkan bahwa konsumsi energi yang berasal dari biomassa di tahun 2018

diperkirakan mencapai 67,75 juta barel setara minyak (*barrel of oil equivalent/BOE*) atau 7,24% dari konsumsi energi keseluruhan sebesar 936,33 juta BOE.

Salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia adalah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). Luas perkebunan kelapa sawit semakin meningkat dari tahun ke tahun. Pada tahun 2018, luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia meningkat menjadi 14,33 juta ha dibandingkan tahun 2012 seluas 10,13 juta ha (BPS, 2019) dan menjadikan Indonesia sebagai penghasil minyak sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO) terbesar di dunia (Mellyanawaty dkk., 2019). Peningkatan luas perkebunan kelapa sawit diiringi dengan bertambahnya pabrik kelapa sawit (PKS) dari 604 PKS pada tahun 2014 (Hambali dan Rivai, 2017) menjadi 742 pada tahun (Irvan dkk., 2017), sehingga potensi limbah biomassa dari PKS juga semakin meningkat. Limbah biomassa dari PKS terdiri dari Tandan Kosong

Kelapa Sawit (TKKS), serat, dan cangkang sawit. Limbah TKKS mencapai 22% dari berat tandan buah segar (TBS) dan merupakan limbah padat dengan persentase terbesar (Hasanudin dkk., 2015). Selain dikembalikan ke lahan sebagai mulsa, TKKS masih belum banyak dimanfaatkan. Limbah TKKS memiliki banyak potensi pemanfaatan, di antaranya sebagai bahan pupuk kompos (Haryanto dkk., 2019; Sentana dkk., 2013), bahan media budidaya jamur merang (Triyono dkk., 2019), hingga sumber asam laktat (Sitompul dkk., 2019).

Komponen kimia TKKS terdiri dari selulosa (23,70–65,00%), hemiselulosa (20,58–33,52%), lignin (14,10–30,45%), dan ekstraktif (3,21–3,70%) sehingga memiliki potensi sebagai sumber energi yang cukup besar (Chang, 2014). Namun, pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi menghadapi kendala karena biomassa dalam kondisi mentah (tanpa perlakuan) pada umumnya memiliki kepadatan energi yang lebih rendah, serta kadar air dan kadar zat terbang yang tinggi bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil seperti batubara (Azhar dan Rustamaji, 2012; Mamvura dan Danha, 2020). Oleh karena itu, biomassa membutuhkan perlakuan untuk meningkatkan sifat-sifatnya sebelum dapat digunakan bersama atau sebagai pengganti batubara. Di antara berbagai metode perlakuan, torefaksi adalah teknik yang menjanjikan untuk meningkatkan kualitas biomassa padat (Barskov dkk., 2019). Torefaksi merupakan proses termokimia yang melibatkan pemanasan biomassa pada suhu 200–300 °C dalam kondisi sedikit atau tanpa oksigen (Mamvura dan Danha, 2020). Ketika dikombinasikan dengan peletisasi, torefaksi menghasilkan pelet dengan nilai kalor tinggi dan sifat-sifat lain seperti sifat hidrofobik dan

peningkatan karakteristik penggilingan (*grindability*) yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa yang tidak melalui proses torefaksi (Nunes dkk., 2014).

Penelitian ini mengkaji torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit dengan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). Reaktor COMB memiliki kolom reaktor dengan plat pengarah aliran panas yang sederhana dan fleksibel, serta perbedaan suhu yang konstan di sepanjang kolom (Rubiyanti dkk., 2019). Kelebihan utama dari reaktor COMB adalah dapat melakukan torefaksi biomassa dengan waktu tinggal singkat, sekitar 3-5 menit (Iryani dkk., 2019; Rani dkk., 2020; Sulistio dkk., 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pelet TKKS yang diproduksi melalui proses torefaksi dengan reaktor COMB.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelet TKKS yang diperoleh dari PT. Toba Hijau Sinergi, Medan, Sumatera Utara.

2.2 Metode Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Desember 2019 hingga Maret 2020. Persiapan bahan dan proses torefaksi dilakukan di Laboratorium Lapang Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Pengukuran nilai kalor dan analisis proksimat dilakukan di Laboratorium Daya dan Alat Mesin Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Analisis komposisi kimia dilakukan di Laboratorium Biofuel Fakultas Teknik dan analisis FTIR dilakukan di Laboratorium Inovasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Bahan baku pelet TKKS diayak menggunakan saringan kawat untuk memisahkan serbuk dan debu halus. Pelet kemudian disortir berdasarkan ukuran panjangnya. Pelet TKKS yang digunakan memiliki diameter rata-rata 8,71 mm, panjang pelet berkisar 10-20 mm, kerapatan 0,58 g/cm³, dan kadar air 11,54%. Sebelum dilakukan torefaksi, sampel pelet kemudian disimpan dalam kontainer plastik untuk menjaga kadar airnya.

