

## Experimental Study on Waste Biomass Torrefaction Using a Continuous Tubular Reactor

Amrul<sup>1,\*</sup>, Agus Apriyanto<sup>2</sup>, Ika Sanjaya<sup>3</sup> dan Amrizal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung – Bandar Lampung

<sup>2</sup> Prodi Magister Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung – Bandar Lampung

<sup>3</sup> Prodi S1 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung – Bandar Lampung

\*Corresponding author: amrul@eng.unila.ac.id

**Abstract.** National primary energy sources currently still rely on fossil fuels, namely petroleum, natural gas and coal. Meanwhile the government policy requires the use of alternative energy to get a bigger portion in the future. One of the new and renewable sources of energy with considerable potential is waste biomass. Waste processing technology that can produce high calorie solid fuels is through the torefaction process. Torefaction is a thermal treatment process of material at temperatures between 200-300°C at atmospheric pressure in absence of oxygen. Torefaction research on several waste components that have been carried out by the researcher team using batch reactors shows that the waste torefaction process can increase the quality of the combustion properties to the coal equivalent. In this study, the waste biomass samples used in the batch reactor that produced high-calorific value torefaction products were re-tested on a lab scale continuous tubular type reactor. The study of waste torefaction using continuous reactors was carried out to investigate the characteristics of solid fuel torefaction products on a larger scale, in preparation for industrial scale production. Tests are carried out with temperature variations of 225, 250, 275, 300 and 325°C. 1 kg biomass feed mass with a residence time of 30 minutes and a cooling time of 5 minutes. The results showed that the waste biomass torefaction process can produce solid fuels with the highest heating value of 5425 kcal/kg, equivalent to subbituminous B coal, which was obtained at an operational temperature of 275°C.

**Abstrak.** Sumber energi primer nasional saat ini masih bertumpu pada bahan bakar fosil, yakni minyak bumi, gas alam dan batu bara. Sementara itu kebijakan pemerintah menuntut penggunaan energi alternatif mendapat porsi yang lebih besar di masa depan. Salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang potensinya cukup besar adalah biomassa sampah. Teknologi pengolahan sampah yang dapat menghasilkan bahan bakar padat berkalori tinggi adalah melalui proses torefaksi. Torefaksi merupakan proses perlakuan panas material pada temperatur antara 200-300°C pada tekanan atmosfer tanpa oksigen. Penelitian torefaksi terhadap beberapa komponen sampah yang telah dilakukan oleh tim pengusul menggunakan reaktor batch menunjukkan bahwa proses torefaksi sampah dapat menaikkan kualitas sifat-sifat pembakarannya hingga setara batubara. Dalam penelitian ini, sampel biomassa sampah yang digunakan pada pegujian reaktor batch yang menghasilkan produk torefaksi bernilai kalor tinggi diuji kembali pada reaktor kontinu tipe tubular skala lab. Penelitian torefaksi sampah menggunakan reaktor kontinu dilakukan untuk menginvestigasi karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi dalam skala yang lebih besar, sebagai persiapan produksi skal industri. Pengujian dilakukan dengan variasi temperatur 225, 250, 275, 300 dan 325°C. Massa umpan biomassa 1 kg dengan waktu tinggal 30 menit dan waktu pendinginan 5 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses torefaksi biomassa sampah dapat menghasilkan bahan bakar padat dengan nilai kalor tertinggi sebesar 5425 kcal/kg, setara dengan batubara subbituminus B, yang diperoleh pada temperatur operasional 275°C.

