

Jurnal Mekanika dan Sistem Termal (JMST)

Journal homepage: http://e-journal.janabadra.ac.id/index.php/JMST

Review Article

Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Padat Biomassa Dengan Proses Densifikasi Dan Torrefaksi

Mochamad Syamsiro^{1,2*}

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra, Jl. T.R. Mataram 57 Yogyakarta 55231 ² Center for Waste Management and Bioenergy, Universitas Janabadra, Jl. T.R. Mataram 57 Yogyakarta 55231

*Corresponding author : E-mail: syamsiro@janabadra.ac.id

Abstract –Biomass is one of the renewable energy resource in Indonesia which has abundant resources potential. Biomass can be converted into energy by using several process method such as thermochemical dan biological processes. Biomass conversion into fuel is available in all three basic forms of matter: solid, liquid and gas. Generally, biomass solid fuel has low mass and energy density. This paper will review the technology to upgrade the quality of the solid fuel by means of densification and torrefaction. Combined densification and torrefaction processes will be an attractive option to produce high quality solid fuel.

Keywords - Biomass; Densification; Torrefaction; Heating value.

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan ekonomi Indonesia yang terus menggeliat di berbagai sektor, maka hal ini berdampak pada peningkatan kebutuhan energi baik itu untuk menggerakan industri maupun untuk konsumsi rumah tangga. Konsumsi energi final Indonesia meningkat rata-rata sebesar 2,9% per tahun pada periode 2000-2012 (BPPT, 2014). Jenis energi yang paling dominan adalah penggunaan bahan bakar minyak (BBM) yang meliputi bensin, minyak tanah, solar, minyak diesel, avtur, avgas, dan minyak bakar. Sektor transportasi merupakan pengguna BBM yang paling besar.

Selain sektor transportasi, sektor ketenagalistrikan juga berkontribusi cukup signifikan terhadap konsumsi energi final. Hingga akhir tahun 2013, kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia mencapai 50.989 MW yang terdiri dari pembangkit PLN sebesar 35.946 MW dan non PLN sebesar 15.043 MW (ESDM, 2014a). Nilai ini meningkat sebesar 11% atau 5.736 MW dibandingkan dengan kapasitas terpasang tahun 2011. Namun demikian, dari kapasitas sebesar itu, masih ada sekitar seperlima

penduduk Indonesia yang belum menikmati listrik yang dapat dilihat dari rasio elektrifikasi yang baru mencapai 80,51 % hingga akhir 2013, walaupun jika dibandingkan dengan tahun sebelumnya ada kenaikan sebesar 3,94%. Untuk meningkatkan kapasitas listrik terpasangnya, Pemerintah Indonesia mencanangkan program listrik 35.000 MW yang diharapkan bias diselesaikan pada tahun 2019. Program ini bertujuan untuk mencukupi kebutuhan listrik masyarakat dan industri yang meningkat cukup pesat beberapa tahun terakhir ini.

Dari total konsumsi energi pada tahun 2013 sebesar 1,1 milyar BOE (*Barrel Oil Equivalent*), penggunaan bahan bakar konvensional cukup mendominasi seperti minyak bumi dan batubara (ESDM, 2014b). Bahan bakar jenis ini bersifat tidak terbarukan sehingga suatu saat akan habis. Oleh karena itu, pengalihan sumber energi dari fosil ke energi terbarukan menjadi sangat mendesak untuk keberlanjutan ekonomi Indonesia ke depan. Salah satu energi terbarukan yang potensinya cukup melimpah adalah biomassa.

Biomassa sudah cukup lama digunakan oleh masyarakat sebagai bahan bakar, namun masih dengan cara-cara tradisional seperti untuk kayu bakar. Energi yang dihasilkan telah digunakan untuk berbagai tujuan antara lain untuk kebutuhan rumah tangga (memasak dan industri rumah tangga), pengering hasil pertanian dan industri kayu, pembangkit listrik pada industri kayu dan gula (Syamsiro dan Saptoadi, 2007). Penggunaan yang lebih moderen dan dapat diaplikasikan ke berbagai sektor masih cukup sedikit dibandingkan dengan potensi yang ada. Dalam Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Koservasi Energi (Energi Hijau) Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral yang dimaksud energi biomasa meliputi kayu, limbah pertanian/perkebunan/hutan, komponen organik dari industri dan rumah tangga. Potensi beberapa jenis biomassa limbah pertanian seperti dari kelapa sawit, tebu, padi, dan jagung dapat dilihat pada Tabel 1.

