

Pengaruh Torefaksi dengan Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)* dan *Electric Furnace* terhadap Pelet Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*)

Effects of Torrefaction with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor and Electric Furnace on the Properties of Jabon (Anthocephalus cadamba) Pellets

Oleh:

Yogi Sulistio¹, Indra Gumay Febryano¹, Udin Hasanudin¹, Jiho Yoo², Sangdo Kim²,
Sihyun Lee², Wahyu Hidayat^{1*}

¹Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Jl. Sumantri Brojonegoro 1, Bandar Lampung, 35145, Lampung, Indonesia

²Climate Change Research Division, Korean Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Republic of Korea

*email: wahyu.hidayat@fp.unila.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan mutu dari pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*) melalui torefaksi menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)* dan *electric furnace (EF)*. Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)* merupakan alat yang dapat melakukan torefaksi dengan waktu tinggal (*residence time*) yang singkat, sekitar 3 - 5 menit. Torefaksi dengan reaktor COMB dilakukan pada suhu 260°C dan 280°C dengan waktu tinggal 3 menit. Torefaksi dengan EF menggunakan suhu 260°C dan 280°C dengan durasi 20 menit. Pengujian pelet meliputi perubahan warna, sifat fisis, dan nilai kalor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa warna pelet kayu jabon berubah total setelah torefaksi dengan reaktor COMB dengan nilai perubahan warna (ΔE^*) tertinggi sebesar 21,9 pada pelet ukuran panjang dan 21,7 pada pelet ukuran pendek, sedangkan torefaksi dengan EF menghasilkan nilai ΔE^* tertinggi sebesar 28,6 pada pelet panjang dan 23,2 pada pelet pendek. Kadar air awal pelet panjang dan pendek kayu jabon sebesar 12,41% dan 12,33%, dan setelah torefaksi dengan reaktor COMB menurun menjadi 2,85% dan 2,61%, sedangkan setelah torefaksi dengan EF menurun menjadi 2,77% dan 2,58%. Kerapatan awal pelet panjang dan pendek sebesar 1,05 g/cm³ dan 0,97 g/cm³ dan setelah torefaksi dengan reaktor COMB menurun menjadi 0,91 g/cm³ dan 0,76 g/cm³, sedangkan setelah torefaksi dengan EF menjadi 0,87 g/cm³ dan 0,75 g/cm³. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa nilai kalor awal pelet panjang dan pendek sebesar 17,69 MJ/kg meningkat menjadi 31,79 MJ/kg dan 32,02 MJ/kg setelah torefaksi dengan reaktor COMB dan 19,74 MJ/kg dan 19,99 MJ/kg setelah torefaksi dengan EF. Torefaksi dengan reaktor COMB dengan waktu tinggal yang lebih singkat mampu meningkatkan nilai bioenergi pelet kayu jabon yang lebih besar dibandingkan torefaksi dengan EF.

Kata kunci: *Counter-Flow Multi Baffle*, Jabon (*Anthocephalus cadamba*), torefaksi

ABSTRACT

The objective of this study was to improve the quality of jabon (Anthocephalus cadamba) wood pellets through torrefaction with Counter-Flow Multi-Baffle (COMB) reactor and electric furnace (EF). COMB is a reactor that can conduct torrefaction with a short residence time,

approximately around 3 to 5 min. The torrefaction with COMB reactor was conducted at 260°C and 280°C C, with a residence time of 3 min. The torrefaction with EF used the temperature of 260°C and 280°C with a duration of 20 min. The pellet properties evaluated include the color changes, physical characteristics, and heating values. The result showed that the color of Jabon wood pellet was totally changed after torrefaction with COMB reactor reaching the highest overall color-change (ΔE^*) of 21,9 in the long pellets and 21,7 in the short pellets, while torrefaction with EF resulted in the highest ΔE^* of 28,6 and 23,2, in the long and short pellets, respectively. The initial moisture content of the long and short pellets of Jabon wood were 12,41% and 12,33%. After torrefaction with COMB the moisture content decreased to 2,85% and 2,61%, while after torrefaction with EF the values decreased to 2,77% and 2,58%. The initial density of the long and short pellets were 1,05 g/cm³ and 0,97 g/cm³. The density decreased to 0,91 g/cm³ and 0,76 g/cm³ after torrefaction with COMB reactor, and decreased to 0,87 g/cm³ and 0,75 g/cm³ after torrefaction with EF. The research result also showed that the initial heating value of long and short pellets of 17,69 MJ/kg increased to 31,79 MJ/kg (long pellets) and 32.02 MJ/kg (short pellets) after torrefaction with COMB reactor, and increased to 19.74 MJ/kg (long pellets) and 19.99 MJ/kg (short pellets) after torrefaction with EF. Torrefaction with COMB reactor with shorter residence time resulted in a higher improvement in bioenergetic properties of jabon wood pellets in comparison to torrefaction with EF.

Keywords: *Anthocephalus cadamba*, Counter-Flow Multi Baffle, torrefaction

PENDAHULUAN

Biomassa merupakan produk organik yang berasal dari pertanian dan kehutanan yang dikembangkan untuk pasokan bahan bakar alternatif di masa depan (Yudha et al. 2017). Jenis limbah biomassa dari sektor kehutanan yang sangat potensial salah satunya adalah biomassa kayu termasuk limbah penebangan dan limbah industri penggergajian kayu yang dapat digunakan secara optimal sehingga nilai ekonominya dapat meningkat (Adrian et al. 2015).