**Keywords:** Sampah biomassa, torefaksi, reaktor kontinu, bahan bakar padat, nilai kalor

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

### Pendahuluan

Kebijakan energi Indonesia yang tertuang dalam Laporan Dewan Energi Nasional 2014 menargetkan kontribusi minyak bumi terhadap bauran energi nasional pada tahun 2025 adalah sebesar 25%, sedangkan untuk gas bumi adalah sebesar 22%, dan batubara sebesar 30%, dan total Energi baru dan

Terbarukan (EbT) sebesar 23%. Sedangkan untuk tahun 2050, persentase kontribusi masing-masing jenis energi adalah minyak bumi sebesar 20%, gas bumi sebesar 24%, batubara sebesar 25%, dan total EbT sebesar 31%. Dari total penggunaan EbT, kontribusi sumber energi yang berasal dari biomassa sampah ditetapkan sebesar 5,1% pada tahun 2025

dan 6,4% tahun 2050. Dengan kata lain, penggunaan biomassa sampah sebagai sumber energi terbarukan yang di tahun 2015 baru sebesar 2,0% meningkat 2,6 kali lipat pada tahun 2025 dan 3,2 kali lipat pada tahun 2050 [1].

Sampah biomassa mengandung material yang berpotensi diolah menjadi sumber energi yang tersimpan dalam bentuk ikatan kimia antara karbon, hidrogen dan oksigen. Jika ikatan kimia itu dirusak, bahan organik akan melepas energi kimia dalam fase gas, cair dan padat. Namun di dalam aplikasinya, penggunaan sampah secara langsung sebagai bahan bakar masih banyak memiliki kendala, di antaranya nilai kalor dan densitas energi yang rendah, kandungan air yang tinggi dan komponen yang heterogen serta sifatnya higroskopiknya. Selain itu sampah biomassa juga memiliki potensi sumber penyakit dan bau yang busuk. Akan tetapi apabila dalam pengolahan sampah digunakan metode yang tepat maka dapat diperoleh bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil.

Salah satu teknologi pengolahan sampah yang dapat menghasilkan bahan bakar dengan kualitas setara batubara adalah proses torefaksi. Torefaksi merupakan proses pirolisis ringan pada temperatur 200-300°C pada tekanan atmosfer tanpa oksigen. Keunggulan torefaksi adalah proses yang berlangsung pada temperatur dan tekanan yang relatif rendah serta efisiensi konversi energi yang cukup tinggi yaitu sekitar 90% [2]. Keunggulan lain dari torefaksi biomassa adalah menghasilkan produk yang lebih rapuh [2], memiliki densitas energi yang lebih tinggi dan bersifat hidrofobik [3] dan lebih tahan terhadap serangan jamur [4] dibandingkan dengan biomassa mentah, sehingga lebih mudah dalam transportasi, penanganan, dan penyimpanan.

Penelitian torefaksi sebelumnya yang dilakukan oleh penulis dan tim terhadap sampah kota menggunakan reaktor *batch* skala lab berhasil mendapatkan arang yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat dengan kualitas setara batubara sub-bituminous B yang memiliki nilai kalor (HHV) 5300-5800 kcal/kg [5]. Dalam penelitian ini, karakteristik bahan bakar padat yang diperoleh dari hasil pengujian reaktor *batch* akan dievaluasi kembali pada jenis reaktor kontinu tipe tubular dengan sampel yang sama dan parameter torefaksi optimal yang diperoleh sebelumnya. Karakteristik produk torefaksi yang akan dievaluasi dalam penelitian ini adalah nilai kalor, hasil pengujian proksimat dan ultimat, serta perolehan massa dan energi (*mass and energy yield*).