Biomassa dapat dikonversi menjadi energi dengan berbagai metode proses. Faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan teknologi konversi anatara lain: tipe dan jumlah biomassa, bentuk energi yang diinginkan, kebutuhan pengguna, standar lingkungan dan kondisi ekonomi (McKendry, 2002). Konversi biomassa menjadi energi secara umum menggunakan dua teknologi proses yaitu termokimia dan biologi. Proses termokimia mempunyai tiga pilihan teknologi yaitu pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi.

Konversi biomassa menjadi bahan bakar dapat berbentuk padat, cair, maupun gas. Bahan bakar padat merupakan bentuk dasar biomassa yang dapat dijadikan umpan untuk pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi. Bahan bakar cair dapat dihasilkan dari proses pirolisis sedangkan bahan bakar gas dapat dihasilkan dari proses gasifikasi. Secara umum, biomassa mempunyai densitas dan nilai kalor yang rendah. Salah satu cara untuk meningkatkan densitasnya adalah dengan proses densifikasi. Sedangkan

untuk meningkatkan nilai kalornya, proses torrefaksi menjadi salah satu pilihan yang cukup baik. Kombinasi dari proses densifikasi dan torrefaksi akan menghasilkan bahan bakar padat biomassa kualitas tinggi. Makalah ini akan memberikan ulas balik teknologi densifikasi dan torrefaksi untuk peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa sehingga dapat menjadi setara dengan batubara.

2. Densifikasi Biomassa

Biomassa merupakan salah satu jenis bahan bakar padat selain batubara. Biomassa terdiri atas beberapa komponen yaitu kadar air (moisture content), zat terbang/mudah menguap (volatile matter), karbon terikat (fixed carbon), dan abu (ash). Proses pengeringan akan menghilangkan moisture, devolatilisasi yang merupakan tahapan pirolisis akan melepaskan volatile, pembakaran arang melepaskan karbon terikat dan sisa pembakaran menghasilkan abu (Borman dan Ragland, 1998). Parameter penting lainnya dalam biomassa adalah kandungan nilai kalornya. Besarnya nilai kalor sangat tergantung dari komposisi zat-zat di atas. Semakin tinggi kandungan karbon terikat maka nilai kalornya semakin tinggi. Nilai kalor beberapa jenis biomassa ditunjukkan Tabel 2.

Usaha peningkatan nilai kalor dilakukan diantaranya dengan densifikasi dan torrefaksi. Biomassa pada umumnya mempunyai densitas yang cukup rendah, sehingga akan mengalami kesulitan dalam penanganannya. Densifikasi atau pembriketan biomassa bertujuan untuk meningkatkan densitas dan menurunkan persoalan penanganan seperti penyimpanan dan pengangkutan. Secara umum pembriketan biomassa mempunyai beberapa keuntungan (Bhattacharya, 1996):

- Menaikkan nilai kalori per unit volume.
- Mudah disimpan dan diangkut.
- Mempunyai ukuran dan kualitas yang seragam.

Tahel 1 Potensi Reherana	Ienis Riomassa di Indon	esia Tahun 2013 (ESDM. 2015).