Jabon (*Anthocephalus cadamba*) merupakan salah satu jenis biomassa yang banyak ditanam di lahan hutan rakyat di Indonesia karena sifatnya yang cepat tumbuh (*fast-growing tree species*) sehingga pemanenan kayu jabon sudah dapat dilakukan pada usia pohon 5-6 tahun (Mulyana et al. 2010). Selain itu, kayu jabon juga sudah banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku industri seperti kayu lapis, *pulp*, dan meubel (Mulyana et al. 2010). Namun, rendemen gergajian kayu rakyat rata-rata hanya sekitar 60% atau dengan kata lain, sisanya (40%) merupakan limbah (Uar 2016). Limbah dari industri kayu dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku energi alternatif seperti dengan mengkonversi menjadi pelet kayu untuk meningkatkan nilai tambah produk (Gultom et al. 2017). Pengembangan bioenergi seperti pelet biomassa kayu dapat diterapkan untuk menghasilkan energi terbarukan (Rubiyanti et al. 2019). Tetapi pelet biomassa memiliki kekurangan seperti memiliki nilai kalor yang rendah, kadar air tinggi, dan mudah menyerap air (Akbar et al. 2013). Penanganan kekurangan dari pelet biomassa ini dapat dilakukan melalui proses termal seperti torefaksi.

Torefaksi adalah proses perlakuan termokimia terhadap biomassa pada kisaran suhu 200-300°C dalam kondisi anaerob dan laju pemanasan rendah atau waktu tinggal cukup lama, sekitar 30 menit hingga 2 jam (Tumuluru et al. 2011). Selain meningkatkan nilai kalori, torefaksi juga meningkatkan sifat hidrofobisitas bahan bakar, mengurangi konsumsi energi penggilingan, dan dapat mencegah degradasi oleh jamur dan mikroba selama proses penyimpanan dan transportasi (Alamsyah et al. 2017; Tumuluru et al. 2011).

Universitas Lampung bekerjasama dengan *Korea Institute of Energy Research* (KIER) Korea Selatan telah membangun *pilot plant* reaktor torefaksi biomassa pada akhir 2017 yang dinamakan *Counter Flow Multi Baffle* (COMB) dengan kapasitas 20 kg/jam. Keunggulan yang sangat menonjol dari reaktor ini dibandingkan dengan proses torefaksi biomassa konvensional adalah waktu tinggal yang sangat singkat, yaitu sekitar 3-5 menit. Torefaksi dengan reaktor COMB dapat menghasilkan bahan bakar padat yang memiliki karakteristik lebih baik dibandingkan biomassa asal, seperti nilai kalor tinggi dan kadar air yang rendah (Hidayat et al. 2018b, 2019; Iryani et al. 2019; Rubiyanti et al. 2019). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh torefaksi dengan reaktor COMB dan *electric furnace* terhadap peningkatan mutu pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*).

METODE PENELITIAN

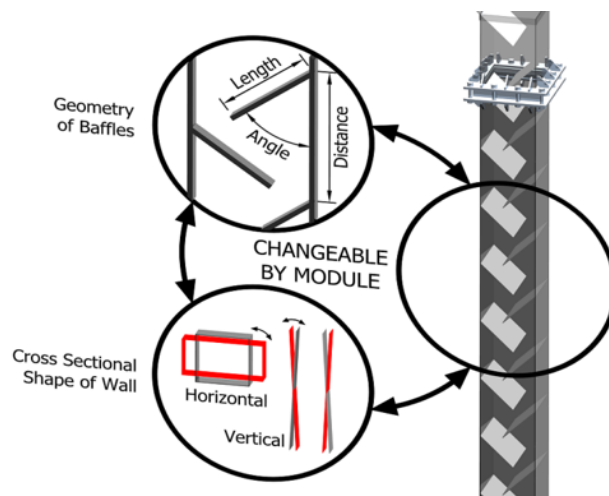
Penelitian dilakukan selama bulan November – Desember 2019. Torefaksi dilakukan di *Workshop* Teknologi Hasil Hutan (THH), Laboratorium Lapang Terpadu Fakultas Pertanian, sedangkan pengujian dilakukan di Laboratorium THH dan Laboratorium Daya dan Mesin Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Bahan utama yang digunakan berupa pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*). Pelet kayu jabon disaring untuk memisahkan debu dan disortir berdasarkan ukuran panjangnya menjadi kelompok pelet panjang (25-30 mm) dan pelet pendek (10-15 mm). Torefaksi pelet kayu jabon dilakukan dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). Reaktor COMB merupakan reaktor untuk torefaksi dengan kapasitas proses 20 kg/jam dan waktu tinggal 3-5 menit. Reaktor COMB memiliki enam bagian, yaitu: bagian pengumpan biomassa (*feeder*), bagian kolom reaktor (*column*) tempat biomassa mengalami proses torefaksi, bagian pendinginan gas (*heat exchanger*), bagian pembakaran (*burner*), bagian penyaring partikel halus (*fine dust collector*), dan *induction drag fan* (*ID fan*) untuk menyalurkan gas panas ke kolom reaktor (Gambar 1).



Gambar 1. Skema reaktor COMB.

Pelet kayu jabon dimasukkan ke dalam *feeder* yang terletak di bagian atas kolom (*COMB column*). Kolom dilengkapi dengan *baffle* yang disusun pada kemiringan 45° sehingga biomassa akan jatuh ke bawah dan kontak dengan aliran gas panas yang dihasilkan oleh *burner* (Gambar 2). Gas panas dari *burner* dialirkan ke *COMB column* dari bagian bawah kolom menuju ke atas yang didorong aliran gas dari *ID fan*. Torefaksi dilakukan dengan menggunakan suhu 260°C dan 280°C dengan waktu tinggal 3 menit.

