

TOREFAKSI KONTINU *MUNICIPALE SOLID WASTE* (MSW) PADA *SCREW CONVEYOR* REAKTOR DENGAN SISTEM PEMANAS *HEAT TRANSFER OIL*

Agus Apriyanto

Fakultas Teknik Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai
agus.apriyanto89@gmail.com

Abstrak. Teknologi konversi sampah kota menjadi bahan bakar yang saat ini sedang dikembangkan adalah melalui proses torefaksi. Salah satu jenis reaktor kontinu yang sedang dikembangkan untuk torefaksi sampah adalah tipe tubular. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat unit reaktor torefaksi kontinu tipe tubular yang mampu meningkatkan kualitas sifat-sifat sampah sebagai bahan bakar padat, terutama nilai kalornya. Eksperimen menggunakan sampel *Municipal Solid Waste* (MSW) yang terdiri dari campuran sampah rumah tangga, sampah komersial dan sampah di areal umum perkotaan. Pengolahan MSW memang menjadi isu terkini dalam pengembangan sumber energi berkelanjutan di Indonesia. Paradigma umum yang masih menjadi andalan dalam penyelesaian masalah sampah ini adalah melalui pemusnahan dengan *landfilling* di TPA yang berdampak serius terhadap kesehatan dan lingkungan. Oleh karena itu upaya yang signifikan telah dilakukan untuk memanfaatkan MSW sebagai sumber energi baru dan terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh temperature torefaksi mulai dari 225°C-325°C dengan waktu tinggal selama 30 menit menggunakan reaktor kontinu tipe *screw conveyor*. Karakteristik bahan bakar padat hasil torefaksi mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dari bahan mentah sebelum ditorefaksi yakni sebesar 5424,60 kcal/kg setara dengan batubara subbituminus B yang berlangsung pada temperatur 275°C, dan terbukti bahwa kandungan fixed carbon (FC) yang semakin tinggi dan turunnya rasio atom O/C akan meningkatkan nilai kalor produk torefaksi. Ini menunjukkan bahwa proses torefaksi kontinu efektif untuk digunakan sebagai model pengembangan sistem torefaksi skala besar.

Kata kunci: *Analisis Ultimate, Municipale Solid Waste, Proximate, Nilai Kalor, Torefaksi Kontinu.*

I. PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi dan peningkatan timbunan sampah merupakan dua permasalahan yang sering muncul seiring dengan peningkatan populasi penduduk dan tingkat ekonomi. Sesuai data tahun 2015, tercatat konsumsi energi di Indonesia meningkat dengan laju peningkatan rata-rata pertahun 3,99% dari 555,88 juta SBM (Standar Biaya Masukan) ditahun 2000 menjadi 961,39 juta ditahun 2014. Sementara sumber energi saat ini masih bergantung pada energi primer pada bahan bakar fosil yang masih terbatas dan tidak bisa diperbaharui menimbulkan kekhawatiran akan krisis energi dimasa yang akan datang jika tidak ditemukan sumber energi yang baru.

Dari kenyataan tersebut maka diperlukan usaha yang intensif untuk mencari sumber energi baru yang bersifat terbarukan. Potensi sumber energi baru dan terbarukan yang belum dimanfaatkan secara optimal adalah sampah padat perkotaan atau *Municipale Solid Waste* (MSW). Perkiraan total produksi sampah kota di Indonesia adalah 45,5 juta ton pertahun yang umumnya mencakup sampah rumah tangga, sampah komersial, industri dan sampah diarea umum lainnya. Pengolahan MSW memang menjadi isu terkini dalam pengembangan sumber energi berkelanjutan di Indonesia. Paradigma umum yang masih menjadi andalan dalam penyelesaian masalah sampah ini adalah melalui pemusnahan dengan *landfilling* dan insinerasi di TPA yang berdampak serius terhadap kesehatan dan lingkungan.

Salah satu metode untuk mengatasi permasalahan sampah, saat ini telah dikembangkan proses termal teknologi melalui torefaksi. Torefaksi adalah metode perlakuan panas untuk meningkatkan biomassa mentah menjadi bahan bakar yang disempurnakan dengan sifat yang lebih baik seperti nilai kalor yang tinggi dan kandungan karbon [3]. Torefaksi biasanya dilakukan dalam temperature 200°C- 300°C untuk waktu tinggal selama 30-60 menit dalam lingkungan *inert* pada tekanan atmosfer. Sebagai akibat dari torefaksi, biomassa menunjukkan perilaku rapuh dan penurunan kekuatan mekanik sehingga menghilangkan masalah *grindability* miskin biomassa mentah. Selain itu, torefaksi meningkatkan hasil energi biomassa produk torefaksi karena peningkatan kandungan karbon. Karena sifat-sifat yang ditingkatkan ini, nilai dalam hal kandungan karbon dan nilai kalor dari biomassa yang dikeringkan sebagai bahan bakar secara signifikan lebih tinggi daripada biomassa mentah.