Jenis Biomassa	Ketersediaan Bahan Baku (ton)	Potensi Energi (GJ)	Potensi Umum (MWe)
Kelapa Sawit			
Serat (fiber)	12.830.950	180.778.665	1.231
Cangkang (shell)	6.136.541	108.861.141	759
Tandan kosong (EFB)	23.988.298	118.757.608	827
Pelepah			
Tebu			
Ampas tebu (bagasse)	9.559.395	73.470.505	582
Kelapa			
Sabut kelapa	1.119.301	15.464.755	119
Tempurung	383.760	13.262.898	59
Padi			
Sekam	13.016.712	180.592.857	1.432
Jerami	90.370.365	1.056.602.982	8.376
Jagung			
Tongkol	4.263.116	62.470.849	495
Batang dan daun	14.920.906	156.177.123	1.238

Tabel 2. Nilai kalor beberapa jenis biomassa

Biomassa	Nilai kalor (kJ/kg)	Referensi
Sekam padi	16.054	Kwong et al. (2004)
Jerami	17.999	Jamradloedluk et al.
		(2004)
Ampas tebu	17.619	Wahyudi (2002)
Tandan Kosong Sawit	15.900	Pratoto (2004)
Kayu (<i>dry</i>)	17.700	Bergman (2005)
Cangkang kakao	16.998	Syamsiro et al. (2011)

Ada beberapa metode yang digunakan untuk pembriketan biomassa. Metode yang paling popular untuk aplikasi skala kecil di negara berkembang adalah dengan menggunakan press ulir. Dengan metode ini dihasilkan briket yang lebih padat dan kuat. Ada dua tipe press ulir yaitu : press ulir konikal dan press ulir dengan pemanasan.

Biomassa mempunyai energi kira-kira 1/3 energi batubara per unit massa dan 1/4 energi batubara per unit volume. Pembriketan dapat mengubahnya menjadi masing-masing 2/3 dan 3/4 (Bungay, 1981). Secara umum teknologi pembriketan dapat dibagi menjadi tiga (Grover dan Mishra, 1996):

- Pembriketan tekanan tinggi.
- Pembriketan tekanan medium dengan pemanas.
- Pembriketan tekanan rendah dengan bahan pengikat (binder).

Beberapa jenis bahan dapat digunakan sebagai pengikat diantaranya amilum/tepung kanji, tetes, dan aspal.

Syamsiro et al. (2011, 2012) telah melakukan penelitian pembuatan pelet biomassa dari limbah cangkang kakao (Gambar 1). Hasil peletnya kemudian diuji karakteristik pembakarannya berdasarkan beberapa parameter yaitu laju aliran udara, komposisi pelet, temperatur dinding, temperatur udara, dan dimensi. Hasilnya menunjukkan bahwa parameter tersebut berpengaruh terhadap laju pembakaran dan emisi yang dihasilkannya.

Karakteristik pembriketan dievaluasi diantaranya dengan melihat durabilitas, kekuatan mekanis, dan perilaku relaksasi. El Saedy (2014) telah melakukan penelitian pembriketan *cotton stalks* yang hasilnya menunjukkan bahwa ada korelasi antara tekanan pembriketan dengan densitas dan *compressive strength*. Ukuran partikel hanya

sedikit berpengaruh terhadap densitas. Kandungan moisture optimal untuk pembriketan sekitar 10%.

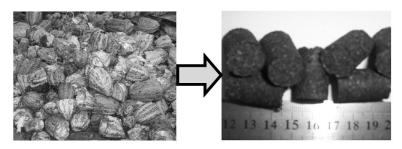
Chin dan Siddiqui (2000) telah meneliti perilaku relaksasi briket dari berbagai macam biomassa. Relaksasi sangat dipengaruhi oleh tekanan pembriketan. Semakin tinggi tekanan maka relaksasi akan semakin bertambah (Gambar 2). Hasil penelitian Bergman (2005) pada pembriketan kayu menunjukkan bahwa telah terjadi peningkatan nilai kalor dari 10,5 MJ/kg (as received) menjadi 16,2 MJ/kg.

Fasina (2007) meneliti sifat-sifat fisik briket dari peanut hull meliputi densitas dan durabilitas. Kelembaban relatif udara akan berpengaruh terhadap kandungan moisture briket. Kandungan moisture ini akan sangat berpengaruh terhadap densitas dan durabilitas briket. Terjadi penurunan secara linier densitas sebagai akibat kenaikan kandungan moisture. Olorunnisola (2007) meneliti produksi briket biomassa dari waste paper dan coconut husk. Hasilnya menunjukkan bahwa briket dengan 100% waste paper dan 5:95 waste paper-coconut husk memberikan ekspansi linier terbesar selama pengeringan. Durabilitas rata-rata briket adalah 95%.