Torefaksi dengan *electric furnace* (EF) terhadap pelet kayu jabon dilakukan sebagai pembandingan torefaksi dengan reaktor *COMB*. Pelet kayu jabon dibungkus dengan aluminium foil untuk mencegah pembakaran selama proses torefaksi. Torefaksi dengan EF dilakukan pada suhu 260°C dan 280°C dengan durasi 20 menit. Penentuan durasi dilakukan dengan melakukan penelitian pendahuluan menggunakan berbagai durasi yaitu 5, 10, 15, 20, dan 25 menit. Pelet yang sudah ditorefaksi kemudian diukur perubahan warnanya (ΔE^*). Durasi torefaksi dengan EF yang menghasilkan ΔE^* mendekati dengan nilai hasil torefaksi dengan reaktor *COMB* dipilih sebagai pembandingan (20 menit).



Sumber: Lee et al. (2019).

Gambar 2. Skema *COMB column*.

Pengujian warna, sifat fisis, dan nilai kalor dilakukan terhadap pelet kayu jabon sebelum dan setelah ditorefaksi. Pengukuran warna dilakukan dengan menggunakan sistem *CIE-Lab* dengan mengukur parameter kecerahan (ΔL^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), dan kromatisasi kuning/biru (b^*). Perubahan warna keseluruhan (ΔE^*) dihitung dengan persamaan:

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

Derajat perubahan warna kemudian ditentukan menggunakan klasifikasi Valverde dan Moya (2014):

- $0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$ = perubahan dapat dihiraukan
- $0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$ = perubahan warna sedikit
- $1,5 < \Delta E^* \leq 3$ = perubahan warna nyata
- $3 < \Delta E^* \leq 6$ = perubahan warna besar
- $6 < \Delta E^* \leq 12$ = perubahan warna sangat besar
- $\Delta E^* > 12$ = warna berubah total.

Sifat fisis yang diamati meliputi kerapatan, kadar air, dan ketahanan terhadap perendaman air. Pengujian kerapatan dilakukan pada kondisi kering tanur berdasarkan standar KS F 2198 (KSA 2011a). Sampel ditimbang beratnya, lalu diukur rata-rata panjang dan diameternya untuk menentukan volume contoh uji. Pengujian kadar air dilakukan berdasarkan standar KS F 2199 (KSA 2011b). Berat kering udara dan berat kering tanur diukur untuk menentukan kadar air

sampel sebelum dan setelah torefaksi. Kerapatan (KR) dan kadar air (KA) dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$KR = \frac{B_{KT}}{V_{KT}}$$

$$KA = \frac{B_A - B_{KT}}{B_{KT}} \times 100\%$$

dimana KR adalah kerapatan (g/cm^3), KA adalah kadar air kayu (%), B_{KT} adalah berat kering tanur sampel (g), B_A adalah berat awal sampel (g), dan V_{KT} adalah volume kering tanur sampel (g).

Uji ketahanan terhadap air dilakukan dengan merendam pelet kayu jabon ke dalam air dan dilihat perubahan visual yang terjadi pada pelet kayu jabon setelah perendaman selama 1, 5, dan 30 menit, serta 1, 2, 4, dan 24 jam.

Pengujian nilai kalor dilakukan dengan menggunakan pelet kayu yang digiling menjadi serbuk. Serbuk kemudian masukkan ke dalam oven dengan suhu 100°C selama 24 jam. Sebanyak 0,5 g serbuk dalam kondisi kering tanur digunakan sebagai sampel uji. Pengukuran nilai kalor dilakukan dengan menggunakan *bomb calorimeter* berdasarkan standar KS E 3707 (KSA 2011c).

