

PROSES TOREFAKSI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT UNTUK KANDUNGAN HEMISELULOSA DAN UJI KEMAMPUAN PENYERAPAN AIR

Anton Irawan^{*)}, Tubagus Riadz dan Nurmalisa

Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jendral Sudirman Km. 3, Cilegon – Banten

^{*)}Penulis korespondensi : antonirawan@untirta.ac.id

Abstract

EMPTY FRUIT BUNCHES TORREFACTION FOR HEMICELLULOSE CONTENT AND WATER ABSORPTION TEST. *Biomass is organic material resulting from the process of photosynthesis. Biomass can be produced directly as product or waste from the processing of agricultural or plantation. Indonesia is a country that produces biomass in very large quantities. One of the largest biomass resulting from the processing of palm oil is oil palm empty fruit bunches (EFB). Basically, the EFB has a low energy content and easily absorbs water. With higher production of palm oil, the EFB has potential as a good quality fuel and need early treatment to maintain the quality of the EFB. Torrefaction was one of thermal treatments with process temperature around 200-350 °C in the absence oxygen condition. By torrefaction, the EFB has a high energy content and decrease the water absorption. With low water absorption, EFB will have benefit in the storage that has high humidity such as Indonesia. The variables that varied for EFB torrefaction was the temperature (250-350 °C) and the holding time (15-60 minutes) to produce the high quality solid fuel from EFB. Analysis product in this study was proximate analysis, water absorption, and hemicellulose and caloric value. The results showed that the higher temperature and longer time torrefaction had higher calorific value, the hemicellulose content decreased thereby increasing hydrophobicity. Also, the torrefaction EFB can increase the calorific value around 30%.*

Keywords: *calorific value; empty fruit bunches (EFB); hemicellulose; hydrophobic; torrefaction*

Abstrak

Biomassa merupakan material organik yang dihasilkan dari proses fotosintesis. Biomassa dapat dihasilkan secara langsung sebagai produk atau limbah dari pengolahan hasil pertanian atau perkebunan. Indonesia merupakan negara kaya akan biomassa dengan jumlah yang melimpah. Salah satu biomassa dengan jumlah yang melimpah adalah limbah yang dihasilkan dari pengolahan biji kelapa sawit antara lain tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Pada dasarnya, TKKS memiliki kandungan energi rendah serta mudah menyerap air. Dengan jumlah biomassa TKKS melimpah maka perlu suatu metode untuk meningkatkan kualitas dari TKKS dengan melakukan pengolahan awal. Torefaksi merupakan salah satu metode pengolahan awal untuk peningkatan kualitas biomassa dengan temperatur proses sekitar 200-350°C tanpa adanya oksigen. Setelah mengalami proses torefaksi maka TKKS akan memiliki kandungan energi tinggi serta kemampuan menyerap air rendah. Dengan kemampuan menyerap air rendah maka TKKS dapat disimpan dalam rentang waktu lama pada kondisi kelembaban tinggi seperti Indonesia. Adapun variasi dalam penelitian ini yaitu temperatur antara 250-350°C serta waktu tahan torefaksi antara 15-60 menit. Adapun analisa produk TKKS torefaksi yaitu analisa proksimat, kemampuan menyerap air, kandungan hemiselulosa dan nilai kalor. Pada percobaan ini memperlihatkan bahwa pada temperatur torefaksi lebih tinggi serta waktu tahan torefaksi yang lama akan meningkatkan kandungan energi serta menurunkan kemampuan menyerap air tapi menghilangkan massa TKKS lebih banyak. Pada percobaan ini kandungan energi dari TKKS dapat meningkat sekitar 30%

Kata kunci: *nilai kalor; TKKS; hemiselulosa; hidropobik; torefaksi*

How to Cite This Article: Irawan, A., Riadz, T., dan Nurmalisa, (2015), Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Kandungan Hemiselulosa dan Uji Kemampuan Penyerapan Air, Reaktor, 15(3), 190-195, <http://dx.doi.org/10.14710/reaktor.15.3.190-195>