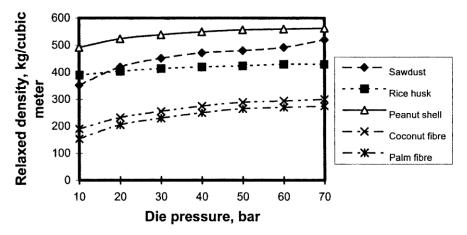
Pengaruh kelembaban relatif udara terhadap equilibrium moisture content (EMC) briket biomassa telah diteliti oleh Singh (2004) dibandingkan dengan cotton stalks dan saw mill waste. Hasilnya menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan EMC pada kelembaban relatif sampai dengan 70%. Pada kelembaban relatif yang lebih tinggi, EMC briket menjadi lebih rendah dibanding dengan cotton stalks dan saw mill waste. Berdasarkan studi juga diperoleh bahwa selama penyimpanan briket pada kelembaban tinggi tidak menimbulkan permasalahan.

Wilaipon et al. (2006) meneliti kekuatan mekanis briket biomassa dari kulit pisang awak (pisang-awak banana-peel) dengan pengikat dari molasses. Briket dibuat dengan tekanan 3-11 MPa. Hasilnya menunjukkan adanya peningkatan densitas briket seiring dengan kenaikan tekanan pembriketan.

Lela et al. (2016) telah meneliti karakteristik mekanik dan termal briket dari campuran limbah kardus dan serbuk gergaji. Hasil optimal berdasarkan analisis ANOVA dan regresi diperoleh pada kondisi tekanan kompresi 588,6 kN, massa serbuk gergaji 46,66% dan temperatur pengeringan 22°C. Kondisi ini memberikan nilai maksimum nilai kalor (higher heating value-HHV) sebesar 17,41 MJ/kg dan kandungan abu 6,62%.



Gambar 1. Densifikasi biomassa cangkang kakao (Syamsiro et al., 2012).

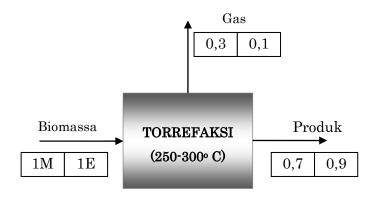


Gambar 2. Hubungan antara tekanan densifikasi dan relaksasi briket biomassa (Chin dan Siddiqui, 2000).

3. Torrefaksi

Usaha untuk meningkatkan nilai kalor biomassa agar bisa setara dengan batubara salah satunya adalah dengan proses karbonisasi temperatur rendah atau disebut dengan proses torrefaksi. Karbonisasi atau pengarangan sudah dikenal cukup luas untuk proses pembuatan arang. Sementara torrefaksi adalah suatu proses termokimia pada suhu 200-300°C tanpa adanya oksigen, pada tekanan atmosfer, dan laju pemanasan partikel yang rendah (<50 °C/min). Dengan metode ini maka diharapkan akan memperbaiki karakteristik bahan bakar seperti peningkatan nilai kalor, menurunkan kadar air, grindability, dan memperbaiki sifat higroskopik (Bergman et al., 2004).

Beberapa parameter mempengaruhi proses torrefaksi diantaranya yaitu temperatur, waktu, dan tipe biomassa. Selama proses torrefaksi, kadar air akan terlepas dan terjadi proses devolatilisasi terbatas. Dengan proses ini massa akan berubah menjadi 70% massa awal, kandungan energinya menjadi 90%, dan kadar air 1-2%. Sehingga secara keseluruhan akan meningkatkan nilai kalor per unit massa (Bergman, 2005).