Penelitian tentang torefaksi bukanlah ide baru dalam dunia teknologi *thermochemical*. Dalam proses torefaksi, jenis reaktor sangat berpengaruh terhadap ketelitian pengaturan proses dan keseragaman yang baik serta menghasilkan produk dengan kualitas tinggi. Secara umum banyak karya ilmiah yang terdapat dalam literature menggunakan torefaksi dalam proses *batch*. Padahal dalam aplikasi dunia industri, torefaksi kontinu lebih menguntungkan digunakan untuk memproduksi bahan bakar padat karena pertimbangan kesinambungan antara massa material yang masuk dengan laju panasnya.. Maka dari dasar inilah perlu dikembangkan torefaksi kontinu termasuk jenis reaktornya.

Salah satu temuan dari penelitian ini adalah rancangan sebuah reaktor tipe *screw conveyor* yang merupakan jenis reactor kontinu. Reaktor ini berbentuk tabung dengan dua dinding tetap dan yang

bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut dengan sistem *screw conveyor*. Reaktor dirancang menggunakan pemanas oli jenis *heat transfer oil* tipe *Calflo™ AF* yang ditempatkan antara dinding luar tabung reaktor dan dinding dalam. *Heat transfer oil* dipanaskan dengan nyala api burner, kemudian panas yang dihasilkan diteruskan pada dinding dalam reaktor dan dikontrol sampai dengan variasi temperatur proses torefaksi yang telah ditentukan. Keuntungan dari reaktor ini meliputi reaktor berjalan secara kontinu, penyaluran panasnya lebih cepat dan merata dibandingkan dengan menggunakan pemanas elektrik atau minyak pelumas biasa dan permukaan perpindahan panas yang lebih besar.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan eksperimen torefaksi MSW pada variasi suhu antara 225°C-325°C menggunakan reaktor kontinu tipe *screw conveyor* reaktor pada tekanan atmosfer selama 30 menit.. Analisis akhir berupa analisis proksimat, ultimate dan nilai kalor (HHV) juga diukur dan dibandingkan antara MSW mentah dan hasil torefaksi. Pengaruh suhu torefaksi yang berbeda pada hasil massa dan hasil energi juga diteliti.

II. MATERIAL DAN METODE

Material

Dalam penelitian ini, sampel MSW yang digunakan terdiri dari campuran daun, ranting, nasi, kulit jeruk dan kulit pisang. Penentuan sampel biomassa diperoleh dengan cara mensimulasikan komposisi komponen yang lazim untuk sampah perkotaan terutama di kawasan umum. Pada kawasan umum biasanya mengandung sedikit sampah sisa makanan yang terdiri dari nasi, kulit jeruk dan kulit pisang dan didominasi oleh daun-daun yang berserakan

akibat pohon-pohon yang ada di ruang terbuka hijau (RTH) tata kota.

Kandungan lignoselulosa sampel mentah masing-masing diuji terlebih dahulu dan hasilnya adalah kulit pisang memiliki komposisi 10,03% hemiselulosa, 34,32% selulosa dan 24,32% lignin. Kulit jeruk memiliki komposisi 19,53% hemiselulosa, 45,32% selulosa dan 14,16% lignin. Daun memiliki komposisi 10,15% hemiselulosa, 29,33% selulosa dan 35,14% lignin. Ranting memiliki komposisi 14,54% hemiselulosa, 51,59% selulosa dan 39,66% lignin.

Standar SNI 14-1304- 1989 untuk uji hemiselulosa, SNI 0492-2008 untuk lignin dan *in house method* untuk total selulosa. Sampel campuran MSW mentah dicacah dengan ukuran partikel seragam ± 1 cm kemudian dikeringkan dengan kadar air kurang dari 10 % kemudian dipindahkan ke dalam wadah kedap udara sampai eksperimen torrefaksi dilakukan.

Eksperimen Torrefaksi

Percobaan torrefaksi dilakukan menggunakan reaktor tubular horizontal tipe *screw conveyor* dengan panjang 1600 mm, diameter tabung dalam 203.2, diameter tabung luar 254 mm, menggunakan burner LPG. Pengujian ini dilakukan pada temperatur proses 225°C, 250°C, 275°C, 300°C, 325°C, waktu tinggal ± 30 menit dengan massa sample umpan adalah 1 Kg. Parameter yang diukur meliputi waktu pengujian, bukaan *control valve* LPG, temperatur reaktor dan temperatur oli pemanas pada ketiga titik *thermocouple* yang dipasang pada posisi masuk material (*Inlet*), posisi bagian tengah tabung reaktor (*Centre*) dan posisi keluar material (*Outlet*).