Torefaksi pelet TKKS dilakukan dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) dengan kapasitas proses 20 kg/jam (Gambar 1). Pelet TKKS dimasukkan ke dalam pengumpan biomassa (*feeder*) dengan frekuensi putaran 17,60 Hz. Pelet kemudian menuju ke kolom reaktor (*column*) tempat biomassa mengalami proses torefaksi. Pelet kemudian turun ke kolom reaktor sepanjang 3,85 m yang terdiri dari pelat metal (*baffle*) dengan kemiringan 45°. Partikel-partikel

halus yang masih menempel pada pelet TKKS masuk ke bagian penyaring partikel halus (*fine dust collector*) melalui *cyclone* dengan panjang pipa 2,90 m. Gas panas dari pembakar (*burner*) dialirkan oleh *induction drag fan* (ID fan) dari bagian bawah ke bagian atas kolom reaktor dengan kecepatan aliran 4,76 m³/menit. Suhu selama proses pada kolom reaktor bagian atas (*column-top*) sekitar 280 °C dan pada kolom bagian bawah (*column-in*) sekitar 230 °C. Waktu tinggal (*residence time*) sekitar 5 menit. Reaktor COMB juga memiliki bagian pendinginan gas (*heat exchanger*) untuk mencegah suhu proses yang terlalu tinggi dengan panjang pipa 3,00 m.

Pelet TKKS sebelum dan setelah torefaksi diuji karakteristiknya meliputi kadar air, analisis komposisi kimia, karakterisasi gugus fungsional, nilai kalor, dan analisis proksimat.



Gambar 1. Skema reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) (Sulistio dkk., 2020)

Pengujian kadar air dilakukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 8675:2018 (BSN, 2018). Kadar air sampel sebelum dan setelah torefaksi dilakukan dengan mengukur berat kering udara dan berat kering oven. Komposisi kimia lignoselulosik dianalisis menggunakan modifikasi metode Chesson (Datta, 1981). Karakterisasi gugus fungsional dilakukan dengan menggunakan spektrometer *Fourier-Transform Infrared* (FTIR) (Scimitar 2000 FT-IR, Varian Inc., USA). Sampel pelet TKKS sebanyak 2 g (kering oven) bersama padatan KBr digerus dalam mortar kecil, lalu dicetak dengan cara dipres dalam cetakan berbentuk cincin dengan rata. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam spektrometer FTIR untuk kemudian dianalisis. Semua spektrum dicatat pada suhu kamar. Pengukuran nilai kalor dilakukan menggunakan 5 g sampel kering oven dari pelet yang dihancurkan menjadi serbuk. Pengukuran nilai kalor dilakukan dengan menggunakan *bomb calorimeter* (PARR 1341 *Calorimeter, Parr Instrument, USA*) berdasarkan SNI 8675:2018 (BSN, 2018).

Analisis proksimat dilakukan dengan mengukur kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, dan kadar karbon terikat berdasarkan SNI 8675:2018 (BSN, 2018). Sebelum dilakukan pengujian, sampel pelet TKKS dijadikan serbuk dengan cara digerus di dalam mortar. Pengujian kadar abu menggunakan 2 g sampel. Sampel tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cawan porselen dan diabukan dalam tanur listrik pada suhu 550 °C selama 2 jam. Pengujian kadar zat terbang (*volatile matter*) dilakukan dengan memasukkan cawan porselen berisi 2 g sampel ke dalam dalam tanur listrik dan dipirolisis pada suhu 950 °C selama 7 menit.

Kadar karbon terikat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Kadar karbon terikat (\%)} = 100\% - (\text{Kadar air (\%)} + \text{Kadar zat terbang (\%)} + \text{Kadar abu (\%)})$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kadar Air