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara terbesar menghasilkan minyak kelapa sawit dengan hasil samping berupa limbah dari industri kelapa sawit. Limbah kelapa sawit dengan jumlah besar adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Selama ini, TKKS dibiarkan membusuk atau langsung digunakan sebagai bahan bakar. TKKS menjanjikan sebagai bahan bakar alternatif, tetapi TKKS memiliki beberapa kendala untuk digunakan sebagai bahan bakar yaitu konsumsi energi besar dalam pengumpulan, ketidakseragaman komposisi di dalamnya serta nilai kalor rendah. Dengan kendala – kendala tersebut, maka perlu suatu metode untuk meningkatkan kualitas TKKS sebagai salah satu alternatif bahan bakar yang ramah lingkungan. Metode torefaksi merupakan salah satu metode untuk pengolahan awal biomassa agar kualitas meningkat dan biomassa dapat dipergunakan dalam rentang waktu lama (Basu, 2013).

Torefaksi adalah proses pengolahan secara termokimia untuk bahan baku yang mengandung karbon seperti biomassa TKKS. Torefaksi berlangsung pada tekanan atmosfer dengan rentang temperatur 200-350^oC (Bergman, 2005). Dengan temperatur akhir torefaksi meningkat akan berakibat gas volatil yang dihasilkan akan bertambah dari hasil dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa (Chen dan Kuo, 2011). Hemiselulosa akan terdekomposisi terlebih dahulu dan dilanjutkan dengan dekomposisi lignin dan selulosa (Chen dan Kuo, 2010). Dengan proses torefaksi maka kandungan karbon tetap akan meningkat dan kandungan zat-zat terbang akan menurun sehingga kualitas biomassa akan meningkat (Chen dan Kuo, 2011). Kemudian, keuntungan lain dari proses torefaksi adalah kandungan air dari produk makin menurun serta sifat makin sulit menyerap air dari udara (Li dkk., 2012). Secara umum, kualitas produk torefaksi biomassa adalah densitas energi dan *hydrophobic* meningkat (Deutmeyer, 2012). Proses torefaksi memiliki manfaat tambahan mengurangi atau menghilangkan bahan mudah menguap yang tidak diinginkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur (Chen dkk., 2012). Dengan kandungan oksigen lebih rendah maka rasio oksigen terhadap karbon akan menurun sehingga biomassa memiliki karakteristik mendekati batubara (Van der Stelt, 2011). Salah satu parameter penting dalam pemanfaatan biomassa TKKS sebagai bahan bakar adalah kemudahan untuk dikecilkan ukurannya (*grindability*). Produk torefaksi akan lebih mudah dikecilkan ukurannya sehingga konsumsi energi untuk mengecilkan ukuran semakin menurun (Chew., 2011, Gil dkk., 2015). Pembakaran yang baik untuk bahan bakar adalah kemudahan dalam pembakaran (*reactivity*). Biomassa torefaksi akan lebih mudah terbakar akibat kandungan air yang lebih

rendah (Pimchuai dkk., 2010). Penambahan produk biomassa torefaksi akan mempercepat proses pembakaran pada pembakaran batubara di tungku pembakaran (Park dkk., 2012). Selain pembakaran, produk biomassa torefaksi dapat dimanfaatkan dalam gasifikasi. Pada proses gasifikasi, penggunaan produk biomassa torefaksi akan mengurangi potensi terjadinya penggumpalan dan tar (Strege dkk., 2011).

