

Perbandingan Proksimat Analisis dan Homogenitas Nilai Kalor Biomassa Sebelum dan Sesudah Proses Torefaksi

Untoro Budi Surono¹, Sri Gati Hutomo¹

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra Yogyakarta, untorobs@janabadra.ac.id

ABSTRACT

Torrefaction is a technology to improve the quality of biomass as a solid fuel. Proximate analysis and high heating value (HHV) are principal parameters of the fuel. This study aims to compare the parameters before and after the torrefaction process. Analyzing the homogeneity of HHV biomass also was conducted, especially wood and wood waste. The method used in this study is a quantitative method with a secondary data analysis approach. From the analysis of the percentage of fixed carbon (FC), it was identified that from the 12 samples studied, the FC percentage increased from 16.1 to 30.47%. The sample that had the highest and the lowest FC percentages after torrefaction was Luciana (44%) and willow (23.99%), respectively. After torrefaction, oats had the lowest VM percentage, which was 67.67% while Arundo donax had the lowest VM percentage (48.3%). Most of the samples had an ash percentage below 3%, both before and after torrefaction. Among all the samples, the torrefied Norway spruce stem had the lowest ash percentage, ie 0.49%. The torrefaction process was able to increase the HHV of samples from 13.97 to 45.45%. The highest HHV obtained after torrefaction was 24 MJ/kg, HHV from oat wood torrefaction. The torrefaction process was able to increase the HHV of samples from 13.97 to 45.45%. The highest increase in HHV due to the torrefaction process was achieved by oats whose HHV increased from 16.5 MJ/kg to 24 MJ/kg. The calorific value of wood biomass after torrefaction is more homogeneous than before torrefaction.

Keywords: biomass; HHV; Proximate analysis; torrefaction; wood

ABSTRAK

Torefaksi adalah salah satu teknologi untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat. Proksimat analisis dan *high heating value* (HHV) adalah parameter-parameter yang penting dari bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan parameter-parameter tersebut sebelum dan sesudah ditorefaksi serta menganalisis homogenitas HHV biomassa, khususnya kayu dan limbah kayu. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan pendekatan analisis data sekunder. Dari analisis terhadap persentase *fixed carbon* (FC) diketahui bahwa dari 12 sampel yang diteliti mengalami peningkatan persentase FC dari 16,1 – 30,47%. Sampel yang mempunyai persentase FC tertinggi dan terendah sesudah ditorefaksi berturut-turut adalah luceana (44%) dan willow (23,99%). Sesudah ditorefaksi, oat mempunyai persentase VM paling rendah, yaitu 67,67% sedangkan arundo donax persentase VMnya paling rendah (48,3%). Sebagian besar sampel mempunyai persentase abu di bawah 3%, baik sebelum maupun sesudah ditorefaksi. Di antara semua sampel, stem Norway spruce yang ditorefaksi memiliki persentase abu yang paling rendah, yaitu 0,49%. Proses torefaksi mampu meningkatkan HHV sampel mulai dari 13,97 – 45,45%. Peningkatan HHV tertinggi akibat proses torefaksi diperoleh oleh kayu oat yang HHVnya naik dari 16,5 MJ/kg menjadi 24 MJ/kg. Nilai kalor biomassa kayu sesudah ditorefaksi lebih homogen dibanding sebelum ditorefaksi.

Kata kunci: biomassa; HHV; kayu; proksimat analisis; torefaksi

PENDAHULUAN

Sepuluh tahun terakhir sebelum terjadi pandemi Covid-19, kebutuhan energi dunia semakin meningkat seiring bertambahnya populasi penduduk dan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi. Menurut laporan yang dikeluarkan oleh BP (2021), permintaan energi dunia meningkat 1,9% (dari 2009 – 2019). Akibat pandemi Covid-19 permintaan energi dunia tahun 2020 mengalami penurunan 4,5% dibanding tahun sebelumnya, terutama minyak. Bila dipandang berdasarkan sumber energinya, sebagian besar negara-negara di dunia masih tergantung pada sumber-sumber energi fosil seperti minyak bumi, batubara dan gas alam untuk memenuhi kebutuhan energinya (BP, 2021). Ketergantungan terhadap

energi fosil dan akibat negatifnya terhadap lingkungan sekarang ini, terutama batubara, mendorong perlu dikembangkannya sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan, efisien, dan efektif secara ekonomi untuk memenuhi kebutuhan pasokan energi yang berkelanjutan.