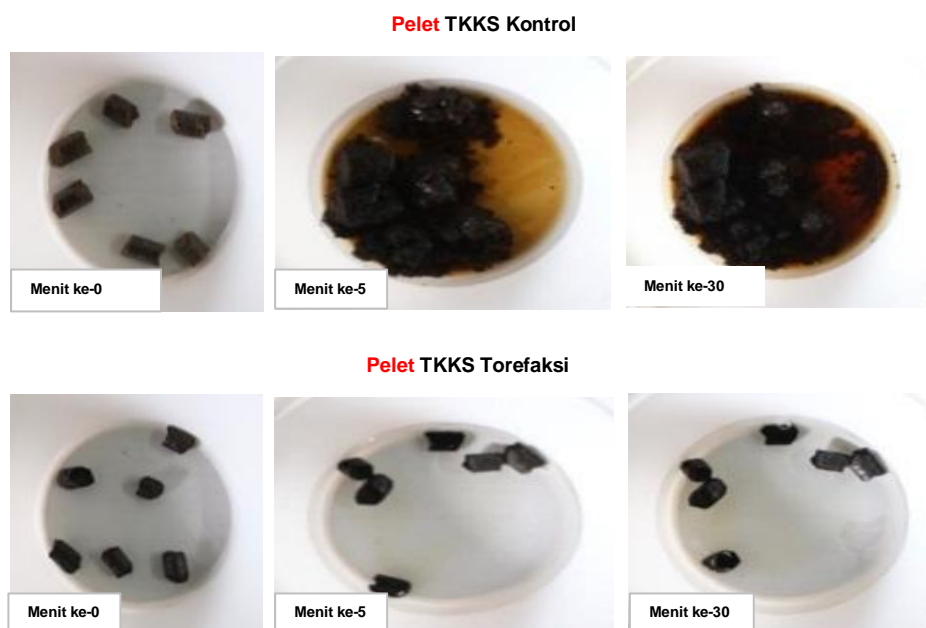
Kadar air pelet TKKS sebelum perlakuan (11,54%) menurun setelah proses torefaksi dengan reaktor COMB (7,86%). Penelitian sebelumnya (Yulianto dkk., 2020) melakukan torefaksi pelet TKKS dalam lingkungan oksidatif menggunakan *electric furnace* pada suhu 280 °C dengan waktu tinggal (*residence time*) 20 menit dan melaporkan kadar air pelet setelah torefaksi yang lebih rendah (6,66%). Hal sejalan dengan pernyataan Álvarez dkk., (2017) bahwa penurunan kadar air biomassa setelah proses torefaksi dipengaruhi oleh waktu tinggal dan ketersediaan oksigen (torefaksi oksidatif dan non-oksidatif). Parameter proses yang memengaruhi hasil torefaksi lainnya meliputi suhu reaksi, waktu tinggal, laju pemanasan, tekanan atmosfer, serta kelembaban dan ukuran bahan baku (Mamvura dan Danha, 2020; Nunes dkk., 2014; Tumuluru dkk., 2011). Secara keseluruhan, kadar air pelet TKKS hasil torefaksi dengan reaktor COMB masih memenuhi nilai yang disyaratkan standar SNI 8675:2018 (BSN, 2018) sebesar 10% untuk penggunaan rumah tangga dan 12% untuk penggunaan industri.

Pelet TKKS hasil torefaksi dengan reaktor COMB lebih tahan terhadap air (hidrofobik) dibandingkan dengan pelet kontrol yang bersifat hidrofilik. Hasil uji rendam menunjukkan bahwa pelet TKKS kontrol mulai pecah setelah perendaman selama 5 menit

dan mengalami disintegrasi seiring bertambahnya waktu perendaman, sedangkan pelet hasil torefaksi dengan reaktor COMB tidak menunjukkan perubahan bentuk yang berarti, bahkan setelah perendaman selama 12 jam (Gambar 2). Penyerapan uap air setelah torefaksi sangat terbatas dan ini menyiratkan bahwa degradasi biologis tidak terjadi lagi (Nunes dkk., 2014). Deng dkk. (2009) menyatakan bahwa torefaksi menyebabkan biomassa menjadi benar-benar kering dan merubah sifat higroskopis menjadi hidrofobik. Perubahan sifat higroskopis pelet TKKS setelah torefaksi berhubungan dengan perubahan komposisi kimia kayu terutama akibat degradasi hemiselulosa (Tabel 2). Tumuluru dkk. (2011) bahwa perlakuan termal terhadap biomassa menyebabkan biomassa melepaskan senyawa hidroksil (OH) dan meningkatkan hidrofobisitas biomassa.

Biomassa yang bersifat hidrofilik dapat menimbulkan masalah terutama dalam penyimpanan skala besar untuk keperluan stok. Bahan yang mudah terbakar seperti

batubara dan biomassa yang ditumpuk (disimpan) dalam volume dan durasi tertentu bisa mengalami kebakaran akibat pembakaran spontan (*spontaneous combustion*) yang dipicu oleh panas yang dihasilkan dari reaksi kondensasi dan oksidasi biokimia (Ashman dkk., 2018; Ünal, 1995). Peristiwa kebakaran biomassa dalam penyimpanan yang terjadi pada periode 2000-2018 telah dilaporkan oleh Krigstin dkk. (2018) yang mencatat 69 kasus di benua Amerika dan Eropa. Oleh karena itu, perubahan sifat higroskopis pelet TKKS menjadi hidrofobik sangat penting untuk mencegah bahaya kebakaran selama penyimpanan. Secara umum, penurunan kadar air selama torefaksi memberikan tiga manfaat utama, yaitu: mengurangi tingkat kelembaban untuk proses konversi lanjutan, mengurangi biaya transportasi terkait dengan penurunan berat biomassa, dan pencegahan dekomposisi biomassa dan penyerapan air selama penyimpanan dan transportasi (Tumuluru dkk., 2011).