HASIL DAN PEMBAHASAN

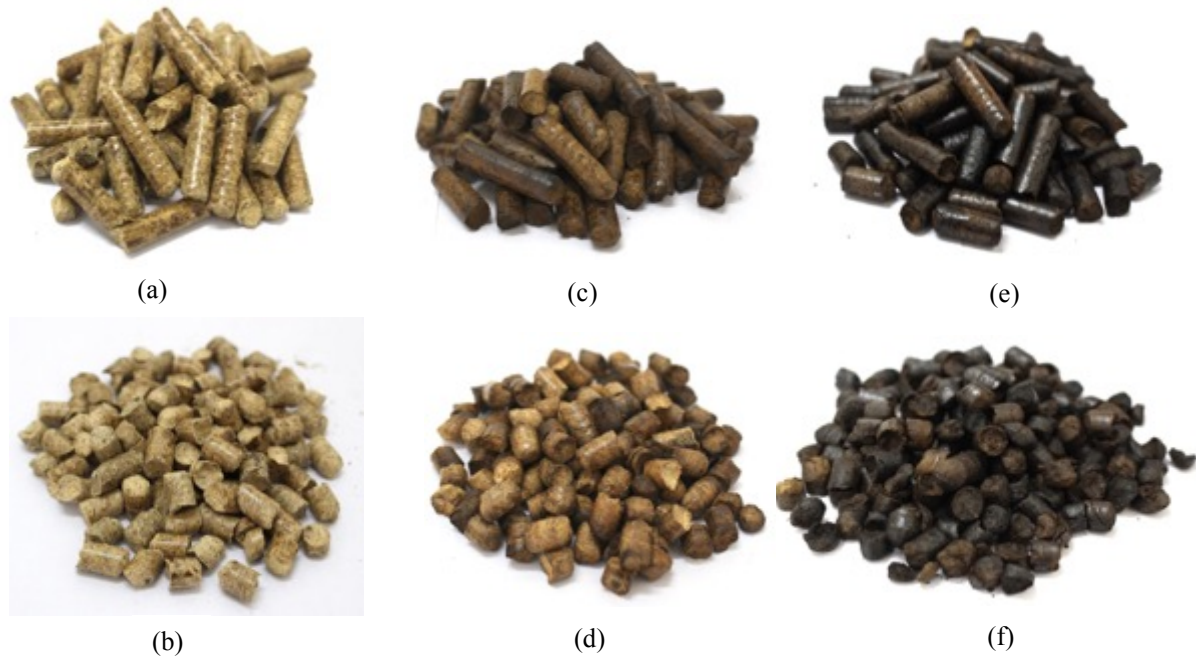
Perubahan Warna

Perubahan nilai parameter warna pelet kayu jabon disajikan pada Tabel 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kecerahan (L^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), dan kromatisasi kuning/biru (b^*) pelet sebelum torefaksi (kontrol) menurun seiring dengan meningkatnya suhu torefaksi. Derajat penurunan parameter warna terbesar terjadi pada parameter L^* sebagaimana terlihat jelas dari pengamatan visual (Gambar 3). Oleh karena itu, produk pelet hasil torefaksi disebut *black pellet* (pelet hitam). Hasil penelitian sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya (Hidayat et al. 2015, 2016, 2017a; b, 2018a; Hidayat and Febrianto 2018) yang menyatakan bahwa perubahan yang paling jelas secara visual setelah perlakuan panas adalah penurunan nilai L^* atau semakin gelapnya warna kayu. Salca et al. (2016) yang menyatakan bahwa penurunan nilai L^* terjadi akibat adanya degradasi hemiselulosa selama perlakuan panas sehingga mempengaruhi perubahan warna secara visual.

Tabel 1. Perubahan parameter warna pelet kayu jabon.

Ukuran Pelet	Suhu ($^\circ\text{C}$)	Metode	Waktu Tinggal (menit)	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
Pelet Panjang	Kontrol	-	-	48,8 (2,19)	7,1 (1,20)	18,4 (1,17)	-
		COMB	3	37,2 (2,40)	4,4 (2,07)	6,4 (5,01)	17,0 (5,16)
	260	EF	20	29,5 (2,46)	5,2 (0,40)	9,6 (0,32)	21,3 (2,35)
		COMB	3	34,1 (0,85)	0,8 (0,55)	3,5 (1,19)	21,9 (1,28)
	280	EF	20	25,1 (0,85)	0,8 (0,40)	3,6 (0,40)	28,6 (0,55)
		Kontrol	-	-	45,2 (4,36)	6,1 (1,20)	16,8 (1,17)
Pelet Pendek	260	COMB	3	35,9 (0,20)	4,8 (0,21)	9,3 (0,51)	12,1 (0,24)
		EF	20	31,7 (1,99)	4,7 (1,56)	9,6 (1,18)	15,4 (2,39)
	280	COMB	3	28,0 (0,85)	2,4 (0,18)	4,6 (0,95)	21,7 (1,20)
		EF	20	25,5 (1,15)	1,8 (0,57)	5,3 (0,36)	23,2 (0,59)

Keterangan: COMB = reaktor *Counter-Flow Multi Baffle*. EF = *electric furnace*. Nilai merupakan rata-rata dari tiga pengukuran. Angka dalam kurung merupakan standar deviasi.



Gambar 3. Tampilan visual pelet kayu jabon panjang (a, c, e) dan pendek (b, d, f) sebelum dan setelah torefaksi menggunakan reaktor COMB: (a, b) kontrol, (c, d) torefaksi dengan suhu 260°C, dan (e, f) torefaksi dengan suhu 280°C.

Perubahan warna keseluruhan (ΔE^*) pelet kayu jabon ukuran panjang dan pendek mengalami peningkatan seiring dengan naiknya suhu, baik pada torefaksi dengan reaktor COMB maupun dengan *electric furnace* (EF). Tabel 1 menunjukkan bahwa ΔE^* setelah torefaksi pada suhu 260°C dan 280°C memiliki nilai > 12 , dengan kata lain warna pelet yang ditorefaksi berubah total. Studi yang dilakukan Hidayat et al. (2017b) menunjukkan bahwa kayu pinus yang diberi perlakuan perlakuan panas pada suhu 180°C – 200°C memiliki nilai $\Delta E^* > 12$ atau berubah total. Rubiyanti et al. (2019) juga melaporkan bahwa warna pelet kayu karet berubah total setelah torefaksi pada suhu 200°C – 300°C.

Kerapatan dan Kadar Air

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa proses torefaksi mengakibatkan penurunan nilai kerapatan pada pelet kayu jabon ukuran panjang dan pendek. Pelet ukuran panjang dan pendek sebelum ditorefaksi memiliki nilai kerapatan sebesar 1,05 g/cm³ dan 0,97 g/cm³. Kerapatan pelet semakin menurun dengan meningkatnya suhu torefaksi. Kerapatan pelet ukuran panjang dan pendek menurun hingga 0,91 g/cm³ dan 0,76 g/cm³ setelah ditorefaksi dengan COMB pada suhu 280°C, sedangkan torefaksi dengan EF menyebabkan penurunan kerapatan hingga 0,87 g/cm³ pada pelet panjang dan 0,75 g/cm³ pada pelet pendek (Tabel 2). Penurunan kerapatan terutama terjadi karena pelet kayu mengalami penurunan massa setelah torefaksi.