Mekanisme pengujian sebagai berikut mulanya reaktor dilakukan pemanasan awal (*initial heating*) sampai mencapai kondisi *steady state* sesuai pada temperatur proses

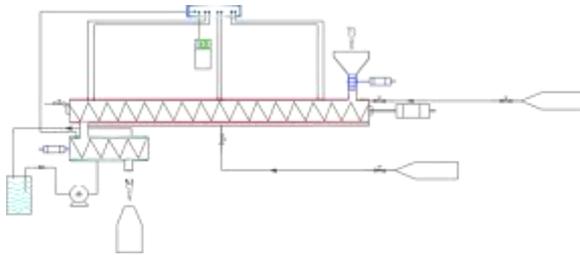
yang ditentukan, kemudian sampah umpan 1 kg dimasukan melalui *feeding hooper* secara perlahan, sekaligus membuka katup nitrogen yang berfungsi membatasi oksigen didalam reaktor yang dapat menyebabkan reaksi dengan senyawa gas *methane* yang dikhawatirkan dapat menyebabkan ledakan. Material sampah dibawa melalui *screw conveyor* selama durasi 30 menit, kemudian sampah akan keluar dari dalam reaktor tersebut dan masuk kedalam tabung *cooling char* untuk didinginkan selama 10 menit, dan kemudian material sampah akan keluar melalui *exhaust line* berupa arang.

Arang kemudian ditimbang dan dipindahkan ke wadah kedap udara. Percobaan dilakukan selama 3 kali dan rata-rata percobaan disajikan dalam penelitian ini. Analisis untuk biomassa mentah dan hasil torrefaksi meliputi analisis ultimate, proximate dan nilai kalor. Analisis proximate dilakukan dengan standar ASTM D1762-84, dan untuk nilai kalor diukur dengan menggunakan *boom calorimeter* dengan standard ASTM D388.

Analisis proximate dilakukan untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat seperti kandungan karbon tetap (*fixed carbon*), zat volatile (*volatile matter*), kadar air dan abu. Pengujian nilai kalor bertujuan untuk mengetahui nilai kalor yang terkandung dalam biomassa mentah dan produk torrefaksi. Sementara uji ultimate dilakukan untuk mengetahui komposisi hidrokarbon bahan bakar yang dinyatakan dalam unsur elemen dasar yaitu C, H, O, S sedangkan kelembapan, kandungan anorganik, abu (ash) tidak berkaitan dengan analisis *ultimate*.

Pengujian proximate dan nilai kalor dilakukan di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi Balai Riset dan Standardisasi Industri Bandar Lampung (BARISTAN). Sementara uji ultimate dilakukan di Pengujian Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral

Batubara Bandung (Puslitbang Tekmira) Kota Bandung.



Gambar 1. Skema proses torefaksi kontinu

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur Internal Reaktor

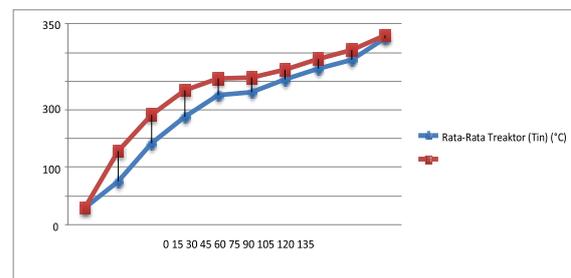
Pada pengujian temperatur reaktor, langkah pertama yang dilakukan adalah pemanasan awal (initial heating) reaktor dalam kondisi kosong, hal ini untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk dapat mencapai temperatur proses yang ditentukan yakni 225°C- 325°C.

Hasil pengujian diperoleh indikasi awal bahwa dalam periode waktu pemanasan diketahui terdapat kecenderungan semakin tinggi temperatur oli pemanas maka selisih temperatur antara oli dengan dinding reaktor dalam (ΔT) semakin kecil. Proses pemanasan yang kontinu dari nyala api burner pada permukaan dinding luar reaktor yang berisi oli pemanas menyebabkan temperatur dalam reaktor yang terus meningkat, seiring dengan meningkatnya temperatur oli pemanas. Selama periode waktu pemanasan 75 menit, beda temperatur dinding luar dan dalam reaktor (ΔT) cukup tinggi namun terus menurun dan mendekati nol sampai dengan temperatur 325 °C selama durasi 135 menit.

Hal ini membuktikan bahwa perpindahan panas yang terjadi pada permukaan dinding reaktor semakin besar. Penurunan densitas oli akibat peningkatan temperatur menyebabkan difusivitas termal semakin meningkat, sehingga akan semakin cepat penjalaran panas ke dinding dalam reaktor. Pada pemanasan awal ini

maksimum temperatur dalam reaktor dibatasi sampai dengan mencapai ± 325 °C, karena range temperatur yang akan digunakan selama proses torefaksi menggunakan material sampah biomassa adalah ± 225 °C sampai dengan temperatur maksimal ± 325 °C proses tanpa oksigen pada tekanan atm.