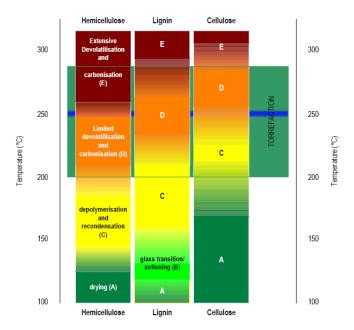
Gambar 3. Kesetimbangan massa dan energi proses torrefaksi (Bergman, 2005). (M: massa, E: energi)

Prinsip torrefaksi pertama kali dilaporkan tahun 1930an pada biomassa kayu untuk dijadikan bahan bakar gasifikasi. Beberapa tahun terakhir torrefaksi mendapat perhatian kembali, tetapi saat ini merupakan teknologi pretreatment untuk upgrading biomassa pada rantai produksi energi.

Gambar 3 menggambarkan kesetimbangan massa dan energi tipikal untuk proses torrefaksi. Secara umum, 70% massa akan menjadi produk padatan, sedangkan 30% massa akan dikonversi menjadi gas torrefaksi. Sementara itu, hanya 10% kandungan energi yang terbawa oleh gas torrefaksi, sehingga terjadi densifikasi energi sebesar 1,3 basis massa. Hal ini sangat berbeda dengan proses pirolisis konvensional yang hanya bisa mendapatkan 55-65% energi pada produk padatannya (Pentananunt et al., 1990).

Biomassa terdiri dari tiga struktur polimer yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang kemudian disebut lignoselulosa. Selama proses torrefaksi sejumlah reaksi terjadi dan mekanisme reaksi yang berbeda dapat diformulasikan. Semua mekanisme reaksi tersebut dapat dikelompokkan ke dalam beberapa rejim reaksi seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.

Di rejim A, proses pengeringan biomassa secara fisika terjadi. Ketika temperatur dinaikkan menuju rejim C, depolimerisasi akan terjadi dan polimer rantai pendek akan terkondensasi dalam struktur padatan. Ketika temperatur terus naik sampai ke rejim D, maka akan terjadi devolatilisasi dan karbonisasi terbatas. Ketika mencapai rejim E, maka terjadi devolatilisasi dan karbonisasi secara lebih intensif pada polimer. Biomassa perlu dilakukan pemanasan secara bertahap sebelum proses torrefaksi terjadi. Ada lima tahapan proses yang umum yaitu : pemanasan awal, pra-pengeringan, pasca-pengeringan, torrefaksi, dan tahap pendinginan padatan. Kenaikan nilai kalor beberapa jenis biomassa setelah proses torrefaksi dapat dilihat di Tabel 3.



Gambar 4. Fenomena fisika-kimia selama proses pemanasan material lignoselulosa pada saat torrefaksi (Bergman et al., 2005).

Pada proses densifikasi biomassa umumnya terdiri dari pengeringan dan pengecilan ukuran partikel. Dari kesamaan proses keduanya, maka kombinasi densifikasi dan torrefaksi menjadi alternatif yang cukup menjanjikan. Diagram proses keduanya dapat dilihat pada Gambar 5.

Hasil penelitian Bergman (2005) menunjukkan bahwa torrefaksi dapat menurunkan *grindability* yang ditunjukkan dengan penurunan konsumsi daya 70% sampai 90% selama proses penghancuran biomassa. Pada torrefaksi biomassa kayu diperoleh kandungan moisture hanya 3% dari sebelumnya 35%. Kombinasi pembriketan dan torrefaksi (*TOP pellets*) menghasilkan kandungan kadar air hanya 1%. Nilai kalor (LHV) meningkat dari 10,5 MJ/kg menjadi 21,6 MJ/kg.

Hasil yang sama diperoleh Prins et al. (2006) untuk tanaman *willow* dengan nilai kalor 20,7 MJ/kg (270°C, 15 menit) dan 17,7 MJ/kg dengan tanpa perlakuan. TOP pellets mempunyai kekuatan mekanis 1,5 sampai 2 kali dari briket biasa. TOP pellets memiliki bulk density 750 - 850 kg/m³ dan densitas volumetrik 14 – 18,5 GJ/m³. Bridgeman et al. (2008) telah meneliti karakteristik pembakaran biomassa tanpa dan dengan torrefaksi dengan *differential thermal analysis* (DTA). Hasilnya menunjukkan bahwa pembakaran *volatile* dan arang menjadi lebih eksotermik dibanding dengan tanpa torrefaksi. Pengujian pembakaran pada *willow* hasil torrefaksi menunjukkan penyalaan yang lebih cepat, walaupun pada pembakaran arang lebih lambat.