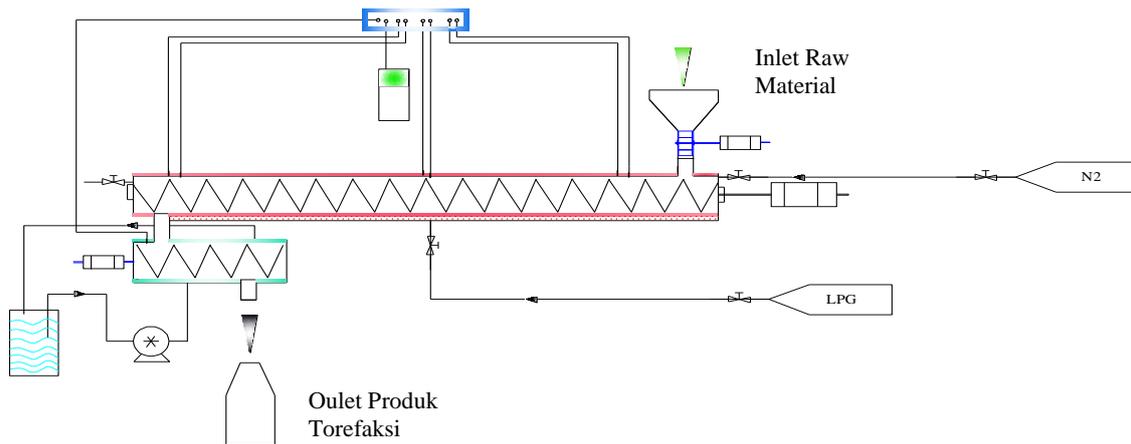
## Metode Penelitian

**Persiapan Sampel.** Komponen sampah biomassa yang dipilih sebagai sampel adalah daun, ranting, nasi, kulit jeruk dan kulit pisang. Daun mewakili komponen sampah yang berasal dari kelompok daun-daunan termasuk sisa makanan dari jenis sayur-sayuran. Ranting pohon mewakili komponen sampah yang mengandung sifat kayu-kayuan. Nasi mewakili sisa makanan yang berasal dari komponen makanan pokok. Sementara kulit pisang dan kulit jeruk mewakili komponen sampah dari kulit buah-buahan yang banyak dikonsumsi masyarakat. Empat dari lima komponen sampah kota yang ditetapkan sebagai sampel tersebut merupakan material lignoselulosa yang terdiri atas tiga komponen utama yaitu hemiselulosa, selulosa dan lignin, diantaranya adalah daun, ranting, kulit jeruk dan kulit pisang. Sedangkan nasi, meskipun termasuk polisakarida, ia tidak mengandung lignoselulosa. Untuk itu, parameter eksperimen khususnya temperatur didasarkan pada komposisi lignoselulosa yang dimiliki komponen sampah kota.

Model komposisi sampah yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan komposisi sampah untuk kawasan umum, yang biasanya mengandung sedikit sisa makanan (nasi, kulit jeruk, kulit pisang) dan didominasi oleh daun-daun yang berserakan akibat ruang terbuka hijau dari tata kota. Komposisi sampah untuk eksperimen torefaksi sampah campuran ditentukan : nasi sebesar 19%, dari total fraksi massa, kulit jeruk 10,5%, kulit pisang 10,5 %, daun 46% dan ranting 14%. Perumusan temperatur optimal torefaksi sampah simultan didasarkan pada metode pendekatan berupa hasil eksperimen.

**Peralatan dan Prosedur Eksperimen.** Peralatan eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor torefaksi kontinu tipe tubular skala lab dengan sistem pemanas selimut oli (*oil jacket heating system*). Reaktor kontinu tipe tubular berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material yang ada di dalam reaktor dengan sistem *screw conveyor*. Gambar skema instalasi reaktor ditunjukkan oleh Gambar 1.

Sampah biomassa dimasukan melalui *silo feeder*, melewati *rotary valve*, selanjutnya masuk kedalam tabung reaktor yang telah dipanaskan menggunakan oli pemanas (*oil heat transfer*). Material dalam reaktor mengalami proses pemanasan awal pada temperatur (~100°C), dilanjutkan dengan tahap pengeringan pada temperatur (~120°C), setelah itu mengalami pemanasan lanjut (~200°C), sampai dengan temperatur torefaksi maksimum (300°C).



**Gambar 1.** Instalasi sistem torefaksi kontinu

Temperatur maksimum di ruang reaktor dijaga pada temperatur operasional yang diinginkan melalui pengaturan laju aliran bahan bakar dengan waktu tinggal konstan selama 30 menit. Sampah hasil torefaksi selanjutnya mengalami pendinginan dalam tabung *cooling char* melalui *secondary transport screw* dibantu dengan media air pendingin. Setelah pendinginan sampah torefaksi keluar dan ditampung dalam drum penampungan. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan temperatur reaktor yakni 225, 250, 275, 300 dan 325°C. Massa umpan biomassa 1 kg dengan waktu tinggal 30 menit dan waktu pendinginan 5 menit.