Di antara sumber daya energi terbarukan, biomassa merupakan sumber bahan energi alternatif yang ke depannya akan memainkan peran penting sebagai sumber energi alternatif (Tadesse et al., 2021). Biomassa adalah bahan organik yang berasal dari tumbuhan dan hewan yang masih hidup atau sudah mati, tetapi dalam hal ini tidak termasuk tumbuhan dan hewan yang sudah memfosil (Loppinet-serani dkk., 2008). Biomassa termasuk

sumber energi terbarukan karena dapat dikembangkan dalam waktu pendek sehingga dapat menjadi sumber energi dalam jangka waktu lama dan berkesinambungan (sustainable) yang ramah lingkungan (Anupam et al., 2016; Laouge & Merdun, 2020) Energi yang terkandung dalam biomassa terbentuk melalui proses fotosintesa pada tumbuhan. Proses fotosintesa ini mengubah air, nutrisi dari tanah dan CO₂ yang ada di udara dengan bantuan sinar matahari menjadi karbohidrat. Karbon dioksida yang diserap dari udara pada waktu proses fotosintesa akan dilepaskan ketika biomassa digunakan sebagai bahan bakar, sehingga penggunaan biomassa sebagai bahan bakar ini tidak menambah jumlah CO₂ yang ada di atmosfer (Altyndaeva et al., 2018; Tekin et al., 2014; Wilk et al., 2017). Oleh karena itu biomassa disebut dengan bahan bakar yang netral karbon dioksida.

Sumber energi biomassa sudah digunakan orang sebelum sumber-sumber energi lain digunakan. Sebagai contoh, selama ribuan tahun orang telah menggunakan kayu untuk memasak. Biomassa berasal dari berbagai sumber. Sumber-sumber ini mencakup semua tumbuhan dan bahan-bahan turunannya, termasuk kotoran ternak. Biomassa sebagai sumber energi dapat dikelompokkan dalam beberapa tipe, yaitu biomassa ligno-selulosa, sayur-sayuran dan buah-buahan, serta biomassa yang berasal dari limbah (Basu, 2013).

Biomassa ligno-selulosa bisa berasal dari tanaman rumput-rumputan dan non rumput-rumputan. Tanaman non rumput-rumputan ini antara lain pohon, semak, dan tanaman merambat. Budidaya tanaman ligno-selulosa untuk produksi energi mulai berkembang. Tanaman energi biasanya memiliki periode tumbuh yang pendek dan hasil panennya banyak (Fieducik, 2018). Tanaman energi juga hanya memerlukan sedikit pupuk atau tidak perlu pupuk sama sekali, sehingga investasinya cepat kembali. Tanaman berkayu untuk produksi energi contohnya adalah miskantus, willow, poplar, dan kaliandra. Biomassa ligno-selulosa sesuai untuk dijadikan bahan bakar padat, sedangkan sayur dan buah dapat diolah menjadi bahan bakar cair dan gas. Beberapa limbah yang bisa diolah menjadi bahan bakar di antaranya limbah perkebunan, limbah pertanian, limbah rumah tangga, dan limbah pengolahan kayu.