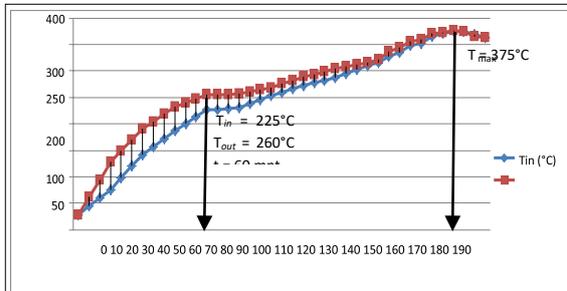
Proses torefaksi yang lebih dari temperatur maksimal tersebut akan menyebabkan dekomposisi zat-zat volatile dan karbon yang besar, juga kehilangan lignin pada bimassa yang tinggi. Sehingga kerugian tersebut dapat menyebabkan produk hasil torefaksi kurang baik, terlalu rapuh dan sulit untuk dibentuk. Selain itu temperatur yang terlalu tinggi juga membuat hancur kandungan selulosa menyebabkan pembentukan tar pada temperatur > 325 °C. Ini alasan menentukan batas maksimum temperatur torefaksi pada pengujian ini adalah ± 325 °C.



Gambar 2. Grafik laju kenaikan temperature dinding dalam reaktor (T_{in}) dan oli pemanas (T_{out})

Namun dilihat dari Gambar 2. ada kecenderungan temperatur reaktor dan oli terus meningkat sampai pada titik dimana terjadi kondisi isothermal. Gambar 3. menunjukkan bahwa variasi suhu yang berbeda pada posisi aksial didalam reaktor selama durasi pengujian 190 menit secara konsisten, suhu reaktor dalam reaktor lebih rendah dari suhu dinding reaktor. Pada durasi 60 menit T_{in} . 226°C, T_{out} 255°C dan seterusnya pembacaan temperatur diketahui bahwa selisih antara temperatur dalam dan dinding reaktor semakin kecil, hal ini kemungkinan terjadi reaksi

eksotermik karena ada efek pendinginan dari nitrogen dingin yang masuk kedalam reaktor.



Gambar 3. Grafik temperatur maksimum reaktor

Setelah proses pemanasan awal, eksperimen selanjutnya adalah menggunakan sampel sampah biomassa campuran yang terdiri dari daun, ranting, nasi, kulit jeruk dan kulit pisang. Pengujian ini dilakukan pada temperatur proses 225°C, 250°C, 275°C, 300°C, 325°C, waktu tinggal ± 30 menit dan waktu pendinginan ± 15 menit, dengan massa sample umpan adalah 1 Kg.

Pada mulanya terdapat beberapa permasalahan umum saat pengoperasian reaktor dengan pengujian sampel sampah biomassa ini diantaranya: panas dari nyala api burner pada saat *running test* dan pemanasan awal pada pengujian sebelumnya membuat v-belt yang digunakan sebagai transmisi daya dari *electromotor* ke poros *screw conveyor* mengalami pemuaian sehingga proses pemindahan daya tidak berjalan maksimal (v-belt sering terjadi selip) dan solusi yang diberikan adalah dengan menyetel kembali kedudukan dari *electromotor* dan *pulley* tersebut dan mengganti v-belt yang sudah kendur.

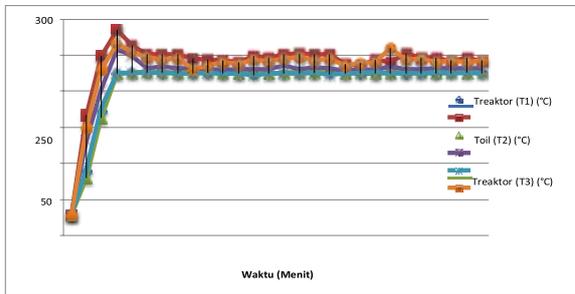
Permasalahan yang lain adalah poros *rotary valve* yang bengkok akibat tidak mampu mendorong material masuk kedalam ruang reaktor dikarenakan sampah yang macet diantara dinding *rotary valve* dengan sudu impelernya, terutama untuk jenis sampah ranting yang memiliki tekstur keras. Pada kondisi tersebut percobaan

dibatalkan dan diulang setelah dilakukan perbaikan terhadap *rotary valve* tersebut. Masalah tersebut bisa diselesaikan dengan cara memperkecil kembali ukuran partikel sampah umpan dan memperbesar diameter poros serta memperlebar jarak antara rumah *rotary vave* dan sudu impelernya sampai batas toleransi maksimum yang juga harus diperhatikan agar tetap oksigen tidak masuk dan berkontak dengan gas *methane* di dalam reaktor.