Gambar 2. Perubahan pelet TKKS kontrol dan pelet torefaksi setelah direndam air

3.2 Komposisi kimia

Komposisi kimia pelet TKKS mengalami perubahan setelah torefaksi. Tabel 2 menunjukkan bahwa kandungan hemiselulosa pelet TKKS mengalami penurunan setelah torefaksi pada suhu 280 °C, sedangkan kandungan selulosa relatif tetap. Lu dkk. (2012) melakukan torefaksi terhadap serat kelapa sawit dan melaporkan bahwa degradasi hemiselulosa mulai terjadi pada suhu 275 °C dan sebagian besar selulosa terdegradasi pada suhu 350 °C. Rani dkk. (2020) melaporkan bahwa torefaksi pelet TKKS dalam lingkungan oksidatif menggunakan *electric furnace* pada suhu 280 °C dengan waktu tinggal (*residence time*) 20 menit menyebabkan kandungan hemiselulosa menurun menjadi 15%, selulosa menurun menjadi 27%, dan lignin meningkat menjadi 46%. Hasil penelitian sejalan dengan Irawan dkk. (2015) yang menyatakan bahwa penurunan kandungan hemiselulosa dipengaruhi oleh suhu perlakuan dan waktu tinggal pada proses torefaksi.

Tabel 1. Kadar air pelet TKKS

| Perlakuan | Suhu (°C) | Durasi (Menit) | Kadar air (%) |
|---|-----------|----------------|--|
| Kontrol | - | - | 11,54 (0,43) |
| Reaktor COMB | 280 | 4 | 7,86 (1,09) |
| <i>Electric furnace</i> (Yulianto dkk., 2020) | 280 | 20 | 6,66 (0,89) |
| SNI 8675:2018 | | | ≤ 10 (rumah tangga) ≤ 12 (industri) |

Keterangan: Nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan. Angka dalam kurung adalah standar deviasi.

Hemiselulosa akan terdekomposisi lebih cepat dibandingkan selulosa dan lignin ketika

proses torefaksi (Barskov dkk., 2019; Lu dkk., 2012). Barskov dkk., (2019) menyatakan bahwa lignin merupakan komponen lignoselulosa paling stabil dan tidak mulai terdekomposisi sampai suhu mencapai lebih dari 300 °C. Degradasi hemiselulosa selama proses torefaksi menyebabkan perubahan sifat higroskopis biomassa, dari hidrofilik menjadi hidrofobik (Acharya dkk., 2015). Sebaliknya, peningkatan fraksi selulosa dan lignin setelah torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor biomassa (Barskov dkk., 2019).

Tabel 2. Komposisi kimia pelet TKKS kontrol dan setelah torefaksi dengan reaktor COMB

| Perlakuan | Suhu (°C) | Durasi (Menit) | Komponen Kimia (%) | | | |
|--------------|-----------|----------------|--------------------|----------|--------|-----------|
| | | | Hemi-selulosa | Selulosa | Lignin | lain-lain |
| Kontrol | - | - | 26 | 35 | 17 | 22 |
| Reaktor COMB | 280 | 4 | 15 | 35 | 31 | 19 |