Hasil penelitian sejalan dengan Hidayat *et al* (2018) yang melaporkan penurunan kerapatan kayu gmelina (*Gmelina arborea*), jabon (*Melia azedarach*), okan (*Cylicodiscus gabunensis*), dan paulownia (*Paulownia tomentosa*) setelah perlakuan panas pada suhu 200°C – 220°C (Hidayat et al. 2015, 2016, 2017c; a; b, 2018a; Hidayat and Febrianto 2018). Hasil penelitian lainnya yang dilakukan Rubiyanti et al. (2019) menunjukkan bahwa kerapatan kering tanur dari pelet kayu karet yang ditorefaksi semakin menurun seiring dengan meningkatnya suhu perlakuan dengan persentase penurunan kerapatan kering tanur sebesar 4,66–16,18%.

Tabel 2. Kadar air dan kerapatan pelet kayu jabon.

Ukuran Pelet	Suhu (°C)	Metode	Waktu Tinggal (Menit)	Kerapatan (g/cm ³)	Kadar Air (%)
Pelet Panjang	Kontrol	-	-	1,05 (0,03)	12,41 (1,33)
	260	COMB	3	0,96 (0,02)	5,17 (1,56)
		<i>Electric Furnace</i>	20	0,93 (0,04)	3,83 (0,55)
	280	COMB	3	0,91 (0,03)	2,85 (0,64)
		<i>Electric Furnace</i>	20	0,87 (0,05)	2,77 (0,57)
	Pelet Pendek	Kontrol	-	-	0,97 (0,07)
260		COMB	3	0,93 (0,02)	4,11 (1,53)
		<i>Electric Furnace</i>	20	0,84 (0,04)	3,53 (0,35)
280		COMB	3	0,76 (0,02)	2,61 (0,35)
		<i>Electric Furnace</i>	20	0,75 (0,07)	2,58 (0,47)

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

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa nilai kadar air setelah melalui proses torefaksi. Pelet kayu jabon ukuran panjang dan pendek sebelum torefaksi memiliki kadar air sebesar 12,41% dan 12,33%. Kadar air pelet kayu jabon menurun drastis setelah torefaksi dengan nilai kadar air terkecil sebesar 2,61% setelah torefaksi dengan reaktor COMB dan 2,58% setelah torefaksi dengan EF, keduanya menggunakan suhu perlakuan 280°C. Tabel 2 menunjukkan bahwa penurunan kadar air pada pelet berukuran pendek lebih besar dibandingkan dengan pada pelet berukuran pendek. Hasil penelitian ini sejalan dengan Rubiyanti et al. (2019) yang menyatakan bahwa pelet kayu karet sebelum torefaksi dengan kadar air 12,25% menurun setelah torefaksi hingga mencapai 3,54%. Torefaksi dengan menggunakan suhu yang semakin tinggi menyebabkan penguapan air dan bahan ekstraktif serta degradasi hemiselulosa sehingga kadar airnya semakin menurun (Hidayat et al. 2015; Widarti 2017).

Ketahanan terhadap Air

Gultom et al. (2017) menyatakan bahwa kadar air pelet mempengaruhi kualitas pelet. Kandungan air pada pelet biomassa yang rendah menyebabkan kualitas pelet semakin meningkat dan berpengaruh terhadap nilai kalor sehingga lebih mudah untuk dinyalakan. Hasil uji ketahanan terhadap air dari pelet kayu jabon dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Sampel kontrol pelet kayu jabon ukuran panjang dan kecil mulai menampakkan perubahan fisik berupa pengembangan pelet setelah perendaman selama 1 menit. Pelet semakin mengembang setelah perendaman selama 5 menit dan 1 jam. Perubahan bentuk pelet semakin jelas setelah perendaman selama 24 jam dan menunjukkan disintegrasi atau bentuk pelet yang sudah tidak utuh. Penelitian Rubiyanti et al. (2019) menggunakan pelet kayu karet menunjukkan bahwa pelet mulai terintegrasi setelah perendaman air selama 5 menit dan semakin parah setelah perendaman selama 24 jam.