Potensi biomassa belum banyak didayagunakan sebagai sumber energi karena masih mengandalkan sumber-sumber energi yang lain. Salah satu sumber energi biomassa yang memiliki potensi besar di dunia adalah kayu dan limbah pengolahan kayu. Kayu dari pohon-pohon yang berukuran besar lebih banyak digunakan sebagai bahan bangunan, mebel, dan bahan industri lainnya. Proses penebangan dan

pengolahan kayu menghasilkan limbah yang potensial untuk digunakan sebagai sumber energi. Namun, limbah kayu memiliki kekurangan-kekurangan apabila digunakan sebagai sumber energi, yaitu sifat fisik yang tidak seragam, kepadatan energi yang rendah, kadar air yang tinggi, dan sifat hidrofilik. Hal ini menjadi masalah dalam transportasi, penanganan, penyimpanan, dan konversi yang efisien dan ekonomis menjadi produk bioenergi. Pembakaran langsung limbah kayu ini dalam penggunaannya pada skala rumah tangga dan industri juga tidak efisien dan menimbulkan polusi udara.

Untuk menjadikan biomassa bisa digunakan sebagai bahan bakar, sifat-sifat biomassa dapat diperbaiki dengan metode termal yang disebut torefaksi. Torefaksi adalah proses pirolisis pada temperatur relatif rendah, yaitu antara 200-300 °C di bawah kondisi tanpa udara. Laju pemanasan pada proses torefaksi biasanya tidak lebih dari 50 °C/menit dengan lama waktu antara 10 – 240 menit (Kongto et al., 2021). Metode ini diketahui sebagai cara yang efektif untuk meningkatkan sifat-sifat biomassa (Cao et al., 2020). Proses torefaksi biomassa tergantung pada beberapa parameter operasional, yang meliputi jenis biomassa, suhu torefaksi, waktu torefaksi, dan ukuran partikel biomassa.

Salah satu hambatan utama dalam pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi adalah sifatnya yang heterogen antara yang satu dengan yang lain (Chew & Doshi, 2011). Sifat biomassa yang heterogen ini membuat biomassa sulit untuk digunakan secara bersama-sama. Dengan proses torefaksi maka biomassa akan menjadi lebih homogen dibanding biomassa sebelumnya (Poskart & Zajemka, 2019).

Penelitian ini bertujuan membandingkan sifat biomassa, khususnya kayu dan limbah kayu, sebelum dan sesudah proses torefaksi. Sifat-sifat biomassa yang dibandingkan antara lain persentase *fixed carbon* (FC), *volatile matter* (VM), abu dan *high heating value* (HHV). Dengan mengetahui perbandingan sifat biomassa satu dengan lainnya, maka dapat dibuat kelompok-kelompok biomassa yang memiliki sifat-sifat hampir sama. Selain itu, pengaruh torefaksi terhadap homogenitas HHV biomassa sebelum dan sesudah ditorefaksi juga dianalisis menggunakan nilai standar deviasi sampel.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis data sekunder. Data sekunder diperoleh dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan proses torefaksi terhadap kayu dan limbah kayu. Data yang diambil adalah data tentang persentase FC, VM, abu dan nilai kalor. Data yang dipilih adalah biomassa kayu dan

limbah kayu yang ditorefaksi pada temperatur 280 – 300 °C dengan *holding time* 30 – 60 menit. Ada 12 macam kayu yang digunakan sebagai sampel pada penelitian ini, yaitu stem Norway spruce, stump Norway spruce, arundo donax, pine wood, timothy hay, willow, oat, mesquitie wood, juniper wood, chip wood, leucaena, dan schima.

Analisis homogenitas HHV untuk masing-masing kelompok sampel dilakukan dengan menghitung nilai standar deviasi sampelnya. Standar deviasi sampel dihitung dengan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (1)$$