Biomassa mempunyai rasio O/C tinggi berdasarkan diagram van krevelen, dibandingkan dengan batubara. Bahan bakar dengan rasio O/C tinggi mempunyai *chemical*

exergy yang relatif tinggi sehingga akan menurunkan efisiensi gasifikasi, karena dengan rasio O/C tinggi terjadi oksidasi berlebih. Dengan proses torrefaksi akan menurunkan rasio O/C (Prins, 2005). Arias et al. (2007) meneliti pengaruh torrefaksi terhadap grindability dan reaktivitas biomassa (eucalyptus). Hasilnya menunjukkan bahwa torrefaksi dapat memperbaiki karakteristik grindability.

Saat ini para peneliti banyak mulai melakukan studi tentang torrefaksi basah yang merupakan istilah lain dari perlakuan hidrotermal (hydrothermal treatment) sebagai kelanjutan dari riset torrefaksi kering seperti yang sudah dijelaskan di atas (Zheng et al., 2015). Istilah torrefaksi kering dan basah baru muncul beberapa tahun terakhir untuk membedakan kedua proses tersebut.

Torrefaksi basah (*wet torrefaction*) adalah juga proses konversi temokimia pada temperatur 180-265 °C pada kondisi tekanan subkritis dan waktu tinggal yang lebih pendek. Proses ini menggunakan air pada kondisi subkritis, yang artinya air dijaga pada temperatur kurang dari 374°C dan tekanan kurang dari 22,1 MPa (Acharya et al., 2015). Torrefaksi basah seringkali juga disebut sebagai proses karbonisasi hidrotermal (*hydrothermal carbonization*-HTC) atau *hydrothermal torrefaction* (Bach dan Skreiberg, 2016).

Torrefaksi basah menghasilkan produk dengan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan torrefaksi kering. Kedua proses tersebut telah menurunkan kandungan oksigen di dalam produknya yang berarti menurunkan rasio O/C. Namun demikian, masih perlu beberapa waktu lagi untuk menuju komersialisasi teknologi torrefaksi basah. Hal ini berbeda dengan teknologi torrefaksi kering yang sudah pada tahapan skala percontohan dan komersial (Acharya et al., 2015).

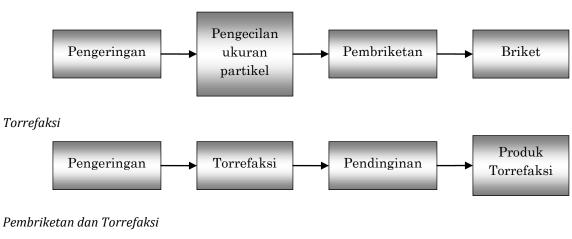


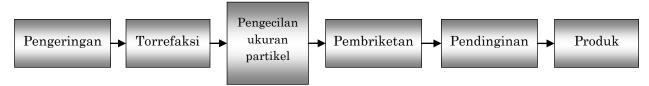
Gambar 5. Produk hasil kombinasi densifikasi dan torrefaksi (Kiel et al., 2009).

Tabel 3. Nilai kalor beberapa biomassa sebelum dan setelah proses torrefaksi (Chen et al., 2015).