Torefaksi dapat dilakukan pada berbagai macam biomassa seperti jerami, kayu, bambu (Chen dkk., 2015). Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun (Irawan dkk., 2014). Penelitian torefaksi pada biomassa kelapa sawit telah dilakukan pada kulit buah kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit dan kulit keras yang membungkus biji kelapa sawit (*kernel shell*) (Uemura dkk., 2011) Pada penelitian tersebut, *yield* energi paling besar dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit sekitar 96% dan *kernel shell* 100%, sedangkan pada kulit kelapa sawit *yield* energi sebesar 56%. Keberadaan oksigen berpengaruh terhadap kenaikan temperatur tetapi massa dan energi *yield* menurun dengan menaikkan konsentrasi oksigen. Pada temperatur tinggi maka dekomposisi hemiselulosa lebih cepat terjadi sehingga massa dari komponen-komponen mudah terbakar yang terdapat di kelapa sawit ikut terbawa dalam proses torefaksi temperatur tinggi (Chen, 2011). Hasil penelitian torefaksi TKKS pada temperatur 200^oC dan 225^oC tidak terjadi degradasi dari hemiselulosa, namun pada temperatur 250^oC penurunan berat mencapai 19,5% berat sampel, penurunan berat dari degradasi hemiselulosa pada 275^oC sekitar 52,5% dan pada 300^oC hanya sekitar 16,8% berat, hal ini karena penurunan berat yang tinggi pada temperatur sebelumnya. Penelitian tentang torefaksi untuk biomassa berserat seperti TKKS memperlihatkan bahwa keberadaan oksigen akan mengurangi perolehan produk yang dihasilkan akibatnya cepatnya proses oksidasi terhadap komponen –komponen mudah terbakar yang terdapat di biomassa (Lu dkk., 2012).

Biomassa yang dihasilkan dari limbah pertanian dan perkebunan akan melimpah saat masa panen sehingga jumlah limbah besar dan pemanfaatannya masih kecil. Biomassa yang telah mengalami pengelolaan awal dilanjutkan dengan proses penyimpanan. Indonesia merupakan negara dengan tingkat kelembaban air yang tinggi sehingga biomassa berpotensi untuk menyerap air. Penyerapan biomassa sangat ditentukan dengan kemampuan menyerap air dari masing-masing biomassa. Dengan melimpahnya TKKS maka produk torefaksi TKKS

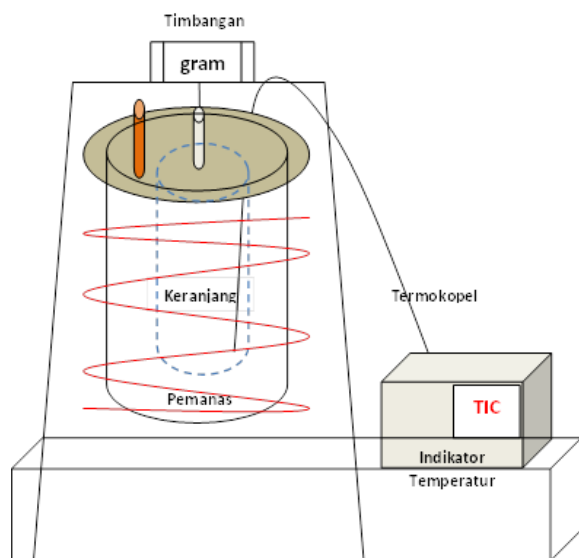
perlu diketahui kemampuan untuk menyerap air. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pengaruh temperatur dan lama torefaksi terhadap kualitas TKKS termasuk kemampuan dalam menyerap air.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Bahan baku TKKS diperoleh dari perkebunan kelapa sawit yang berada di wilayah PTPN VIII Jawa Barat di daerah Pandeglang dan Lebak. TKKS tersebut akan dikecilkan ukurannya hingga rata-rata mencapai 5 mm dan ditimbang sebanyak 15 gram untuk setiap percobaan. Bahan baku sebelum digunakan akan dianalisa proksimat serta kandungan energi. Kemudian TKKS 15 gram tersebut dimasukkan ke dalam reaktor torefaksi.

Reaktor torefaksi pada penelitian ini seperti pada Gambar 1. Reaktor torefaksi tersebut dilengkapi dengan alat pengendali temperatur yang terhubung dengan termokopel yang terdapat di dalam reaktor torefaksi. Jenis termokopel yang dipergunakan adalah tipe K. Pemanas pada reaktor tersebut dapat menghasilkan panas hingga temperatur didalam reaktor mencapai 450°C. Pada proses torefaksi dalam penelitian ini temperatur divariasikan hingga temperatur 350°C. Selain itu reaktor torefaksi juga dilengkapi dengan timbangan digital serta keranjang bahan baku.