Keterangan:

n = jumlah sampel

xi = nilai data ke i

x_m = nilai rata-rata data

HASIL

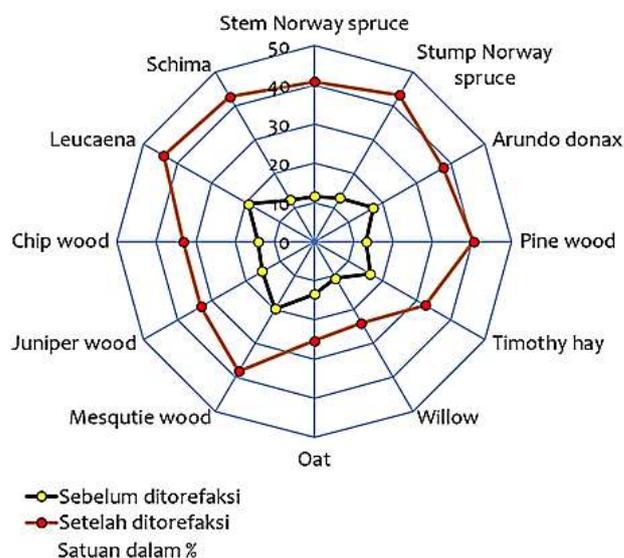
Analisis proksimat dan nilai kalor adalah sifat dasar yang diperlukan untuk mengkarakterisasi bahan bakar. Sifat-sifat ini dapat digunakan untuk memperkirakan potensi energi pada biomassa. Proses torefaksi akan menyebabkan sifat-sifat biomassa mengalami perubahan, sehingga kelemahan-kelemahan biomassa sebagai bahan bakar dapat dikurangi.

Tabel 1 menyajikan data persentase FC, VM, abu, dan nilai kalor dari berbagai kayu baik sebelum maupun sesudah ditorefaksi.

PEMBAHASAN

Fixed carbon adalah salah satu komponen dalam biomassa yang berkontribusi dalam menghasilkan

kalor. *Fixed carbon* merupakan parameter penting dalam gasifikasi dan pembakaran bahan bakar. Perbandingan persentase FC sebelum dan sesudah ditorefaksi dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. Perbandingan persentase *fixed carbon* sebelum dan sesudah ditorefaksi

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa persentase FC dalam sampel sebelum ditorefaksi berada antara 10 – 20%. Sesudah ditorefaksi, sampel dapat dikelompokkan menjadi 3 berdasarkan persentase FCnya. Kelompok pertama dengan persentase FC antara 20 - 30%, yaitu oat dan willow. Kelompok kedua dengan persentase FC antara 30 - 40%, yaitu arundo donax, timothy hay, mesquitie wood, jupiter wood, dan chip wood. Sedangkan leucaena, schima, stem Norway spruce, dan stump Norway spruce berada dikelompok tiga dengan persentase FC antara 40 - 50%.

Tabel 1. Proksimat analisis dan nilai kalor biomassa sebelum dan sesudah ditorefaksi

Biomassa	Sebelum ditorefaksi				Sesudah ditorefaksi				Sumber
	FC (%)	VM (%)	Abu (%)	HHV MJ/kg	FC (%)	VM (%)	Abu (%)	HHV kJ/kg	
Stem Norway spruce	11,57	88,12	0,31	19,75	40,86	58,65	0,49	23,61	(Wang et al., 2017)
Stump Norway spruce	12,90	86,69	0,41	19,51	43,19	55,74	1,08	23,49	(Wang et al., 2017)
Arundo donax	17,30	74,40	8,30	17,70	37,70	48,30	14,00	20,70	(Correia et al., 2017)
Pine wood	13,15	85,45	1,40	19,83	40,37	58,34	1,29	22,60	(Liu & Han, 2015)
Timothy hay	16,40	78,70	4,90	18,50	32,50	61,10	6,40	23,30	(Nhuchhen et al., 2018)
Willow	10,77	77,15	12,07	16,00	23,99	61,33	14,68	22,00	(Acharya & Dutta, 2016)
Oat	13,38	80,51	6,11	16,50	25,31	67,67	7,02	24,00	(Acharya & Dutta, 2016)
Mesquitie wood	19,77	78,25	1,98	16,70	38,26	59,08	2,653	22,70	(Thanapal et al., 2014)
Juniper wood	15,18	82,79	2,03	19,00	33,10	65,59	1,30	23,40	(Thanapal et al., 2014)
Chip wood	14,20	85,15	0,65	19,57	33,20	64,83	0,97	22,65	(Rejidak et al., 2019)
Leucaena	19,20	78,90	1,90	15,80	44,00	50,60	5,40	22,10	(Setkit et al., 2021)
Schima	12,27	86,67	1,05	18,55	42,74	55,69	1,57	23,29	(Li et al., 2021)