Sifat-sifat bahan bakar produk torefaksi ditentukan melalui pengujian nilai kalor, serta analisis proksimat dan ultimat. Pengujian nilai kalor dan analisis proksimat dilakukan di Laboratorium Penguji dan Kalibrasi Balai Riset dan Standardisasi Industri Bandar Lampung. Analisis proksimat menggunakan standar ASTM D 1762-84. Sedangkan analisis ultimat dilakukan di Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara (TEKMIRA) Bandung.

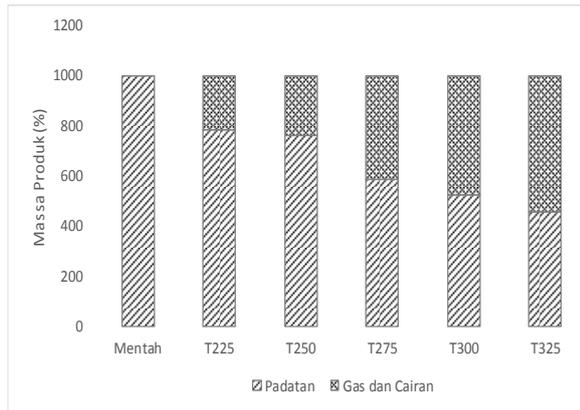
### Hasil dan Pembahasan

Pengujian sampel dilakukan pada kondisi kering. Perubahan struktur kimia komponen sampah biomassa akibat dekomposisi termal selama proses torefaksi menghasilkan produk dengan sifat-sifat yang baru. Hasil analisa karakteristik produk torefaksi pada temperatur 225°C, 250°C, 275°C, 300°C, 325°C dan waktu tinggal selama 30 menit, dapat dilihat pada Tabel 1.

**Penurunan massa padatan.** Hasil pengujian torefaksi menunjukkan prediksi perubahan hasil produk dengan berubahnya temperatur torefaksi selama waktu tinggal 30 menit. Dengan kondisi parameter proses yang divariasikan dalam penelitian ini, kenaikan temperatur reaktor menurunkan hasil produk padatan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2. Efek tersebut konsisten dengan teori bahwa meningkatnya temperatur proses torefaksi akan menyebabkan devolatilisasi produk padatan yang lebih ekstensif dan dengan demikian menghasilkan produk padatan yang rendah. Laju aliran nitrogen dalam muatan sampah biomassa pada reaktor tidak memiliki dampak signifikan terhadap hasil produk sehingga pengaruhnya dapat diabaikan.

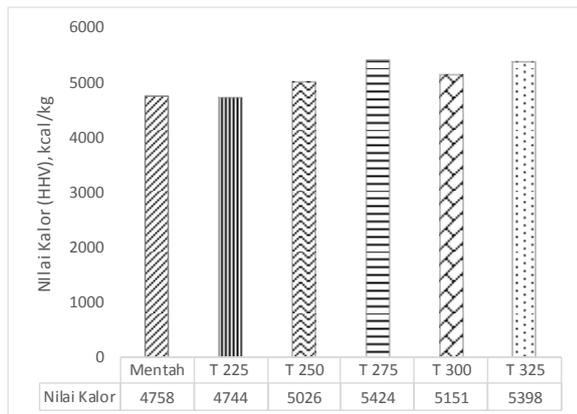
**Tabel 1.** Nilai kalor dan hasil analisis proksimat dan ultimat produk torefaksi sampah bomassa.