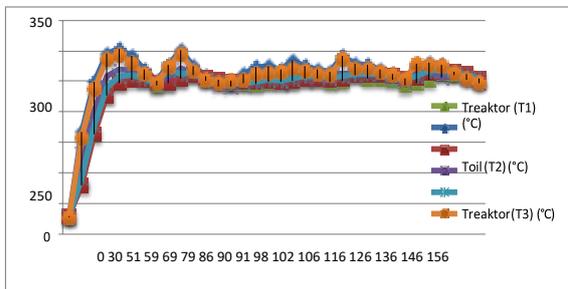
Dengan demikian, ini menyiratkan bahwa ukuran partikel sampah umpan merupakan faktor yang penting dalam proses torefaksi, terutama untuk reaktor kontinu yang menggunakan sistem *air lock rotary valve*. Implikasi dari proses penyumbatan bisa berakibat fatal, dengan demikian menyarankan agar proses tersebut meminimalkan *prevalensi* gesekan antar partikel dan memperhalus ukuran partikel sampah umpan.

Pada pengujian awal menggunakan sampah biomassa proses torefaksi terjadi pada temperature 225°C. Gambar 4. menunjukkan profil temperatur yang terjadi diruang reaktor dan selimut oli. Temperatur pemanasan awal sampai dengan temperatur reaktor mencapai 225°C berlangsung dalam waktu 45 menit dengan bukaan control valve sebesar 200° sampai dengan 220°, selanjutnya gas nitrogen diinjeksikan kedalam reaktor, kemudian temperatur reaktor dijaga dalam kondisi *steady* selama 50 menit, setelah temperatur reaktor mampu mempertahankan kondisi *steadynya* kemudian sampah umpan sebanyak 1 kg dimasukan melalui *feeding hooper* dan sekaligus menghitung waktu proses torefaksi sampah mulai masuk sampai dengan sampah mulai keluar dari reaktor, dan dari hasil pengujian tercatat bahwa sampah mulai keluar dimenit ke 135 atau dengan waktu tinggal sampah didalam ruang reaktor adalah selama 45 menit dengan ± 30 menit waktu untuk proses

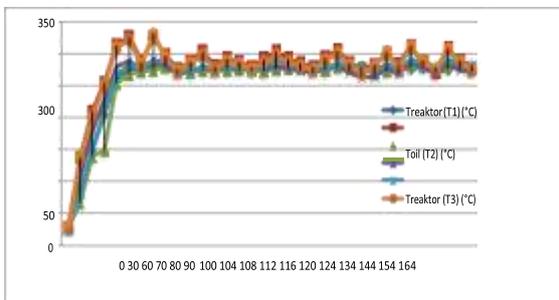
torefaksi di ruang reaktor dan ± 10 menit waktu pendinginan di dalam *cooling char*.



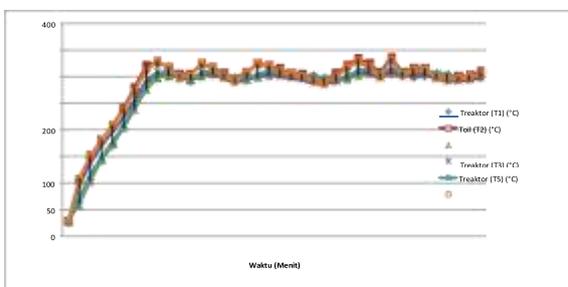
Gambar 4. Grafik proses torefaksi pada temperature 225°C



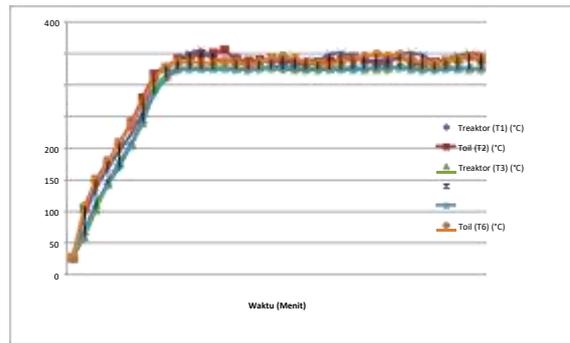
Gambar 5. Grafik proses torefaksi pada temperature 250°C



Gambar 6. Grafik proses torefaksi pada temperature 275°C



Gambar 7. Grafik proses torefaksi pada temperature 300°C



Gambar 8. Grafik proses torefaksi pada temperature 325°C

Kemungkinan hal ini dipengaruhi akibat temperature proses yang tinggi, yang mengakibatkan tidak hanya kandungan hemiselulosa yang terdekomposisi, namun ada sebagian kandungan selulosa yang terdekomposisi.

Waktu tinggal sampah biomassa didalam ruang reaktor, berpengaruh terhadap degradasi termal dari biomassa. Waktu tinggal yang lebih lama membuat *massa yield* yang lebih rendah namun memberikan densitas energi yang lebih tinggi. Terlepas dari itu, waktu tinggal dalam proses torefaksi tidak terlalu dominan dibandingkan dengan temperature torefaksi. Reaktor Kontinu tipe tubular hasil pembuatan dan digunakan sebagai alat pengujian dirancang untuk waktu tinggal selama 30 menit.