Bila ditinjau dari persentase FCnya, sampel sebelum ditorefaksi yang mempunyai persentase FC tertinggi dan terendah berturut-turut adalah mesquite wood (19,77%) dan willow (10,77%). Sampel sesudah ditorefaksi yang mempunyai persentase FC tertinggi dan terendah berturut-turut adalah luceana (44%) dan willow (23,99%). Bila dilihat dari peningkatan persentase FCnya, sampel mengalami peningkatan dari 16,1 – 30,47%. Jenis kayu yang mengalami peningkatan persentase FC paling tinggi adalah schima (30,47%), sedangkan sampel yang mengalami perubahan persentase FC paling rendah adalah oat (11,93%).

Persentase FC pada mesquite wood paling tinggi karena merupakan kayu keras yang banyak mengandung hemiselulosa. Namun ketika ditorefaksi, persentase FC mesquite wood lebih rendah dari luceana karena pada saat proses torefaksi hemiselulosa adalah komponen yang akan terdegradasi terlebih dahulu (Thanapal et al., 2014).

Proses torefaksi terbukti meningkatkan persentase FC. Pada proses torefaksi ada komponen biomassa yang lepas dan ada yang tertinggal. FC merupakan salah satu komponen yang tertinggal dalam bahan bakar ketika proses torefaksi sedangkan kandungan air dan sebagian besar VM akan lepas. Odusote et al. (2019) juga menjelaskan bahwa meningkatnya persentase FC ini disebabkan proses karbonisasi dan peningkatan ikatan C-C dalam bahan.

Komponen kedua dalam biomassa yang merupakan komponen terbesar adalah VM. Perubahan persentase VM ini berbanding terbalik dengan perubahan persentase FC dalam biomassa. Perbandingan persentase VM sebelum dan sesudah ditorefaksi dapat dilihat pada Gambar 2.



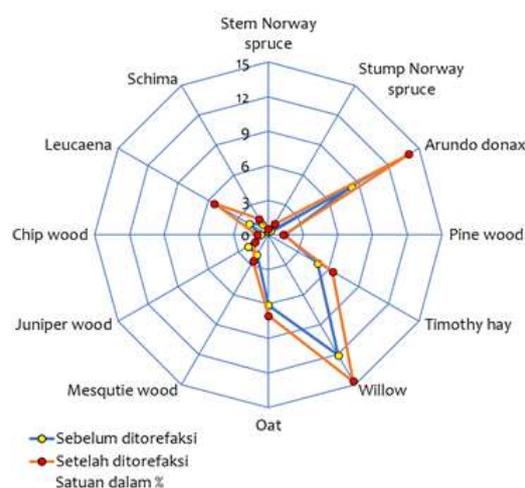
Gambar 2. Perbandingan persentase VM sebelum dan sesudah ditorefaksi

Dari Gambar 2 diketahui bahwa sebagian besar sampel sebelum ditorefaksi mempunyai persentase VM antara 80 – 90%. Stem Norway spruce memiliki

persentase VM paling tinggi (88,12%), sedangkan arundo donax mengandung VM paling rendah (74,4%). Sesudah ditorefaksi, 6 sampel mengandung VM antara 60 – 70% dan sebagiannya lagi antara 50 – 60%. Sesudah ditorefaksi, oat mempunyai persentase VM paling rendah, yaitu 67,67% sedangkan arundo donax persentase VMnya paling rendah (48,3%).