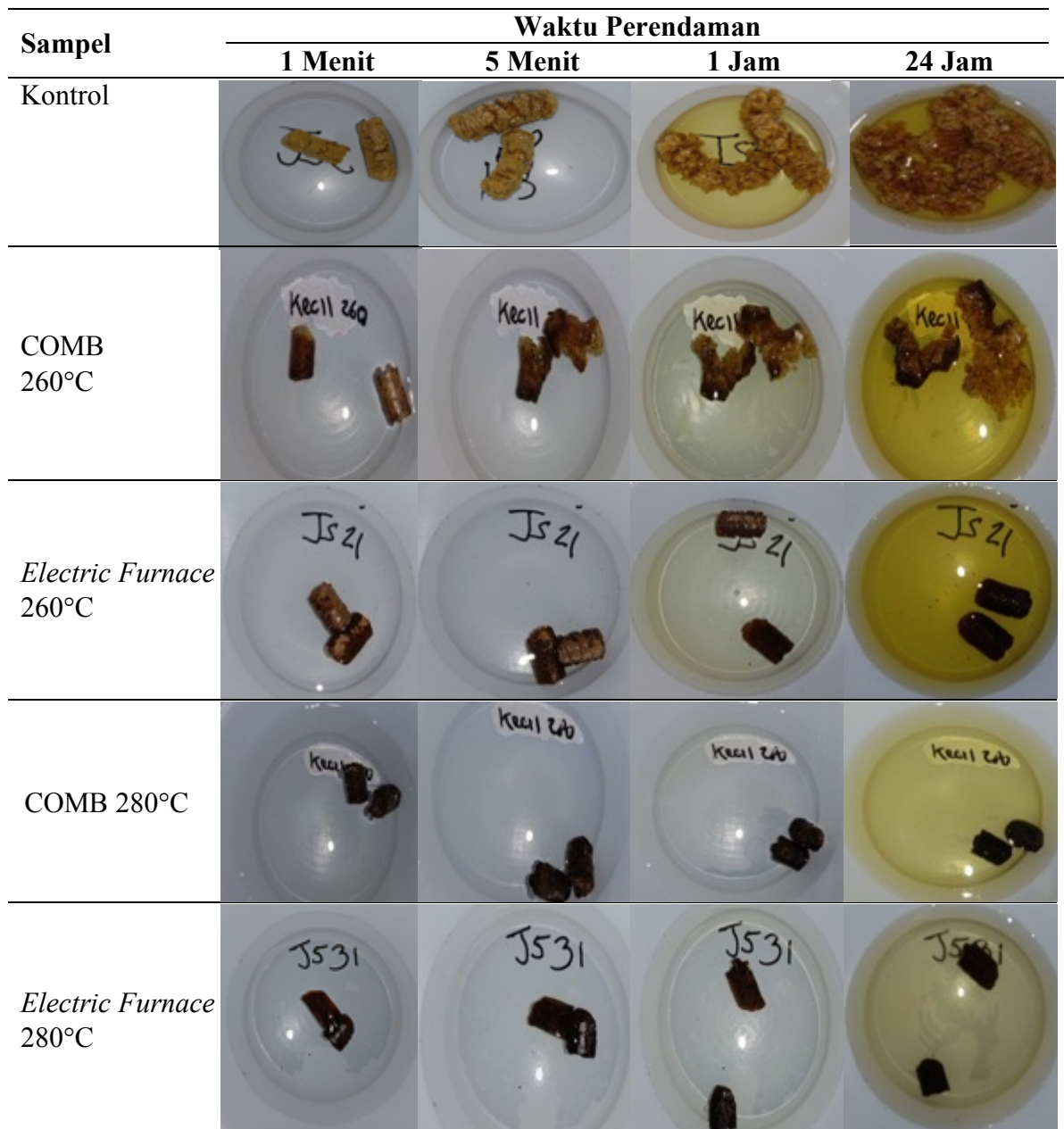
Pelet kayu jabon ukuran panjang dan pendek yang ditorefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 260°C menunjukkan perubahan fisik yang hampir sama dengan pelet kontrol namun dengan tingkat kerusakan yang lebih rendah. Pelet ukuran panjang dan pendek yang ditorefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 280°C tidak menunjukkan kerusakan bahkan setelah perendaman selama 24 jam. Torefaksi dengan EF pada suhu 260°C dan 280°C juga tidak menunjukkan kerusakan setelah perendaman selama 24 jam. Secara umum, pelet yang ditorefaksi pada suhu yang lebih tinggi (280°C) lebih tahan terhadap air dibandingkan dengan pelet yang ditorefaksi pada suhu yang lebih rendah (260°C). Pada pelet yang tidak menunjukkan kerusakan fisik, hal ini terlihat dari perbedaan warna air. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa pelet yang ditorefaksi pada suhu 260°C memiliki warna yang lebih gelap

(kekuning-kuningan) dibandingkan dengan pelet yang ditorefaksi pada suhu 280°C. Hal ini menunjukkan bahwa pelet yang ditorefaksi pada suhu 260°C masih mengandung bahan ekstraktif dan bahan ekstraktif tersebut terlarut setelah direndam dalam air. Hasil penelitian sejalan dengan Rubiyanti et al. (2019) yang menyatakan bahwa pada pelet kayu karet yang ditorefaksi pada suhu 200°C dan suhu 250°C, zat ekstraktif tidak terurai secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil pengujian kadar air dan daya serap air, torefaksi mengubah sifat higroskopis pelet kayu jabon dari hidrofilik (cenderung menyerap air) menjadi hidrofobik (tahan terhadap air). Sifat hidrofobik pelet sangat menguntungkan dalam penyimpanan maupun aplikasinya. Biomassa yang bersifat hidrofilik lebih mendukung aktivitas biologis seperti dekomposisi, jamur, dan pembusukan ketika ditumpuk (disimpan) dalam volume dan durasi tertentu (Ashman et al. 2018); Evangelista et al. 2018). Biomassa yang ditumpuk tersebut dapat mengalami panas-sendiri (*self-heating*) akibat kondensasi air, oksidasi biologis, dan oksidasi kimiawi yang dapat memicu pembakaran spontan dan mengakibatkan kebakaran. Krigstin et al. (2018) melaporkan kejadian kebakaran biomassa saat penyimpanan dan mencatat 69 kasus kebakaran di negara-negara Amerika dan Eropa pada periode 2000-2018. Peningkatan sifat hidrofobik biomassa melalui torefaksi memungkinkan aktivitas biologis yang rendah dan dapat mencegah oksidasi selama penyimpanan sehingga pembakaran spontan dapat dicegah.