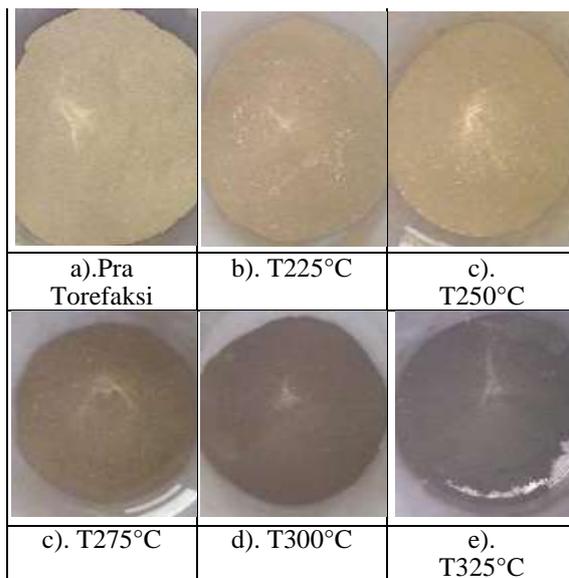
Tabel 1. Waktu tinggal masing-masing temperatur

Temperatur (°C)	Initial Heating (menit)	Residence Time (menit)	Cooling Time (menit)	Total (menit)
225	95	30	10	135
250	101	30	15	146
275	115	30	15	160
300	170	30	20	220
325	185	30	20	235
Rata-Rata	132	30	16	179

Pada hasil pengujian yang terakhir yakni temperatur 325°C, terjadi fenomena

keluarnya cairan tar di beberapa titik diantaranya: saluran pembuangan gas *methane*, *bearing poros screw conveyor* dan saluran keluar produk hasil torefaksi.

Hasil pengujian telah menunjukkan prediksi perubahan hasil produk dengan berubahnya temperatur torefaksi selama waktu tinggal 30 menit. Dengan kondisi parameter proses yang divariasikan dalam penelitian ini, perubahan yang paling mudah diamati adalah variasi dalam temperatur reaktor, kenaikan temperatur reaktor menurunkan hasil produk padatan. Efek tersebut konsisten dengan teori bahwa meningkatnya baik temperatur maupun waktu tinggal dari proses torefaksi akan menyebabkan devolatilisasi produk padatan yang lebih ekstensif dan dengan demikian menghasilkan produk padatan yang rendah.

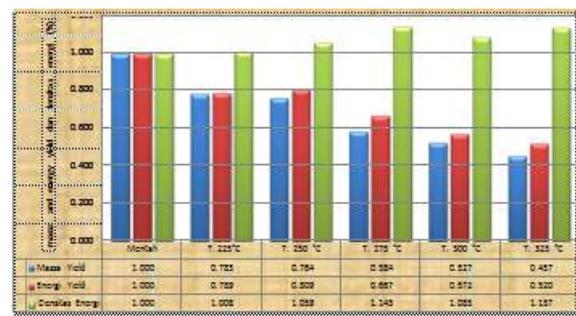


Gambar 9. Perubahan warna *char* hasil torefaksi

Laju aliran nitrogen dalam muatan sampah biomassa pada reaktor tidak memiliki dampak signifikan terhadap hasil produk sehingga pengaruhnya dapat diabaikan. Proses torefaksi merubah sifat fisik sampah, jika dilihat dari warnanya, sampah biomassa hasil torefaksi berubah warnanya menjadi kehitaman, seperti arang. Perubahan yang lain yang terlihat dalam

kekerasan dan keuletan, sampah hasil torefaksi menjadi lebih lunak dan getas.

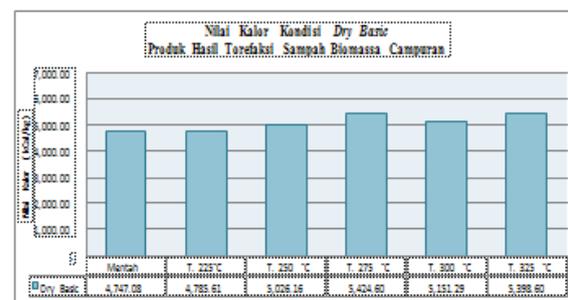
Hasil perolehan massa (*mass yield*) dan energi (*energy yield*) untuk torefaksi sampah kondisi kering dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik perolehan massa dan energi