Penurunan persentase VM sesudah proses torefaksi disebabkan oleh proses devolatilisasi karena sebagian besar VM terdiri dari zat-zat yang menguap dan terbakar pada temperatur relatif rendah (Yang et al., 2019). Hal ini juga yang menyebabkan biomassa mudah terbakar dan laju pembakarannya tinggi.

Komponen biomassa yang tidak berkurang ketika proses torefaksi adalah abu. Bahkan abu adalah komponen yang tersisa sesudah proses pembakaran selesai. Sampel pada penelitian ini mempunyai persentase abu yang berbeda-beda, baik sebelum maupun sesudah ditorefaksi, seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan persentase abu sebelum dan sesudah ditorefaksi

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa ada beberapa sampel yang persentase abunya cukup besar sesudah ditorefaksi, yaitu arundo donax dan willow, masing-masing 16% dan 16,8%. Namun sebagian besar sampel mempunyai persentase abu di bawah 3%, baik sebelum maupun sesudah ditorefaksi. Di antara semua sampel, stem Norway spruce yang ditorefaksi memiliki persentase abu yang paling rendah, yaitu 0,49%.

Persentase abu biomassa sesudah ditorefaksi mengalami peningkatan. Hal ini bukan karena kandungan abu dalam biomassa bertambah, namun disebabkan pengurangan massa total dari biomassa sesudah proses torefaksi. Pengurangan massa total biomassa sesudah proses torefaksi terutama diakibatkan dari proses penguapan kandungan air dan devolatilisasi.

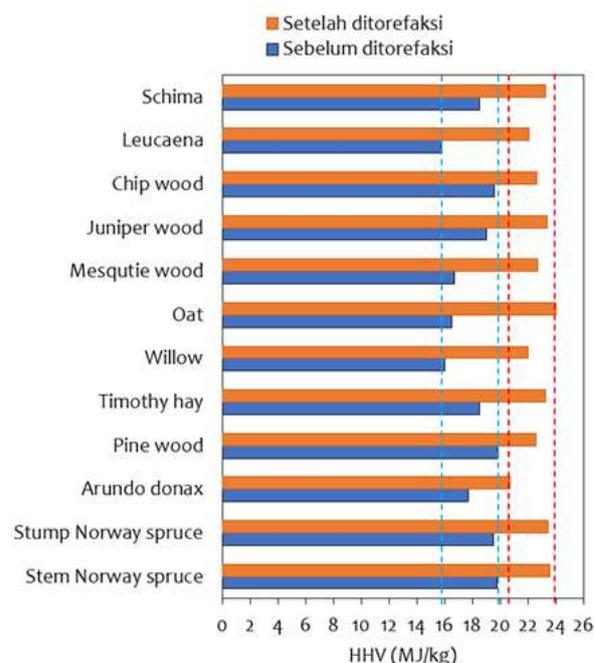
Parameter terpenting biomassa sebagai bahan bakar adalah nilai kalornya. Salah satu kelemahan biomassa adalah nilai kalornya yang rendah, karena di dalam biomassa selain mengandung komponen yang mengandung nilai kalor, juga mengandung komponen yang tidak mengandung nilai kalor seperti air dan sebagian dari VM. Torefaksi mampu mengubah persentase komponen-komponen dalam biomassa sehingga meningkatkan nilai kalornya. Gambar 4 menggambarkan HHV dari sampel beberapa jenis kayu sebelum dan sesudah ditorefaksi.

Pada penelitian ini proses torefaksi meningkatkan HHV sampel mulai dari 13,97 – 45,45%. Sebelum ditorefaksi, sampel mengandung nilai kalor antara 15,8 – 19,83 MJ/kg dan sesudah ditorefaksi nilai kalornya berada antara 20,7 – 24 MJ/kg. Jenis kayu oat yang ditorefaksi memiliki HHV paling tinggi di antara yang lainnya. Torefaksi terbukti dapat meningkatkan nilai kalor dari biomassa. Menurut Benavente & Fullana (2015), meningkatnya nilai kalor biomassa sesudah proses torefaksi ini disebabkan terlepasnya senyawa-senyawa dalam biomassa yang tidak mengandung nilai kalor atau kandungan kalornya rendah, sedangkan senyawa-senyawa yang mengandung nilai kalor tinggi tetap tertinggal.