Gambar 1. Skematik reaktor torefaksi tandan kosong kelapa sawit

Prosedur

Sampel TKKS sebanyak 15 gram dimasukkan ke dalam keranjang, kemudian keranjang dimasukkan ke reaktor torefaksi. Neraca digital diletakkan diatas reaktor untuk mengetahui perubahan massa TKKS di dalam reaktor setiap menit. Pemanas heater dikendalikan untuk mendapatkan kondisi temperatur 250, 300 dan 350°C pada proses torefaksi dan lama proses torefaksi diukur dengan menggunakan *stop watch*. Perubahan massa dan temperatur dicatat setiap

menit untuk variasi proses torefaksi 15, 30, 45, dan 60 menit. Produk hasil torefaksi dianalisa yaitu analisa berat, analisa kandungan hemiselulosa, analisa kemampuan menyerap air, analisa kandungan proksimat serta kandungan nilai kalor. Analisa kandungan selulosa dengan metode gravimetri menggunakan asam sulfat (H₂SO₄). Analisa proksimat dan kandungan kalor dilakukan di Tekmira Bandung dengan menggunakan *Thermal Gravimetry Analysis* (TGA). Dengan analisis TGA maka komposisi dan laju pengurangan massa komponen-komponen penyusun dari suatu biomassa dapat diketahui. Adapun tahapan analisa dengan TGA adalah biomassa TKKS dimasukan ke dalam TGA dengan hasil dimulai dari analisa kandungan air, zat terbang dan abu. Kandungan *fixed carbon* merupakan pengurangan dari komponen-komponen lainnya. Adapun kandungan energi TKKS didapatkan dengan menggunakan *Adiabatic Bomb Calorimeter*.

Uji kemampuan menyerap air dilakukan dengan menyimpan produk TKKS hasil torefaksi di ruangan lembab selama 25 hari. Berat massa TKKS produk torefaksi akan ditimbang setiap hari untuk mengamati perubahan massa akibat menyerap air di lingkungan dengan kelembaban tinggi. Persen penambahan berat menunjukkan kemampuan menyerap dari produk torefaksi TKKS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

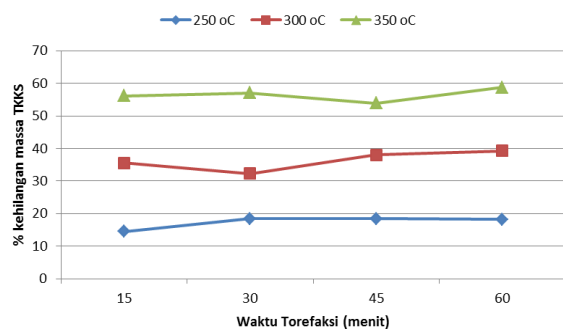
Pada percobaan ini, bahan baku TKKS dianalisa secara proksimat untuk mengetahui komposisi bahan baku serta kandungan energi. Tabel 1 menunjukkan bahwa kandungan zat terbang dari TKKS sangat tinggi di atas 70%. Proses torefaksi merupakan proses penghilangan komponen-komponen yang terletak di pori-pori dari biomassa. Dengan kandungan zat terbang tinggi maka potensi terbukanya pori-pori semakin besar dan kemampuan menyerap air lebih tinggi. Adapun kandungan elemen dari TKKS dengan analisa ultimat bahwa kandungan oksigen TKKS dapat mencapai 43% (Uemura dkk., 2011). Apabila kandungan zat terbang berkurang dari biomassa maka kandungan karbon tetap akan meningkat. Peningkatan kandungan karbon tetap akan meningkatkan nilai kalor dari biomassa tersebut.

Tabel 1. Karakteristik bahan baku TKKS untuk torefaksi

Bahan Baku TKKS	% -berat				Nilai Kalor (kkal/kg)
	Kandungan Air	Zat Terbang	Abu	Karbon Tetap	
	5,53	73,64	4,29	16,55	4.218,2

Gambar 2 menampilkan pengaruh temperatur dan lama proses torefaksi terhadap % kehilangan massa dari TKKS. Adapun komponen yang hilang dari biomassa adalah kandungan air serta zat terbang. Hilangnya zat terbang tinggi sangat dipengaruhi oleh temperatur torefaksi dan lama proses torefaksi. Peningkatan temperatur dan lama proses torefaksi