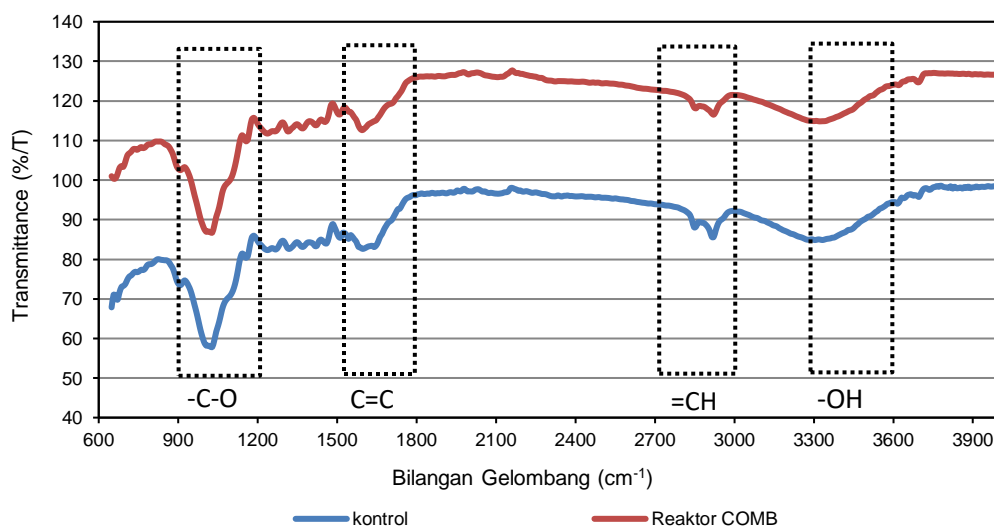
3.3 Karakteristik Gugus Fungsi

Hasil analisis karakteristik gugus fungsi dengan FTIR menunjukkan bahwa torefaksi memengaruhi perubahan gugus fungsi kimia pelet TKKS. Perubahan gugus fungsi pelet TKKS di beberapa kisaran gelombang ditandai pada Gambar 3. Bilangan gelombang antara 900-1200 cm⁻¹ yang merupakan vibrasi gugus fungsi C=O merupakan kelompok senyawa ester karbonil dan ikatan asetil, mengalami perubahan dari curam menjadi lebih landai setelah torefaksi dengan reaktor COMB. Perubahan puncak spektra menggambarkan peristiwa pemutusan ikatan asetil yang mewakili ikatan hemiselulosa akibat dari proses pemanasan selama proses torefaksi. Sebaliknya, bilangan gelombang 1500-1800 cm⁻¹ yang merupakan vibrasi gugus fungsi C=C berubah dari landai

menjadi lebih curam setelah torefaksi. Gugus fungsi C=C merupakan struktur penyusun lignin aromatik (Iryani dkk., 2017; Pangau dkk., 2017) dan perubahan yang terjadi pada gugus fungsi tersebut menjelaskan peningkatan senyawa yang mirip dengan komponen lignin (*acid insoluble lignin-like materials*) setelah proses torefaksi. Peningkatan kadar asam lignin terjadi dikarenakan adanya degradasi karbohidrat selama proses pemanasan. Menurut Iryani dkk. (2014), monomer atau gula-gula sederhana yang berasal dari hemiselulosa atau selulosa selama terjadinya peningkatan temperatur, akan ter volatilisasi dan selanjutnya terkondensasi menjadi material yang lengket di permukaan serat. Material yang lengket hasil kondensasi tersebut tidak dapat larut dalam larutan asam. Sehingga, pada saat analisis dengan menggunakan asam sulfat, material tersebut terukur sebagai kadar lignin atau disebut juga material lignin yang tidak larut dalam asam.

Selama proses torefaksi terjadi penguapan air dan degradasi senyawa-senyawa volatil.

Proses degradasi senyawa volatil sangat jelas terlihat pada pengurangan gugus -OH yang terbaca pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1} . Kisaran bilangan gelombang $3300\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan vibrasi gugus fungsi O-H berubah dari curam menjadi lebih landai setelah torefaksi. Gugus fungsi O-H juga merupakan penyusun struktur gugus fungsi hemiselulosa dan selulosa (Lestari dkk., 2018), dan perubahan gugus fungsi tersebut menjadi landai menjelaskan degradasi hemiselulosa yang disebabkan perlakuan termal melalui torefaksi dengan reaktor COMB. Hasil penelitian sejalan dengan pernyataan Tumuluru dkk. (2011) dan Iryani dkk. (2017), bahwa perlakuan termal terhadap biomassa berlignoselulosa memecahkan ikatan selulosa dan hemiselulosa, sehingga menyebabkan biomassa berlignoselulosa melepaskan senyawa hidroksil (OH) dan meningkatkan hidrofobitas biomassa.



Gambar 3. Spektrum FTIR pelet TKKS

3.4 Nilai Kalor

Nilai kalor menjadi salah faktor utama dalam pemilihan bahan bakar padat seperti pelet biomassa. Nilai kalor menentukan kandungan energi kuantitatif dari suatu jenis bahan bakar. Nilai kalor pelet TKKS setelah torefaksi dengan reaktor COMB meningkat menjadi 17,90 MJ/kg, atau meningkat sebesar 13,15% dibandingkan dengan pelet TKKS kontrol (Tabel 3). Peningkatan nilai kalor hasil torefaksi dengan reaktor COMB sedikit lebih rendah dibandingkan dengan torefaksi dengan waktu tinggal yang lebih lama. Rani dkk. (2020) melakukan torefaksi pelet TKKS pada suhu 280 °C dengan waktu tinggal 20 menit dan melaporkan nilai kalor 18,28 MJ/kg atau peningkatan sebesar 15,55%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa torefaksi dengan reaktor COMB mampu mempersingkat waktu proses dengan hasil yang cukup sebanding dan pelet TKKS yang dihasilkan dapat memenuhi nilai yang disyaratkan standar SNI 8675:2018 (BSN, 2018).