Temperatur (°C)	HHV (kcal/kg)	Analisis Proksimat (db) (%)				Analisis Ultimat (adb) (%)					O/C	H/C
		Volatile Matter	Fixed Carbon	Abu	Moisture Content	C	H	N	S	O		
non torefaksi	4758	74,00	21,05	4,95	8,46	42,60	6,31	1,67	0,16	44,78	1,05	0,14
T225	4744	72,99	20,80	6,21	2,95	46,87	6,06	1,59	0,12	39,59	0,84	0,13
T250	5026	71,81	22,34	5,85	3,19	49,34	6,10	1,49	0,10	37,31	0,75	0,12
T275	5424	59,98	32,60	7,42	4,07	53,26	5,63	1,75	0,09	32,04	0,60	0,10
T300	5151	59,05	31,63	9,32	7,52	49,21	5,46	1,52	0,08	35,35	0,71	0,11
T325	5398	40,13	47,99	11,88	5,12	54,94	4,43	2,01	0,07	27,00	0,49	0,08



**Gambar 2.** Massa relatif produk torefaksi.

**Nilai kalor produk.** Hasil uji nilai kalor produk torefaksi komponen sampah campuran bervariasi antara 4747 kcal/kg sampai dengan 5425 kcal/kg. Nilai kalor yang diukur adalah untuk masing-masing variasi temperatur proses dengan waktu tinggal 30 menit. Gambar 3 menunjukkan hasil pengujian terlihat bahwa produk torefaksi sampah biomassa campuran menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan sampah mentah.



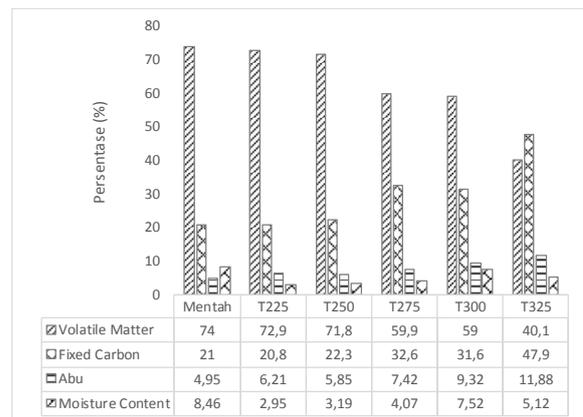
**Gambar 3.** Nilai kalor produk torefaksi.

Nilai kalor tertinggi terjadi pada temperatur proses 275°C yakni sebesar 5425 kcal/kg, namun pada temperature 300°C dan 325°C hasil pengujian menunjukkan nilai kalor yang lebih rendah. Nilai kalor hasil torefaksi secara umum sesuai dengan teori yang ada. Hemiselulosa sampah terdekomposisi dalam jumlah yang besar pada temperatur torefaksi 225°C hingga 275°C. Hal ini dapat diindikasikan dengan melihat selisih nilai kalor yang besar dari kedua temperatur tersebut.

Namun demikian terjadi penyimpangan pada produk torefaksi temperature 300°C dan 325°C. Pada temperatur tersebut, terjadi penurunan nilai kalor pembakaran produk torefaksi. Padahal secara teori bahwa pada temperatur tersebut dimulainya

dekomposisi selulosa. Kondisi ini kemungkinan disebabkan karena sampel yang digunakan mengandung air yang terbentuk akibat produk hasil torefaksi dilakukan pendinginan terlebih dahulu di ruang cooling char sebelum produk keluar melalui saluran keluar reaktor, di ruang pendinginan tersebut terjadi proses kondensasi akibat uap panas dari produk torefaksi didinginkan secara paksa menggunakan aliran air pendingin yang bersirkulasi di ruang cooling char yang membuat uap panas produk torefaksi berubah fasa menjadi cair yang bersenyawa dengan produk padatan hasil torefaksi, sehingga kondisi tersebut dimungkinkan membuat nilai kalor pada temperatur 300°C dan 325°C menurun, mengingat temperatur uap panas tersebut merupakan yang tertinggi diantara temperatur proses yang lain.

**Analisis proksimat.** Hasil uji proksimat pada basis kering dengan metode pengujian ASTM D 1762-84 terhadap komponen sampah biomassa campuran menunjukkan bahwa kandungan komponen sampah didominasi oleh volatile matter (VM) dan Fixed Carbon (FC), seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.