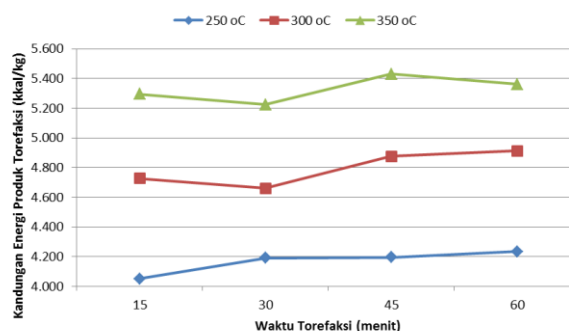
akan menyebabkan makin terbukanya pori-pori TKKS. Dengan makin terbukanya pori-pori maka massa yang hilang dari biomassa TKKS semakin besar (Gambar 2). Pada temperatur 250°C, % kehilangan massa TKKS dari proses torefaksi secara rata-rata sebesar 18%, temperatur lebih tinggi yaitu 300°C sebesar rata-rata 36% dan temperatur 350°C rata-rata 55%. Pada temperatur tinggi, massa TKKS yang hilang lebih besar dibandingkan pada temperatur rendah dari proses torefaksi. Kehilangan massa besar yang terjadi pada temperatur di atas 300°C karena pada kondisi tersebut, pori-pori dari biomassa telah terbuka sehingga komponen hemiselulosa, selulosa dan lignin terdekomposisi menjadi gas dan keluar melalui pori-pori dari TKKS. Kehilangan biomassa TKKS pada penelitian ini lebih kecil dibandingkan dengan penelitian Sabil dkk. (2013) pada temperatur torefaksi 300°C dengan kehilangan massa sebesar 70%.



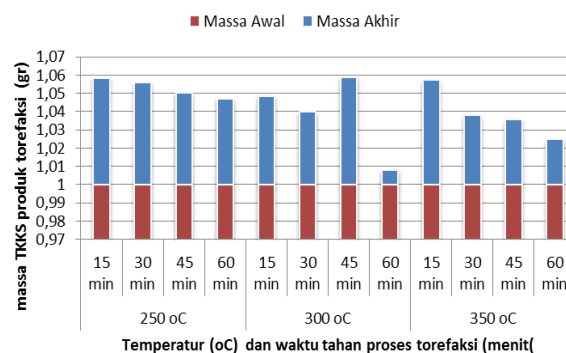
Gambar 2. Pengaruh temperatur torefaksi (°C) dan lama proses (menit) torefaksi terhadap % kehilangan massa TKKS produk hasil torefaksi

Kandungan energi dari biomassa merupakan parameter penting sebelum suatu bahan bakar dipergunakan. Pada penelitian ini kandungan bahan bakar untuk seluruh variasi temperatur dan waktu dianalisa dengan menggunakan *Adiabatic Bomb Calorimeter*. Hasil analisa kandungan energi ditampilkan pada Gambar 3 bahwa pada proses torefaksi dengan temperatur tinggi (350°C), produk hasil torefaksi TKKS memiliki kandungan energi (kcal/kg) tertinggi dibandingkan temperatur lainnya hingga mencapai kandungan energi 5430 kkal/kg dari nilai awal kandungan energi TKKS sebesar sekitar 4000 kkal/kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa torefaksi dapat meningkatkan kandungan energi TKKS hingga 30% tetapi proses torefaksi pada temperatur 350°C menghilangkan massa TKKS hingga mencapai 55%. Kondisi ini menyebabkan kandungan energi total produk hasil torefaksi pada temperatur 350°C lebih rendah dibandingkan pada temperatur 250 dan 300°C. Kondisi ini disebabkan ada sebagian komponen mengandung energi dari TKKS mengalami proses oksidasi serta komponen-komponen mudah terbakar dari zat terbang ikut terbawa keluar dari dalam TKKS. Penelitian dilakukan Sabil dkk. (2013) menunjukkan nilai kalor pada temperatur 250°C sebesar 4700 kkal/kg dan temperatur 300°C