Biomassa	T (°C)	t (min)	Fixed carbon (wt%)	HHV (MJ.kg ⁻¹)
Ampas tebu				
Raw			14,6	18,3
Torrefied	250	60	25,9	20,9
	300	60	42,2	23,4
Bambu				
Raw			17,8	18,2
Torrefied	220	60	22,5	19,3
	280	60	37,8	23,1
Sekam padi				
Raw			10,1	17,5
Torrefied	250	60	22,9	17,7
	300	60	42,2	21,5
Serbuk kayu			,	,
Raw			15,0	18,8
Torrefied	250	30	24,3	20,7
	290	30	36,5	22,4

Pembriketan





Gambar 5. Struktur proses pembriketan dan torrefaksi (Bergman, 2005)

4. Kesimpulan

Bahan bakar padat biomassa mempunyai densitas massa dan energi yang relatif rendah. Peningkatan kualitas biomassa untuk meningkatkan densitasnya perlu dilakukan diantaranya dengan proses densifikasi dan torrefaksi. Densifikasi bertujuan untuk meningkatkan densitas massa biomassa. Sedangkan torrefaksi digunakan meningkatkan densitas energi biomassa. Kombinasi densifikasi dan torrefaksi menjadi pilihan proses yang cukup atraktif untuk mendapatkan bahan bakar briket dan pellet kualitas tinggi. Analisis kelayakan ekonomi perlu dilakukan untuk hilirisasi riset torrefaksi menuju tahap komersial. Alternatif proses ataupun modifikasi proses yang sudah ada, seperti misalnya torrefaksi basah perlu untuk dikaji lebih mendalam untuk mendapatkan kondisi optimal proses.

Daftar Pustaka

Acharya, B., Dutta, A. dan Minaret, J. (2015) Review on Comparative Study of Dry and Wet Torrefaction, Sustainable Energy Technologies and Assessments 12, pp. 26-37.

- Arias, B., Pevida, C., Fermoso, J., Plaza, M.G., Rubiera, F., dan Pis, J.J. (2007) Influence of Torrefaction on The Grindability and Reactivity of Woody Biomass, Fuel Processing Technology 89, pp. 189-175.
- Bach, Q.-V. dan Skreiberg, O. (2016) *Upgrading Biomass Fuels via Wet Torrefaction: A Review and Comparison with Dry Torrefaction*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 54, pp. 665-677.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) (2014) Outlook Energi Indonesia 2014, Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi BPPT, Jakarta.
- Bergman, P.C.A (2005) *Combined Torrefaction and Pelletisation : The TOP process*, Energy Research Centre of the Netherland (ECN), www.ecn.nl/biomass.
- Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R. dan Kiel, J.H.A. (2005) *Torrefaction for Biomass Co-firing in Existing Coal-fired Power Stations*, Energy Research Centre of the Netherland (ECN), www.ecn.nl/biomass.
- Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., dan Kiel, J.H.A. (2004) *Torrefaction for Entrained-flow Gasification of Biomass*, The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May, Rome, Italy.
- Bhattacharya, S.C., Leon, M.A. dan Rahman, M.M. (1996) *A Study on Improved Biomass Briquetting*, Energy Program, SERD-AIT, Thailand.
- Borman, G.L., dan Ragland, K.W. (1998) *Combustion Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I. dan Williams, P.T. (2008) Torrefaction of Reed Canary Grass, Wheat Straw and Willow to Enhance Solid Fuel Qualities and Combustion Properties, Fuel 87, pp. 844-856.
- Bungay, H.R. (1981) *Energy : The Biomass Options*, John Wiley & Sons, New York.
- Chen, W.H., Peng, J., dan Bi, X.T. (2015) A State of the Art Review of Biomass Torrefaction, Densification and Applications, Renewable and Sustainable Energy Review 44, pp. 847-866.
- Chin, O.C., dan Siddiqui, K.M. (2000) Characteristics of Some Biomass Briquettes Prepared Under Modest Die Pressures, Biomass and Bioenergy 18, pp. 223-228.
- El Saedy (2004) *Technological Fundamental of Briquetting Cotton Stalks as a Biofuel*, Doctoral Dissertasion, Humboldt University, Berlin, Germany.
- Fasina, O.O. (2008) *Physical Properties of Peanut Hull Pellets*, Bioresource Technology 99 (5), pp. 1259-1266.
- Grover, P.D. dan Mishra, S.K. (1996) Biomass Briquetting: Technology and Practices, Field Document No. 46, FAO-Regional Wood Energy Development Program (RWEDP) In Asia, Bangkok.
- Jamradloedluk, J., Panomai, C., Tiangkratoke, A., dan Wiriyaumpaiwong, S. (2004) Physical Properties and Combustion Performance of Briquettes Produced from Two Pairs of Biomass Species, Mahasarakham University, Thailand.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) (2015) Indonesia 2050 Pathway Calculator: Panduan Pengguna untuk Sektor Pasokan Bioenergi, Kementerian ESDM, Jakarta.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) (2014a) Statistik Ketenagalistrikan 2014, Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM, Jakarta.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) (2014b) Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2014, Pusdatin ESDM, Jakarta.