Sampel	Waktu Perendaman			
	1 Menit	5 Menit	1 Jam	24 Jam
Kontrol				
COMB 260°C				
<i>Electric Furnace</i> 260°C				
COMB 280°C				
<i>Electric Furnace</i> 280°C				

Gambar 4. Hasil uji ketahanan terhadap air dari pelet kayu jabon ukuran panjang.



Gambar 5. Hasil uji ketahanan terhadap air dari pelet kayu jabon ukuran pendek.

Nilai kalor

Nilai kalor merupakan salah satu parameter yang paling penting yang menentukan kualitas dari bahan bakar padat. Semakin tinggi nilai kalor akan semakin baik pembakaran dalam penggunaannya (Winata 2013). Keberadaan nilai kalor yang tinggi sangat menguntungkan pada penggunaan bahan bakar. Nilai kalor pelet kayu jabon sebelum dan setelah torefaksi dengan reaktor COMB dan EF disajikan pada Tabel 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor pelet kayu jabon. Peningkatan nilai kalor setelah torefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 260°C dan 280°C secara berturut-turut mencapai 69,19% dan 81,01%, sedangkan peningkatan nilai kalor setelah torefaksi dengan EF pada suhu 260°C dan 280°C mencapai 10,40% dan 13,00%. Torefaksi dengan reaktor COMB menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan torefaksi EF. Rubiyanti et al. (2019) melaporkan peningkatan nilai kalor pelet kayu karet hingga 18,32% setelah torefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 300°C.

Tabel 3. Nilai kalor pelet kayu jabon

Ukuran Pelet	Suhu (°C)	Metode	Durasi (menit)	Nilai Kalor (MJ/kg)
Pelet Panjang	Kontrol	-	0	17,69
	260	COMB	3	28,83
		<i>Electric furnace</i>	20	19,53
	280	COMB	3	31,79
		<i>Electric furnace</i>	20	19,74
	Pelet Pendek	Kontrol	-	0
260		COMB	3	29,93
		<i>Electric furnace</i>	20	18,77
280		COMB	3	32,02
		<i>Electric furnace</i>	20	19,99

SIMPULAN

Penggunaan teknologi reaktor COMB dan *electric furnace* (EF) dengan suhu tinggi pada torefaksi pelet kayu jabon menyebabkan perubahan warna pelet menjadi semakin gelap (*black pellet*) dengan nilai $\Delta E^* > 12$. Torefaksi suhu tinggi reaktor COMB dengan durasi 3 menit berdampak pada menurunnya kadar air pelet panjang dan pendek yang semula 12,41% dan 12,33% menjadi 2,85% dan 2,61%, sedangkan torefaksi suhu tinggi EF dengan durasi 20 menit menurun hingga 2,77% dan 2,58%. Kerapatan awal pelet panjang dan pendek sebesar 1,05 g/cm³ dan 0,97 g/cm³ menurun setelah ditorefaksi dengan reaktor COMB mencapai 0,91 g/cm³ dan 0,76 g/cm³, sedangkan torefaksi dengan EF mencapai 0,87 g/cm³ dan 0,75 g/cm³. *Black pellet* hasil torefaksi dengan reaktor COMB dan EF tidak menunjukkan disintegrasi yang signifikan bahkan setelah 24 jam, sedangkan pelet kontrol setelah 1 jam uji rendam mengalami kerusakan. Nilai kalor awal pelet panjang dan pendek sebesar 17,69 MJ/kg meningkat hingga 81,00% (32,02 MJ/kg) setelah torefaksi dengan reaktor COMB, dan meningkat hingga 13,00% (19,99 MJ/kg) setelah torefaksi dengan EF. Peningkatan nilai kalor setelah torefaksi dengan reaktor COMB yang menggunakan durasi perlakuan yang lebih singkat daripada EF mampu menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi. Nilai kalor tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan standar mutu negara Austria, Jerman, Swedia, dan Korea Selatan.

SANWACANA

Penulis menyampaikan terima kasih kepada *Korea Institute of Energy Research* (KIER), Korea Selatan yang telah mendanai penelitian ini (No. Kontrak: KIER-2019-0025).

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, A., Sulaeman, R., and Oktorini, Y. 2015. Karakteristik *Wood Pellet* dari Limbah Kayu Karet (*Hevea brasiliensis muell. Arg*) sebagai Alternatif Sumber Energi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Pertanian Universitas Riau* 2(2): 1–6.
- Akbar, A., Paidoman, R., and dan Coniwanti, P. 2013. Pengaruh Variabel Waktu dan Temperatur terhadap Pembuatan Asap Cair dari Limbah Kayu Pelawan (*Cyanometra cauliflora*). *Jurnal Teknik Kimia* 19(1): 1–8.
- Alamsyah, R., Siregar, N. C., and Hasanah, F. 2017. Torrefaction Study for Energy Upgrading