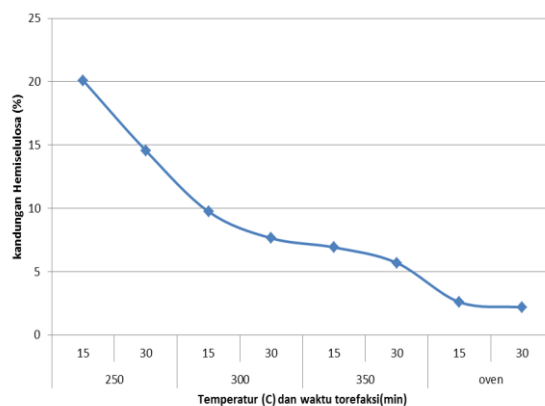
sebesar 5360 kkal/kg. Dengan melihat nilai kalor yang dihasilkan maka penelitian ini memiliki nilai kalor lebih rendah dibandingkan dengan penelitian Sabil dkk. (2013). Tetapi penelitian ini memiliki kandungan massa yang hilang lebih sedikit dibandingkan penelitian Sabil dkk. (2013) pada temperatur 300°C sebesar 36%. Penelitian Sabil dkk. (2013) pada temperatur 300°C memiliki kehilangan massa sebesar 70% sehingga tinggal 30 % massa yang tersisa dengan proses torefaksi.



Gambar 3. Pengaruh temperatur torefaksi (°C) dan lama proses (menit) torefaksi terhadap kandungan energi (kcal/kg) produk hasil torefaksi



Gambar 4. Pengaruh temperatur (°C) dan lama (menit) proses torefaksi terhadap kemampuan menyerap air dari produk torefaksi



Gambar 5. Pengaruh temperatur (°C) dan lama proses (menit) torefaksi terhadap kandungan hemiselulosa (% berat)

Dengan tujuan bahwa produk torefaksi TKKS akan disimpan sebelumnya dipergunakan untuk bahan

bakar maka perlu dilakukan pengujian kemampuan menyerap air dari produk torefaksi TKKS. Umumnya biomassa memiliki kelemahan yaitu kemampuan menyerap air dari udara cukup tinggi sehingga biomassa bila disimpan di tempat terbuka akan memiliki kandungan air tinggi. Dengan kandungan air tinggi maka saat biomassa TKKS dipergunakan sebagai bahan bakar akan menyulitkan dalam transportasi dan kehilangan energi pada saat dibakar. Hasil analisa kemampuan menyerap air dilakukan dengan mengambil sampel produk sebanyak 1 gram dan disimpan di ruangan lembab selama 25 hari. Dari analisa perubahan massa selama 25 hari seperti ditampilkan pada Gambar 4, terlihat bahwa kenaikan massa akibat menyerap air dibawah 6 %. Umumnya biomassa tanpa torefaksi dapat menyerap air hingga diatas 15 % dan dinamakan sebagai air permukaan. Dengan demikian proses torefaksi dapat mengubah karakter biomassa TKKS menjadi hidropobik. Penelitian torefaksi untuk menguji kemampuan menyerap air dengan bahan baku serbuk gergaji dengan temperatur 260- 300°C dan produk torefaksi diletakan pada ruangan lembab selama 2 hari menunjukkan kenaikan kandungan sebesarnya 12% (Li dkk, 2012). Dengan melihat ini bahwa torefaksi TKKS memiliki kenaikan air rendah dan meningkatkan daya hidropobik material.

Parameter lainnya dari proses torefaksi TKKS adalah kandungan hemiselulosa. Pada proses torefaksi hemiselulosa akan terdekomposisi lebih cepat dibandingkan selulosa dan lignin. Gambar 5 memperlihatkan penurunan kandungan hemiselulosa seiring dengan kenaikan temperatur dan lama waktu torefaksi. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada temperatur rendah (250°C) terjadi penurunan lebih tajam dari waktu torefaksi 15 menit ke waktu torefaksi 30 menit dibandingkan pada temperatur 300 dan 350°C. Kondisi ini disebabkan bahwa pada proses torefaksi rendah dan waktu torefaksi rendah maka hemiselulosa lebih banyak hilang dibandingkan temperatur tinggi (di atas 300°C) dengan kandungan selulosa dan lignin mulai hilang (Bergman, 2005).