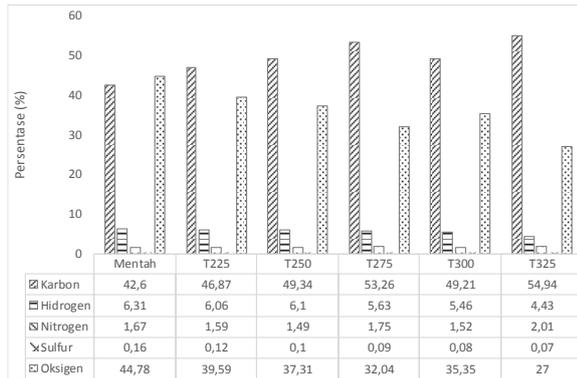
**Gambar 4.** Komposisi proksimat produk torefaksi.

Komponen VM berpengaruh terhadap nilai kalor hasil pembakaran, namun tidak sebesar nilai kalor yang dihasilkan oleh FC. Semakin tinggi kandungan FC semakin meningkatkan nilai kalor bahan bakar. Kandungan FC tertinggi pada temperatur 325°C yakni sebesar 47,99% dan terendah pada sampel mentah sebesar 21,05%. Sedangkan fraksi massa zat volatile menurun dari 47,00% menjadi 40,13%. Kandungan air yang dimiliki komponen sampah hasil torefaksi cukup rendah yakni kurang dari 8%. Sementara hubungan yang kuat juga terlihat antara FC yang diukur dalam produk padatan dan hasil massa produk padat (*mass yield*) yang dicapai selama pengujian torefaksi.

Pengujian sampel dengan temperature proses torefaksi yang tinggi menyebabkan kandungan

tinggi FC yang tinggi sebanding dengan kehilangan massa dan energi, namun menghasilkan densitas energi yang tinggi sehingga berpengaruh terhadap nilai kalor bahan bakar padat hasil torefaksi.

**Analisis ultimat.** Pengujian sampel dengan temperature proses torefaksi yang tinggi menyebabkan kandungan tinggi FC yang tinggi sebanding dengan kehilangan massa dan energi, namun menghasilkan densitas energi yang tinggi sehingga berpengaruh terhadap nilai kalor bahan bakar padat hasil torefaksi.



Gambar 5. Komposisi ultimat produk torefaksi.

Hasil uji ultimat pada basis kering menunjukkan bahwa konsentrasi atom berturut-turut adalah C > O > H > N > S. Kandungan kimia produk torefaksi dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengaruh kondisi operasi temperature torefaksi terhadap kandungan atom dari sampah campuran biomassa sangat jelas terlihat. Sebagai contoh untuk kandungan carbon semakin tinggi temperatur sisa atom carbon semakin besar. Sampah mentah memiliki kandungan carbon sebesar 42.6% , setelah dilakukan proses torefaksi naik hingga komposisinya mencapai 54.94% seiring dengan naiknya temperature proses. Sebaliknya kandungan oksigen yang tersimpan pada sampah mentah sebesar 44.78% setelah dilakukan proses torefaksi diperoleh residu oksigen turun hingga 27 %. Seperi halnya dengan penurunan kandungan hidrogen dan sulfur.

Kandungan unsur carbon sebanding dengan Nilai Kalor. Unsur C terdapat dalam fixed carbon dan volatile matter, sementara unsur H dan O berasal dari kandungan hidrokarbon dan air yang terdapat dalam produk torefaksi

**Perolehan massa dan energi.** Peningkatan kualitas sifat-sifat pembakaran sampah dapat dilihat dari jumlah perolehan massa,  $y_m$  (mass yield) dan perolehan energy,  $y_e$  (energy yield). Perolehan massa dihitung dengan Pers. 1 dan perolehan energy dihitung dengan Pers. 2.

$$y_m = \frac{m_{padatan}}{m_{umpan}} \times 100\% \quad (1)$$

$$y_e = y_m \frac{HHV_{padatan}}{HHV_{umpan}} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