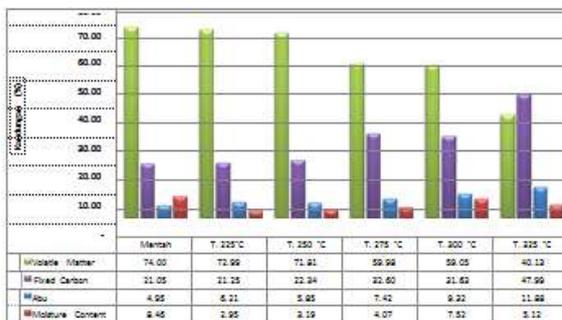
Gambar 10 menunjukkan bahwa kandungan energi yang tersimpan dalam produk torefaksi masih tersisa sekitar 52% sampai 81% dan perolehan massanya sebesar 46% sampai 78%. Semakin tinggi temperatur proses torefaksi perolehan massa produk torefaksi semakin kecil. Ketika temperatur proses meningkat dari 225° C sampai 325° C perolehan massa menurun secara drastis mencapai 30% fraksi massa.

Hasil uji nilai kalor produk torefaksi komponen sampah campuran bervariasi antara 4747.08 kcal/kg sampai dengan 5424.60 kcal/kg. Nilai kalor yang diukur adalah untuk masing masing variasi temperatur proses dengan waktu tinggal 30 menit.



Gambar 11. Grafik Nilai Kalor produk torefaksi

Gambar 11. menunjukkan hasil pengujian terlihat bahwa produk torefaksi sampah biomassa campuran menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan sampah mentah. Nilai kalor tertinggi terjadi pada temperatur proses 275°C yakni sebesar 5.424,60 kcal/kg, namun pada temperature 300°C dan 325°C hasil pengujian menunjukkan nilai kalor yang lebih rendah. 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.



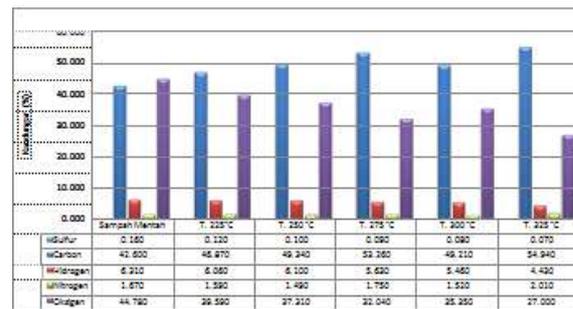
Gambar 12. Grafik hasil uji *proximate* produk torefaksi

Gambar 12 menunjukkan hasil uji *proximate* pada basis kering dengan metode pengujian ASTM D 1762-84 terhadap komponen sampah biomassa campuran. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kandungan komponen sampah didominasi oleh *volatile matter* (VM) dan *Fixed Carbon* (FC). 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 temperature 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 (*massa 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.

Ketika MSW dibakar pada suhu yang lebih tinggi, lebih banyak volatil dilepaskan dan diperoleh hasil massa yang rendah dalam bentuk padatan. Dengan demikian limbah padat biasanya mengandung lebih banyak abu dan FC tetapi kurang VM karena kehilangan massa selama proses torefaksi.



Gambar 13. Grafik hasil uji *ultimate* produk torefaksi

Hasil uji *ultimate* pada basis kering menunjukkan bahwa konsentrasi atom berturut-turut adalah $C > O > H > N > S$. Persentase berat konten C meningkat dengan peningkatan suhu torefaksi. Sebaliknya, persentase berat H dan O menurun dengan konstan. Hal ini disebabkan oleh efek dehidrasi dan dekarbon dioksida yang terjadi selama proses torefaksi biomassa. Ketika temperatur torefaksi meningkat, diharapkan kandungan lebih banyak zat-zat volatil seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) dengan demikian menghasilkan penurunan

kandungan H dan O untuk hasil torefaksi MSW. Sementara itu, kandungan N sedikit meningkat tetapi kandungan S tidak mengalami perubahan signifikan ketika suhu torefaksi meningkat.

Kandungan kimia produk torefaksi dapat dilihat pada Gambar 13. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengaruh kondisi operasi temperatur 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 temperatur proses.

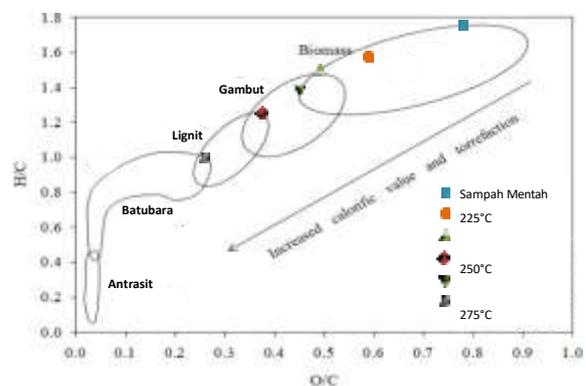
Sebaliknya kandungan oksigen yang tersimpan pada sampah mentah sebesar 44.78% setelah dilakukan proses torefaksi diperoleh residu oksigen turun hingga 27%. Seperti halnya dengan penurunan kandungan hidrogen dan sulfur. Kandungan unsur carbon sebanding dengan Nilai Kalor. Unsur C terdapat dalam *fixed carbon* dan *volatile matter*, sementara unsur H dan O berasal dari kandungan hidrokarbon dan air yang terdapat dalam produk torefaksi.