- on Indonesian Biomass as Low Emission Solid Fuel. in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1–10. DOI: 10.1088/1755-1315/65/1/012051
- Ashman, J. M., Jones, J. M., and Williams, A. 2018. Some Characteristics of the Self-Heating of the Large Scale Storage of Biomass. *Fuel Processing Technology* 174: 1–8. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.02.004
- Evangelista, B., Arlabosse, P., Govin, A., Salvador, S., Bonnefoy, O., and Dirion, J. La. 2018. Reactor Scale Study of Self-Heating and Self-Ignition of Torrefied Wood in Contact with Oxygen. *Fuel* 214: 590–596. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.048
- Gultom, R. N., Sulaeman, R., and Budiani, E. S. 2017. Pemanfaatan Limbah Kayu Jabon dan Limbah Serat Sawit sebagai Bahan Baku Briket Arang. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Pertanian Universitas Riau* 4(1): 1–5.
- Hidayat, W., and Febrianto, F. 2018. *Teknologi Modifikasi Kayu Ramah Lingkungan: Modifikasi Panas dan Pengaruhnya terhadap Sifat-sifat Kayu*. Pusaka Media, Bandar Lampung.
- Hidayat, W., Febrianto, F., Purusatama, B. D., and Kim, N. H. 2018a. Effects of Heat Treatment on the Color Change and Dimensional Stability of *Gmelina arborea* and *Melia azedarach* Woods. in: *E3S Web of Conferences* M. Amin, ed. EDP Sciences, Palembang, Indonesia 03010. DOI: 10.1051/e3sconf/20186803010
- Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Haryanto, A., Amrul, Kim, S. Do, and Lee, S. H. 2018b. Torrefaction of Wood Pellets using Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Technology. in: *Annual International Symposium of Institute of Forest Science (KNUIFS 2018)* Chuncheon, 6-7 September 2018.
- Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Haryanto, A., Amrul, Yoo, J. H., Kim, S. Do, and Lee, S. H. 2019. Effect of Torrefaction using Counter Flow Multi-Baffle (COMB) Reactor on the Properties of Wood Pellets. in: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass 2019* LPPM Universitas Lampung, Bandar Lampung, 15 – 17 October 2019.
- Hidayat, W., Jang, J. H., Park, S. H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S. H., and Kim, N. H. 2015. Effect of Temperature and Clamping during Heat Treatment on Physical and Mechanical Properties of Okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) Wood. *BioResources* 10(4): 6961–6974. DOI: 10.15376/biores.10.4.6961-6974
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., and Kim, N. H. 2017a. Effect of Mechanical Restraint on the Properties of Heat-Treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* Woods. *BioResources* 12(4): 7539–7551. DOI: 10.15376/biores.12.4.7452-7465
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Lee, S. H., and Kim, N. H. 2016. Effect of Treatment Duration and Clamping on the Properties of Heat-Treated Okan Wood. *BioResources* 11(4): 10070–10086. DOI: 10.15376/biores.11.4.10070-10086
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Park, B. H., Banuwa, I. S., Febrianto, F., and Kim, N. H. 2017b. Color Change and Consumer Preferences towards Color of Heat-Treated Korean White Pine and Royal Paulownia Woods. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 45(2): 213–222. DOI: 10.5658/WOOD.2017.45.2.213
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Park, B. H., Banuwa, I. S., Febrianto, F., and Kim, N. H. 2017c. Color Change and Consumer Preferences towards Color of Heat Treated Korean White Pine and Royal Paulownia Woods. *Jurnal Of Korean Wood Science Technology* 45(2): 213–222. DOI: 10.1051/e3sconf/2018680301
- Iryani, D. A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanuddin, U., and 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. in: *Proceeding of 7th Trend in Agricultural Engineering (TAE) 2019* Prague, Czech Rep. 17 - 20 September 2019.

- Krigstin, S., Jayabala, S. W. 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(538): 1–24. DOI: 10.3390/f9090538
- KSA. 2011a. KS F 2198: Determination of Density and Specific Gravity of Wood. Korean Standards Association, Seoul, Republic of Korea.
- KSA. 2011b. KS F 2199: Determination of Moisture Content of Wood. Korean Standards Association, Seoul, Republic of Korea.
- KSA. 2011c. KS E 3707: Determination of Calorific Value of Coal and Coke. Korean Standards Association, Seoul, Republic of Korea.
- Lee, S. H., Yoo, J. H., and Yoon, K. D. 2019. Cooperation Projects with UNILA & Central Lampung Government. in: *Technical Workshop Lampung Tengah*, 4 April 2019.
- Mulyana, D., Asmarahman, C., and Fahmi, I. 2010. *Bertanam Jabon*. PT AgroMedia Pustaka, Jakarta, Indonesia.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., and Bakri, S. 2019. Karakteristik Pelet Kayu Karet (*Havea brasiliensis*) Hasil Torefaksi dengan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Sylva Lestari* 7(3): 321–331. DOI: 10.23960/jsl37321-331
- Salca, E. A., Kobori, H., Inagaki, T., Kojima, Y., and Suzuki, S. 2016. Effect of Heat Treatment on Colour Changes of Black Alder and Beech Veneers. *Jurnal Wood Science* 62(4): 297–304. DOI: 0.1007/s10086-016-1558-3
- 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. *Industrial Biotechnology*. DOI: 10.1089/ind.2011.7.384
- Uar, N. I. 2016. Produktivitas dan Rendemen Kayu Gergajian pada Perusahaan IUIPHHK PT. Katingan Timber Celebes. *Jurnal Ilmiah Argibisnis dan Perikanan* 9(1): 1–7.
- Widarti, A. 2017. Energi Terbarukan dari Batang Kelapa Sawit: Konversi Menggunakan Proses Torefaksi.
- Winata, A. 2013. Karakteristik Biopelet dari Campuran Serbuk Kayu Sengon dengan Arang Sekam Padi sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan. Skripsi. Departemen Hasil Hutan. IPB.
- Yudha, R. S., Komalasari, and Helwani, Z. 2017. Proses Densifikasi Pelelepah Sawit Menggunakan Crude Gliserol sebagai Filler Menjadi Bahan Bakar Padat. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau* 4(1): 1–4.