KESIMPULAN

Percobaan Torefaksi TKKS untuk pengamatan kandungan hemiselulosa dan kemampuan menyerap air telah dilakukan. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan torefaksi semakin tinggi nilai kalor TKKS yang dihasilkan dengan kehilangan massa lebih besar. Kondisi terbaik diitunjukkan pada temperatur 300°C waktu torefaksi 30 menit. Pada kondisi tersebut didapatkan nilai kalor sebesar 4660 kkal/kg serta jumlah massa yang hilang sekitar 32%, kandungan hemiselulosa 7,64% dan sifat hidrofobik TKKS dilihat dari jumlah air yang terserap.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PTPN VIII Jawa Barat untuk limbah tandan kosong

kelapa sawit dan Tekmira untuk analisa proksimat bahan baku dan produk torefaksi TKKS.

DAFTAR PUSTAKA

Basu, P., (2013), Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction-Practical Design and Theory, Second Edition, *Academic Press*, San Diego, pp. 87-145.

Bergman, P.C.A., (2005), Combined Torrefaction and Pelletisation, *ECN Report*, ECN-C-05-073.

Chen, W.H. and Kuo, P.C., (2010), A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry, *Energy*, 35, pp. 2580-2586.

Chen, W.H. and Kuo, P.C., (2011), Torrefaction and Co-torrefaction Characterization of Hemicellulose, Cellulose and Lignin As Well As Torefaction of Some Basic Constituen in Biomass, *Energy*, 36, pp. 803-811.

Chen, W.H., Du, S.W., Tsai, C.H., and Wang, Z.Y., (2012), Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces, *Bioresource Technology*, 111, pp. 433-438.

Chen, W.H., Peng, P., and Bi, X.T., (2015), A state-of-the-art review of biomass torrefaction ,densification and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, pp. 847-866.

Chew, J.J. and Doshi, V., (2011), Recent advances in biomass pretreatment-Torrefaction fundamentals and technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 4212-4222.

Deutmeyer, M., (2012), Torrefaction Technologies and Initiatives for Improving Biomass Feedstock Specifications: Possible Effect of Torrefaction on Biomass Trade, *IEA Bioenergy*, Task 40.

Gil, M.V., Garcia, R., Pevida, C., and Rubiera, F., (2015), Grindability and combustion behavior of coal and torrefied biomass blends, *Bioresource Technology*, 191, pp. 205-212.

Irawan, A., Setiani, F., dan Ichsan, P.W., (2014), Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Proses Torefaksi Terhadap Kualitas Produk Torefaksi Kulit Durian, *Prosiding Seminar Integrasi Proses*, ISSN 2088-6756

Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X.T., Lim, C.J., and Sokhansanj, S., (2012), Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor, *Bioresource Technology*, 103, pp. 453-8.

Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X.T., Lim, C.J., and Sokhansanj, S., (2012). Pelletization of torrefied

sawdust and properties of torrefied pellets, *Applied Energy*, 93, pp. 680-685.

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, pp. 98-105.

Park, S.W., Jang, C.H., Baek, K.R., and Yang, J.K., (2012), Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: Evaluation of fuel characteristics of the products, *Energy*, 45, pp. 676-685.

Pimchuai, A., Dutta, A., and Basu, P., (2010), Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties, *Energy Fuels*, 24, pp. 4638-4645.

Sabil, K.M., Aziz, M.A., Lal, B., and Uemura, Y., (2013), Effects of torrefaction on the physiochemical properties of oil palm empty fruit bunches, mesocarp fiber and kernel shell, *Biomass and Bioenergy*, 56, pp. 351-360.

Strege, J., Swanson, M., Folkedahl, B., Stanslawski, J., and Laumb, J., (2011), Fischer-Tropsch catalyst testing in a continuous bench-scale coal gasification system, *Fuel Process Technol*, 92, pp. 757-63.

Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T., and Yusuf, S. B., (2011), Torrefaction of Oil Palm Wastes, *Fuel*, 90, pp. 2585-2591.

Van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., and Ptasinski, K.J., (2011), Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review, *Biomass and Bioenergy Journal*, 35, pp. 3748-3762.