Tabel 2. Perbandingan O/C dan HC

	Sampah Mentah	T.225 °C	T. 250 °C	T. 275 °C	T. 300 °C	T. 325 °C
O/C (%)	0.78	0.63	0.56	0.45	0.53	0.36
H/C (%)	1.78	1.55	1.48	1.27	1.33	0.97

Ketika temperatur torefaksi ditingkatkan dari 225°C menjadi 325°C, hasil rasio molar H/C menurun dengan konstan dari 1.78 ke 1.55, 1.48, 1.27, 1.33 dan 0,97. Pada rentang suhu yang sama, kandungan oksigen pada sampah produk torefaksi lebih sedikit dari sampah mentah, sehingga rasio O/C sampah hasil torefaksi menurun. Rasio molar O/C menurun dari

0.78 ke 0.63, 0.56, 0.45, 0.53 dan 0.36. Selama torefaksi, karena suhu meningkat, persentase berat konten C meningkat tetapi persentase berat H dan O menurun yang menjelaskan penurunan rasio H/C dan O/C. Selain itu, rasio O/C yang lebih rendah biasanya menguntungkan karena nilai kalor cenderung meningkat. Penurunan O/C sekaligus H/C ini akan meningkatkan kualitas bahan bakar. Peningkatan kualitas yang diperoleh cukup signifikan, dimana bahan bakar padat produk torefaksi sampah biomassa campuran yang mewakili sampah kota mendekati batubara.



Gambar 14. Plot posisi bahan bakar produk torefaksi dengan Diagram Van Krevelen

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari penelitian ini, analisis akhir menunjukkan bahwa pengaruh terhadap perubahan fisik sampah produk torefaksi secara visual berbeda, semakin tinggi temperatur, warna produk torefaksi semakin kehitaman dan tingkat keuletan produk semakin getas atau rapuh. Persentase berat isi C dalam produk torefaksi meningkat tetapi persentase berat kandungan H dan O menunjukkan tren sebaliknya. Hal ini menghasilkan kecenderungan penurunan rasio molar H/C dan O/C untuk produk torefaksi. Analisis proksimat menunjukkan pola menurun untuk abu dan FC tetapi HHV cenderung meningkat ketika suhu

torefaksi meningkat. Bahan bakar padat hasil torefaksi mempunyai karakteristik nilai kalor yang lebih tinggi dari bahan baku yakni sebesar 5424,60 kcal/kg pada temperatur 275°C setara dengan batubara subbituminus B.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul. Hardianto, Toto., Suwono, Aryadi., Pasek, Darmawan. 2011. *Balance Energi pada Proses Torefaksi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan Setara Batubara untuk Memperhitungkan Tingkat Kelayakannya*. Prosiding Optimalisasi Peran Teknik Mesin Dalam Meningkatkan Ketahanan Energi Seminar Nasional Teknik Mesin X Universitas Brawijaya. ISBN 978-602-19028-0- 6.
- Amrul. 2014. *Pemanfaatan Sampah Menjadi Bahan Bakar Padat Setara Batubara Melalui Proses Torefaksi*. Disertasi Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Batidzirai, B., Mignot, A.P.R., Schakel, W.B., Junginger, H.M., Faaij, A.P.C. 2013. *Biomass Torrefaction Technology: Techno-economic Status and Future Prospect*. Energy 62 (2013) 196-214.
- Basu Pabir. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory, Second Edition*. Elsevier, Oxford, UK.
- Basu Pabir dan Dhungana A. 2013. *An Investigation Into the Effect of Biomass Particle Size on its Torrefaction*. Chem. Eng.
- Chen, Dezhen., Lijie, Yin., Huan, Wang., Pinjing, He. 2014. *Pyrolysis Technologies for Municipal Solid Waste: A Review*. Waste Management.
- Faris Muhammad 2017. *Perancangan dan Simulasi Termal Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Untuk Produksi Bahan Bakar Padat Dari Sampah Kota*. Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Chen, Lin, Chang, Ong, 2017. *Fuel Property Variation of Biomassa Undergoing Torrefaction*. Elsevier. Energi Procedia 105(2017) 108-119.
- Sukiran, Abnisa, Daud, Abubakar, Loh 2017. *A Review Of Torrefaction of oil Palm Solid Waste For Biofuel Production*. Elsevier Energy Conversion and Management 149 (2017) 108- 120.
- Nachenius, Wardt, Ronsse, Prins, 2015. *Torrefaction of Pine in a Bench-Scale Screw Conveyor Reaktor*. Elsevier. Biomassa and Bioenergi xxx (2015) 1-9.