$m_{padatan}$  = massa produk torefaksi (g)

$m_{umpan}$  = massa sampah umpan (g)

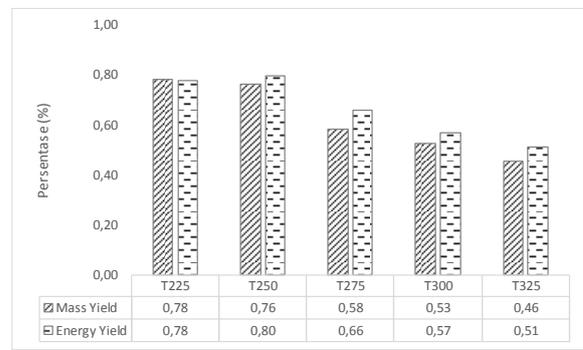
$HHV_{padatan}$  = nilai kalor produk torefaksi (kcal/kg)

$HHV_{umpan}$  = nilai kalor sampah umpan (kcal/kg)

$y_m$  = perolehan massa (mass yield)

$y_e$  = perolehan energi (energy yield)

Hasil perolehan massa dan energi untuk torefaksi sampah kondisi kering dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5. Perolehan massa dan energi produk torefaksi.

Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa kandungan energi yang tersimpan dalam produk torefaksi masih tersisa sekitar 52% sampai 81% dan perolehan massanya sebesar 46% sampai 78%. Semakin tinggi temperatur proses torefaksi perolehan massa produk torefaksi semakin kecil. Ketika temperatur proses meningkat dari 225°C sampai 325°C perolehan massa menurun secara drastis mencapai 30% fraksi massa. Penyebab utama penurunan massa ini adalah terdekomposisinya fraksi hemiselulosa. Hal ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa telah terjadi reaksi eksotermik pada temperatur 225° C sampai 325 °C [6] sehingga unsur kelembaban dan senyawa organik telah hilang dari biomassa, hemiselulosa dan sebagian selulosa mulai terdekomposisi. Dekomposisi hemiselulosa melepaskan uap air, gas CO dan CO2 serta berbagai jenis zat terbang yang memiliki nilai kalor rendah. Namun demikian, meskipun selama proses torefaksi kandungan sampah produk torefaksi kehilangan massa cukup besar, namun kandungan energinya tidak banyak berkurang.

## Kesimpulan

Pengujian torefaksi sampah biomassa yang dilakukan pada reaktor kontinu tipe tubular dengan beberapa variasi temperatur dan waktu tinggal konstan selama 30 menit menghasilkan padatan arang yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat. Produk torefaksi dengan nilai kalor tertinggi sebesar 5425 kcal/kg, setara dengan batubara subbituminus B, diperoleh pada temperatur operasional 275°C.

## Penghargaan

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada DRPM Kemenristekdikti yang telah mendanai penelitian ini melalui hibah Penelitian Strategis Nasional Institusi tahun 2018 dan kepada LPPM Unila yang telah memfasilitasi penelitian ini.

## Referensi

- [1] Dewan Energi Nasional, 2014. Laporan Dewan Energi Nasional 2014.
- [2] Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., dan Jacob, H.A. (2004): *Torrefaction For Entrained-Flow Gasification of Biomass*, Energy Research Center of Netherlands (ECN), Unit ECN Biomass, Eindhoven.
- [3] M. Hakkou, M. Petrissans, A. Zoulalian, P. Gerardin, Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis, *Polym. Degrad. Stab.* 89 (2005) 1–5.
- [4] M. Hakkou, M. Petrissans, P. Gerardin, A. Zoulalian, Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood, *Polym. Degrad. Stab.* 91 (2006) 393–397.
- [5] Amrul, T. Hardianto, A. Suwono, A.D. Pasek, dan Adrian R.I, (2013): *Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi: Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya*, Proceedings Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM-XII), 2013, Bandar Lampung, 23-24 Oktober 2013, ISBN: 978-979-8510-61-8.
- [6] Basu, P., 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, Second Edition, Elsevier Oxford, UK.