- Kiel, J.H.A., Verhoeff, F., Gerhauser, H., Daalen, W.V. dan Meuleman, B. (2009) *BO-2 Technology for Biomass Upgrading into Solid Fuel-An Enabling Technology for IGCC and Gasification-based BtL*, 4th International Conference on Clean Coal Technologies, 18-21 May, Dresden.
- Kwong, P.C.W., Wang, J.H., Chao, C., Cheung, C.W., dan Kendall, G. (2004) Effect of Co-combustion of Coal and Rice Husk on Combustion Performance and Pollutant Emissions, The Seventh Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, December 15-17, Hongkong.
- Lela, B., Barisic, M. dan Nizetic, S. (2016) *Cardboard/Sawdust Briquettes as Biomass Fuel: Physical-Mechanical and Thermal Characteristics*, Waste Management 47, pp. 236-245.
- McKendry, P. (2002) Energy Production from Biomass (part2): Conversioan Technologies, Bioresource Technology 83, pp. 47-54.
- Olorunnisola, A. (2007) *Production of Fuel Briquettes from Waste Paper and Coconut Husk Admixture*, Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, manuscript EE 06 006, Vol. IX, Februari.
- Pentananunt, R., Rahman, A.N.M.M., dan Bhattacharya, S.C. (1990) *Upgrading of Biomass by means of Torrefaction*, Energy Vol. 15, No. 2, pp. 1175-1179.
- Pratoto, A. (2004) *A Study on the Emissions from Biomass Combustion*, Proceeding The International Workshop on Biomass & Clean Fossil Fuel Power Plant Technology, Jakarta.
- Prins, M.J., Ptasinski, K.J., dan Janssen, F.J.J.G. (2006) *Torrefaction of Wood: Part 2. Analysis of Products*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 77 pp. 35-40.
- Prins, M.J. (2005) *Thermodynamic Analysis of Biomass Gasification and Torrefaction*, The Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven: Eindhoven.
- Singh, R.N. (2004) *Equilibrium Moisture Content of Biomass Briquettes*, Biomass and Bioenergy 26, pp. 251-253.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Tambunan, B.H., dan Pambudi, A.N. (2012) *A Preliminary Study on Use of Cocoa Pod Husk as a Renewable Source of Energy in Indonesia*, Energy for Sustainable Development 16, pp. 74-77.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., dan Tambunan, B.H. (2011) Experimental Investigation on Combustion of Bio-Pellets from Indonesian Cocoa Pod Husk, Asian Journal of Applied Science 4 (7), pp. 712-719.
- Syamsiro, M. dan Saptoadi, H. (2007) *Pembakaran Briket Biomassa Cangkang Kakao : Pengaruh Temperatur Udara Preheat*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi: Teknologi untuk Kesejahteraan dan Peradaban Bangsa, 24 Nopember, Yogyakarta.
- Wahyudi (2002) *Laju Pembakaran Biobriket Dari Campuran Batubara dan Limbah Pertanian*, Tesis, Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta.
- Wilaipon, P., Trirattanasirichai, K., dan Tangchaichit, K. (2006) *The Mechanical-strength Investigation of Pisang-awak Banana-peel Briquettes*, Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006), 25-26 January, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand
- Zheng, A., Zhao, Z., Chang, S., Huang, Z., Zhao, K., Wei, G., He, F. dan Li, H. (2015) *Comparison of the Effect of Wet and Dry Torrefaction on Chemical Structure and Pyrolysis Behavior of Corncobs*, Bioresource Technology 176, pp. 15-22.