Tabel 3. Nilai kalor pelet TKKS

| Perlakuan | Suhu (°C) | Durasi (menit) | Nilai Kalor (MJ/kg) |
|---------------|-----------|----------------|---------------------|
| Kontrol | - | - | 15,82 |
| Reaktor COMB | 280 | 4 | 17,90 |
| SNI 8675:2018 | | | ≥16.50 |

Tumuluru dkk. (2011) menyatakan bahwa peningkatan nilai kalor pada proses torefaksi dipengaruhi oleh parameter proses, terutama suhu reaksi dan waktu tinggal. Nunes dkk. (2014) menyatakan bahwa proses torefaksi dimulai ketika suhu mencapai 200 °C dan selama torefaksi, biomassa terdekomposisi

sebagian, melepaskan beberapa jenis senyawa yang mudah menguap. Biomassa kehilangan lebih banyak oksigen dan hidrogen dibandingkan dengan karbon selama proses torefaksi, yang mengarah pada peningkatan nilai kalor (Chew dan Doshi, 2011). Massa dan energi dalam biomassa torefaksi akan terus tersimpan dalam produk padat untuk waktu yang lama, karena material tidak mengalami degradasi seiring dengan waktu.

Parikh dkk. (2005) menyatakan bahwa nilai kalor memiliki korelasi positif dengan kadar zat terbang dan berkorelasi negatif dengan kadar abu. Dengan kata lain, peningkatan kadar karbon tetap dan kadar zat terbang dapat meningkatkan nilai kalor, sedangkan peningkatan kadar abu dapat menurunkan nilai kalor biomassa. Hasil penelitian sejalan dengan korelasi Parikh dkk. (2005) yang menunjukkan penurunan kadar abu dan peningkatan kadar karbon tetap, sehingga nilai kalor pelet TKKS setelah torefaksi meningkat (Tabel 3). Namun, kadar zat terbang pelet TKKS mengalami penurunan setelah torefaksi dengan reaktor COMB. Hal ini kemungkinan dipengaruhi oleh waktu tinggal yang singkat (4 menit). Penelitian sebelumnya (Rani dkk., 2020) melakukan torefaksi pelet TKKS pada suhu 280 °C dengan waktu tinggal lebih lama (20 menit) dan melaporkan kadar zat terbang yang lebih tinggi (61,21%) setelah torefaksi. Secara keseluruhan, parameter kadar air, kadar zat terbang, dan kadar karbon tetap dapat memenuhi nilai yang disyaratkan standar SNI 8675:2018 (BSN, 2018). Namun, kadar abu pelet TKKS baik kontrol maupun hasil torefaksi dengan reaktor COMB masih melebihi nilai maksimal yang disyaratkan standar SNI 8675:2018 sebesar 5%.

Nilai kalor pelet biomassa juga dipengaruhi oleh kadar air. Menurut Mahdie dkk. (2016), pelet berkadar air tinggi akan memiliki nilai kalor yang rendah karena sebagian energi dalam pelet akan digunakan untuk menguapkan air yang terkandung pada pelet. Hasil pengukuran kadar air pelet TKKS kontrol dan pelet pada analisis proksimat menunjukkan perbedaan dengan hasil pengukuran kadar air pada Tabel 1. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan contoh uji, pengujian kadar air pada analisis proksimat berupa pelet TKKS yang sudah diubah menjadi serbuk sedangkan pengujian kadar air pada Tabel 1 berupa pelet utuh. Namun, secara umum hasil menunjukkan kecenderungan yang sama, kadar air menurun setelah torefaksi.

Tabel 4. Hasil analisis proksimat pelet TKKS

| Perlakuan | Kadar Air (%) | Kadar Abu (%) | Kadar Zat Terbang (%) | Kadar Karbon Tetap (%) |
|---------------|--|---------------|--|------------------------|
| Kontrol | 5,47 | 14,95 | 69,55 | 10,03 |
| Reaktor COMB | 4,02 | 13,49 | 54,84 | 27,65 |
| SNI 8675:2018 | ≤ 10 (rumah tangga) ≤ 12 (industri) | ≤ 5 | ≤ 75 (rumah tangga) ≤ 80 (industri) | ≥ 14 |

Tabel 4 menunjukkan bahwa kadar abu pelet TKKS masih tinggi mencapai 14,95% untuk pelet tanpa torefaksi. Proses torefaksi dengan reaktor COMB hanya sedikit saja menurunkan kadar abu, menjadi 13,49%. Tingginya kadar abu pelet merupakan salah satu kendala untuk aplikasi pelet sebagai bahan bakar yang melibatkan suhu tinggi. Pada suhu yang tinggi, beberapa jenis mineral dalam abu seperti kalium (K), khlor (Cl), dan silika (Si) dapat menghasilkan reaksi yang

tidak dikehendaki yang dapat memicu terjadinya aglomerasi dan kerak pada komponen boiler sehingga menurunkan efisiensi pembakaran hingga kerusakan tungku dan boiler (Jenkins dkk., 2000).