Bila ditinjau dari homogenitas HHV, sesudah ditorefaksi beberapa sampel kayu yang berbeda, HHVnya lebih homogen dibanding sebelum ditorefaksi. Hal ini bisa diketahui dari standar deviasi sampel nilai HHV yang lebih rendah pada sampel sesudah ditorefaksi dibanding sebelum ditorefaksi, seperti dapat dilihat pada Tabel 2. Deviasi standar sampel dari sampel sebelum ditorefaksi adalah sebesar, $s = 1,52$, sedangkan deviasi standar sampel dari sampel sesudah ditorefaksi adalah sebesar, $s =$

0,91.

Dengan HHV yang lebih homogen, diharapkan beberapa biomassa dapat digunakan secara bersama-sama. Biomassa yang memiliki HHV sama atau hanya sedikit berbeda akan menghasilkan kalor yang tidak jauh berbeda sehingga energi yang dihasilkan akan lebih stabil.



Gambar 4. Perbandingan HHV sebelum dan sesudah ditorefaksi

Tabel 2. Deviasi standar sampel biomassa sebelum dan sesudah ditorefaksi

Biomassa	Sebelum ditorefaksi		Setelah ditorefaksi	
	HHV (MJ/kg)	Kuadrat deviasi	HHV (kJ/kg)	Kuadrat deviasi
Stem Norway spruce	19,75	2,67	23,61	0,62
Stump Norway spruce	19,51	1,94	23,49	0,45
Arundo donax	17,70	0,17	20,70	4,49
Pine wood	19,83	2,93	22,60	0,05
Timothy hay	18,50	0,15	23,30	0,23
Willow	16,00	4,48	22,00	0,67
Oat	16,50	2,62	24,00	1,39
Mesquitie wood	16,70	2,01	22,70	0,01
Juniper wood	19,00	0,78	23,40	0,34
Chip wood	19,57	2,11	22,65	0,03
Leucaena	15,80	5,37	22,10	0,52
Schima	18,55	0,19	23,29	0,22
	HHV _m = 18,12	Σ = 25,41	HHV _m = 22,82	Σ = 9,03
		s = 1,52		s = 0,91

SIMPULAN

Proses torefaksi dapat meningkatkan FC, menurunkan VM, menaikkan abu, dan meningkatkan HHV beberapa kayu dan limbah kayu dengan persentase yang berbeda-beda. Sebelum ditorefaksi willow mempunyai persentase FC terendah (10,77%) dan mesquite wood mempunyai persentase FC tertinggi (19,77%). Setelah ditorefaksi sampel yang memiliki persentase FC terendah dan tertinggi berturut-turut willow (23,99%) dan leucaena (44%). Persentase VM terendah sebelum dan sesudah ditorefaksi adalah pada arunda donax (17,3% dan 48,3%) sedangkan persentase VM tertinggi sebelum dan sesudah torefaksi adalah pada stem norway spruce (88,12%) dan oat (67,67%). Persentase abu stem norway spruce sebelum ditorefaksi sebesar 0,31% adalah yang terendah, sedangkan persentase yang tertinggi adalah pada willow (12,07%). Setelah ditorefaksi, persentase abu pada stem norway spruce masih yang terendah (0,31%) dan pada willow masih yang tertinggi (14,68%). Sebelum ditorefaksi, HHV sampel berada antara 16 – 19,83% dan sesudah ditorefaksi besarnya HHV meningkat menjadi 20,7 – 24 MJ/kg. Dari harga deviasi standar sampel diketahui bahwa HHV sesudah ditorefaksi lebih homogen dibanding HHV sebelum ditorefaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, B., & Dutta, A. (2016). Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 6, 139–149. <https://doi.org/10.1007/s13399-015-0170-x>
- Altylnbaeva, D., Astafev, A., & Tabakaev, R. (2018). Kinetics of biomass low-temperature pyrolysis by coats – redfern method. *01058*, 1–5.
- Anupam, K., Sharma, A. K., Lal, P. S., Dutta, S., & Maity, S. (2016). Preparation, characterization and optimization for upgrading Leucaena leucocephala bark to biochar fuel with high energy yielding. *Energy*, 106, 743–756. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.100>
- Benavente, V., & Fullana, A. (2015). Torrefaction of olive mill waste. *Biomass and Bioenergy*, 73, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.020>
- BP. (2021). Statistical Review of World Energy 2021. In *BP Energy Outlook 2021* (Vol. 70). <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- Chew, J. J., & Doshi, V. (2011). Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4212–4222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.017>
- Correia, R., Gonçalves, M., Nobre, C., & Mendes, B. (2017). Impact of torrefaction and low-temperature carbonization on the properties of biomass wastes from *Arundo donax* L. and *Phoenix canariensis*. *Bioresource Technology*, 223, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.046>
- Fieducik, J. (2018). *The Use of Concentrated Solar Power for Heat Generation*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_21
- Laougé, Z. B., & Merdun, H. (2020). Pyrolysis and combustion kinetics of *Sida cordifolia* L. using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 299, 122602. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122602>
- Li, X., Lu, Z., Chen, J., Chen, X., Jiang, Y., Jian, J., & Yao, S. (2021). Effect of oxidative torrefaction on high temperature combustion process of wood sphere. *Fuel*, 286(P2), 119379. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119379>
- Liu, Z., & Han, G. (2015). Production of solid fuel biochar from waste biomass by low temperature pyrolysis. *Fuel*, 158, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.032>
- Nhuchhen, D. R., Afzal, M. T., Parvez, A. M., Ram, D., Afzal, M. T., Parvez, A. M., Afzal, M. T., & Parvez, A. M. (2018). Effect of torrefaction on the fuel characteristics of timothy hay Effect of torrefaction on the fuel characteristics of timothy hay. *7269*. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1479135>
- Odusote, J. K., Adeleke, A. A., Lasode, O. A., Malathi, M., & Paswan, D. (2019). Thermal and compositional properties of treated *Tectona grandis*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00398-1>
- Rejdak, M., Czardybon, A., Ignasiak, K., & Robak, J. (2019). Utilization of waste forest biomass: Pelletization studies of torrefied sawmill wood chips. *E3S Web of Conferences*, 100. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000068>
- Setkit, N., Li, X., Yao, H., & Worasuwannarak, N. (2021). Torrefaction behavior of hot-pressed pellets prepared from leucaena wood. *Bioresource Technology*, 321(November 2020), 124502. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124502>
- Tekin, K., Karagöz, S., & Bekta, S. (2014). A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 673–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.216>
- Thanapal, S. S., Chen, W., Annamalai, K., Carlin, N., Ansley, R. J., & Ranjan, D. (2014). *Carbon Dioxide Torrefaction of Woody Biomass*.

- Wang, L., Barta-rajnai, E., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Czégény, Z., Jakab, E., Barta, Z., & Grønli, M. (2017). Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood , stump and bark. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.024>
- Wilk, M., Magdziarz, A., Gajek, M., Zajemska, M., Jayaraman, K., & Gokalp, I. (2017). Combustion and kinetic parameters estimation of torrefied pine, acacia and *Miscanthus giganteus* using experimental and modelling techniques. *Bioresource Technology*, 243, 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.116>
- Yang, Y., Chyuan, H., Chuan, T., & Chen, W. (2019). Torrefaction of de-oiled *Jatropha* seed kernel biomass for solid fuel production. *Energy*, 170, 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.026>