4. Kesimpulan

Kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dapat ditingkatkan melalui torefaksi dengan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). Pelet TKKS hasil torefaksi lebih cocok daripada biomassa mentah dalam hal sifat fisik, kimia, dan nilai kalor. Pelet hasil torefaksi bersifat hidrofobik sehingga dapat disimpan dalam waktu lebih lama. Nilai kalor pelet torefaksi meningkat sekitar 13,15% dari 15,82 MJ/kg menjadi 17,90 MJ/kg. Kadar abu pelet torefaksi masih tinggi (13,49%) melampaui batas Standar Nasional Indonesia sehingga pemakaiannya untuk bahan bakar masih terbatas pada industri skala kecil. Penggunaan untuk bahan bakar yang melibatkan suhu tinggi seperti pembangkit listrik masih memerlukan perlakuan lain.

Ucapan Terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Korea Institute of Energy Research (KIER), Korea Selatan (No. Kontrak: KIER-2019-0025) dan Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP) Sawit (Kontrak: PRJ-85/DPKS/2018, Tanggal 24 September 2018) yang telah mendanai penelitian ini.

Daftar Pustaka

Acharya, B., Dutta, A. and Minaret, J., 2015, Review on comparative study of dry and wet torrefaction, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 12, 26–37.

- Álvarez, A., Gutiérrez, I., Pizarro, C., Lavín, A.G. and Bueno, J.L., 2017, Comparison between oxidative and non-oxidative torrefaction pretreatment as alternatives to enhance properties of biomass, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 224, 247–255.
- Ashman, J.M., Jones, J.M. and Williams, A., 2018, Some characteristics of the self-heating of the large scale storage of biomass, *Fuel Process. Technol.*, 174, 1–8.
- Azhar and Rustamaji, H., 2012, Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi, *Jurnal Rekayasa Proses*, 3 (2), 26–29.
- Barskov, S., Zappi, M., Buchireddy, P., Dufreche, S., Guillory, J., Gang, D., Hernandez, R., et al., 2019, Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks, *Renewable Energy*, 142, 624–642.
- BPS., 2019, Statistik Indonesia 2019, Badan Pusat Statistik, Jakarta, Indonesia, available at: <https://www.bps.go.id/publication/download.html?nrbvfeve=ZGFhYzFiYTE4Y2FIMWU5MDcwNmVINThh&xzmn=aHR0cHM6Ly93d3cuYnBzLmdvLmlkL3B1YmxpY2F0aW9uLzlwMTkvMDcvMDQvZGFhYzFiYTE4Y2FIMWU5MDcwNmVINThhL3N0YXRpc3Rpay1pbmRvbmVzaWEtMjAxOS5odG1s&twoa dfnoarfeauf=MjAyMC0wNi0>.
- BSN., 2018, SNI 8675: Pelet Biomassa untuk Energi, Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta, Indonesia.
- Chang, S.H., 2014, An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production, *Biomass and Bioenergy*, 62, 174–181.
- Chew, J.J. and Doshi, V., 2011, Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 15 (8), 4212–4222.
- Datta, R., 1981, Acidogenic fermentation of lignocellulose-acid yield and conversion of components, *Biotechnol. Bioeng.*, 23 (9), 2167–2170.
- Deng, J., Wang, G.J., Kuang, J.H., Zhang, Y.L. and Luo, Y.H., 2009, Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via Torrefaction, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 86 (2), 331–337.
- Hambali, E. and Rivai, M., 2017, The potential of palm oil waste biomass in Indonesia in 2020 and 2030, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 65, p. 012050.
- Haryanto, A., Hasanudin, U., Sahari, B. and Sugiarto, R., 2019, Methane emission reduction in palm oil mill through co-composting empty fruit bunch and palm oil mill effluent, *Procedia Environ. Sci., Eng. Manage.*, 6 (3), 431–441.
- Hasanudin, U., Sugiharto, R., Haryanto, A., Setiadi, T. and Fujie, K., 2015, Palm oil mill effluent treatment and utilization to ensure the sustainability of palm oil industries, *Water Sci. Technol.*, 72 (7), 1089–1095.
- Irawan, A., Riadz, T. and Nurmalisa., 2015, Proses torefaksi tandan kosong sawit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air, *Reaktor*, 15 (3), 190–195.
- Irvan, Trisakti, B., Husaini, T., Sitio, A. and Sitorus, T.B., 2017, Performance evaluation on otto engine generator using gasoline and biogas from palm oil mill effluent, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 206, No. 012028.

- Iryani, D.A., Kumagai, S., Nonaka, M., Nagashima, Y., Sasaki, K. and Hirajima, T., 2014, The hot compressed water treatment of solid waste material from the sugar industry for valuable chemical production, *Int. J. Green Energy*, 11 (6), 577–588.
- Iryani, D.A., Kumagai, S., Nonaka, M., Sasaki, K. and Hirajima, T., 2017, Characterization and production of solid biofuel from sugarcane bagasse by hydrothermal carbonization, *Waste Biomass Valorization*, 8 (6), 1941–1951.
- Iryani, D.A., Haryanto, A., Hidayat, H., Amrul, Talambanua, M., Hasanudin, U., Lee, S.H. 2019, Torrefaction Upgrading of Palm Oil Empty Fruit Bunches Biomass Pellets for Gasification Feedstock by Using COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Reactor, *Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019*, Prague, Czech Republic, pp. 212-217.
- Jenkins, B.M., Bakker, R.R., Williams, R.B., Bakker-Dhaliwal, R., Summers, M.D., Lee, H., Bernheim, L.G., Huisman, W., Yan, L.L., Andrade-Sanchez, P., and Yore, M., 2000, Commercial Feasibility of Utilizing Rice Straw in Power Generation, *Proceedings Bioenergy*, Omnipress, Buffalo, New York, USA, pp. 1–10.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2019, Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (in English), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia, available at: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2018-final-edition.pdf>.
- Krigstin, S., Wetzel, S., Jayabala, N., Helmeste, C., Madrali, S., Agnew, J. and Volpe, S., 2018, Recent health and safety incident trends related to the storage of woody biomass: A need for improved monitoring strategies, *Forests*, 9 (9), 538.
- Lestari, M.D., Sudarmin and Harjono, 2018, Ekstraksi selulosa dari limbah pengolahan agar menggunakan larutan NaOH sebagai prekursor bioetanol, *Indonesian Journal of Chemical Science*, 7 (3), 236–241.
- Lu, K.M., Lee, W.J., Chen, W.H., Liu, S.H. and Lin, T.C., 2012, Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres, *Bioresour. Technol.*, 123, 98–105.
- Mahdie, M.F., Subari, D., Sunardi and Ulfah, D., 2016, Pengaruh campuran limbah kayu rambai dan api-api terhadap kualitas biopellet sebagai energi alternatif dari lahan basah, *Jurnal Hutan Tropis*, 4 (5), 246–253.
- Mamvura, T.A. and Danha, G., 2020, Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production, *Heliyon*, 6, e03531.
- Mellyanawaty, M., Alfiata Chusna, F.M. and Nofiyanti, E., 2019, Proses peruraian anaerobik palm oil mill effluent dengan media zeolit termodifikasi, *Jurnal Rekayasa Proses*, 13 (1), 16–23.
- Nunes, L.J.R., Matias, J.C.O. and Catalão, J.P.S., 2014, A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 40, 153-160
- Pangau, J.R., Sangian, H.F. and Lumi, B.M., 2017, Karakterisasi bahan selulosa dengan iradiasi pretreatment gelombang mikro terhadap serbuk kayu cempaka wasian

- (*Elmerillia ovalis*) di Sulawesi Utara, Jurnal MIPA Unsrat Online, 6 (1), 53–58.
- Parikh, J., Channiwala, S.A. and Ghosal, G.K., 2005, A Correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, Fuel, 84 (5), 487–494.
- Rani, I.T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A. and Hasanudin, U., 2020, Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit, Jurnal Teknik Pertanian, 9 (1), 63–70.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G. and Bakri, S., 2019, Karakterisasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB), Jurnal Sylva Lestari, 7 (3), 321–331.
- Sentana, S., Suyanto, Subroto, M.A., Suprapedi and Sudiyana., 2013, Pengembangan dan pengujian inokulum untuk pengomposan limbah tandan kosong kelapa sawit, Jurnal Rekayasa Proses, 4 (2), 35–39.
- Sitompul, J.P., Jauhari, A.K.P., Gumilar, G.G., Calimanto, Y. and Rasrendra, C.B., 2019, Studi kondisi operasi dalam pemisahan asam laktat dari produk konversi katalitik tandan kosong sawit melalui esterifikasi-hidrolisis, Jurnal Rekayasa Proses, 13 (2), 122–131.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U. and Hidayat, W., 2020, Pengaruh torefaksi dengan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) dan electric furnace terhadap pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*), Jurnal Sylva Lestari, 8 (1), 65–76.
- Szwaja, S., Magdziarz, A., Zajemska, M. and Poskart, A., 2019, A torrefaction of *Sida hermaphrodita* to improve fuel properties. Advanced analysis of torrefied products, Renewable Energy, 141, 894–902.
- Triyono, S., Haryanto, A., Telaumbanua, M., Dermiyati, Lumbanraja, J. and To, F., 2019, Cultivation of straw mushroom (*Volvariella volvacea*) on oil palm empty fruit bunch growth medium, International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 8 (4), 381–392.
- Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T. and Boardman, R.D., 2011, A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, Ind. Biotechnol., 7 (5), 384–401.
- Ünal, S., 1995, A review of spontaneous combustion of coals, Fuel Sci. Technol. Int., 13 (9), 1103–1120.
- Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U. and Hidayat, W., 2020, Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi, Jurnal Teknik Pertanian Lampung, 9 (2), 104–111.