

Proses Torefaksi Dengan Metode Batch Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Tandan Kosong Kelapa Sawit

Chuchita², Meiyanti Ratana Sari², Artha Karunia Gresiana Sinaga²,
Komang Gde Suastika^{1*}, Karelius², Made Dirgantara¹, Nyahu Rumbang³,

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya, Kampus UPR Tunjung Nyaho, Jalan Yos Sudarso, Palangka Raya 73112, Indonesia

²Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya, Kampus UPR Tunjung Nyaho, Jalan Yos Sudarso, Palangka Raya 73112, Indonesia

³Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Palangka Raya, Kampus UPR Tunjung Nyaho, Jalan Yos Sudarso, Palangka Raya 73112, Indonesia

Kata kunci

bahan bakar, cangkang sawit, batch, nilai kalori, torefaks.

Abstrak

Indonesia merupakan negara produsen dan eksportir kelapa sawit terbesar di dunia, yang menghasilkan limbah biomassa yang melimpah. Produksi minyak sawit tahun 2018 di Indonesia sebesar 34,94 juta ton dengan hasil samping berupa tandan kosong (23%), mesokarp serat (12%), dan cangkang sawit (5%). Cangkang inti sawit merupakan biomassa potensial yang dapat meningkatkan kualitas sebagai bahan bakar padat melalui proses termokimia. Pemanfaatan limbah hasil industri kelapa sawit menjadi bahan bakar dengan modifikasi termokimia dapat menjadi salah satu solusi untuk membuat nilai tambah dari limbah tersebut. Torefaksi adalah salah satunya proses termokimia yang saat ini digunakan untuk meningkatkan kualitas biomassa. Metode yang biasa digunakan untuk proses torefaksi di laboratorium adalah metode batch. Namun, metode ini memiliki kelemahan ketika kapasitas ditingkatkan membuat penurunan kualitas bahan bakar yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, kualitas cangkang sawit torefaksi dari batch luas permukaan internal dibandingkan dengan torrefaksi batch yang di modifikasi. Torefaksi proses dilakukan pada suhu 275° C, dengan waktu 30 menit. Hasilnya menunjukkan bahwa torefaksi dari metode batch yang dimodifikasi memiliki nilai kalor yang lebih baik, dan dekat dengan bahan bakar

Keywords

fuel, palm shell, batch, calorific value, torrefaction

Abstract

Indonesia is the largest producer and exporter of palm oil in the world, which produces abundant biomass waste. Palm oil production in 2018 in Indonesia was 34.94 million tons with by-products in the form of empty fruit bunches (23%), fiber mesocarp (12%), and palm shells (5%). Palm kernel shell is a potential biomass that can improve its quality as a solid fuel through a thermochemical process. Utilization of waste from the palm oil industry into fuel with thermochemical modifications can be one solution to create added value from the waste. Torrefaction is one of the thermochemical processes currently used to improve the quality of biomass. The method commonly used for the torrefaction process in the laboratory is the batch method. However, this method has a disadvantage when the capacity is increased, resulting in a

decrease in the quality of the resulting fuel. In this study, the quality of the torrefaction palm shells of the internal surface area batch was compared with the torrefaction of the modified batch. Torrefaction process was carried out at a temperature of 275°C, with a time of 30 minutes. The results show that the torrefaction of the modified batch method has a better calorific value, and is close to that of the fuel

Sejarah Artikel

Diterima : 21/09/2022

Disetujui : 23/09/2022

Dipublikasi : 27/09/2022

Email korespondensi: chuchita@mipa.upr.ac.id

© 2022 Bohr: Jurnal Cendekia Kimia. This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara produsen dan eksportir kelapa sawit terbesar di dunia. Produksi kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2016 mencapai 34,40 juta ton dengan luas area 6,46 juta hektar. Indonesia memiliki sejumlah besar biomassa sebagai produk sampingan dari produksi ini. Indonesia juga berkomitmen untuk meningkatkan produksi kelapa sawit, yang terlihat dari peningkatan produksi Tandan Buah Segar (TBS) setiap tahunnya. Di tahun 2016, sebesar 31,73 juta ton menjadi 45,86 juta ton pada 2019. Dari produksi ini, biomassa hasil dari industri kelapa sawit meliputi tandan kosong (23%), serat mesokarp (12%) dan cangkang sawit (5%) dari setiap ton tandan buah segar. Produksi yang tinggi ini tentu menghasilkan limbah biomassa yang melimpah. Satu dari Potensi biomassa yang besar di Indonesia merupakan produk sampingan dari industri kelapa sawit seperti inti sawit, cangkang dan tandan buah kosong. Biomassa merupakan salah satu energi terbarukan yang potensial dan saat ini menggantikan bahan bakar fosil di industri seperti pembangkit listrik tenaga uap.

Biomassa didefinisikan sebagai bahan biologis yang berasal dari kehidupan atau organisme hidup dengan struktur karbon dan campuran kimia bahan organik yang mengandung hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sejumlah kecil atom & elemen lainnya. Pemanfaatan biomassa

limbah kelapa sawit menjadi energi sangatlah penting, terutama di daerah sekitar produksi minyak sawit agar tidak menyebabkan masalah lingkungan. Namun, dalam hal pemanfaatan sebagai energi, biomassa didefinisikan sebagai semua bahan organik dari tumbuhan, hewan, produk, atau limbah dari industri perikanan budidaya seperti pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, dan perikanan. Biomassa yang dihasilkan dari industri minyak sawit antara lain tandan kosong, serat mesokarp, cangkang kelapa sawit, daun pelepah, dan batang pohon kelapa sawit. Berdasarkan review dan penelitian sebelumnya serat mesokarp dan cangkang kelapa sawit merupakan bahan baku yang baik untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik berbasis biomassa.

Konversi biomassa menjadi energi dapat dilakukan dengan banyak cara seperti termokimia, biokimia dan ekstraksi. Proses torefaksi termokimia sebenarnya adalah proses pirolisis yang tidak lengkap juga dikenal sebagai pirolisis ringan, yang merupakan teknologi lain yang diterapkan dan dipelajari secara luas untuk meningkatkan sifat biomassa sebagai bahan bakar. Torefaksi adalah proses pemanasan antara 200-325 °C dengan oksigen minimal kondisi.

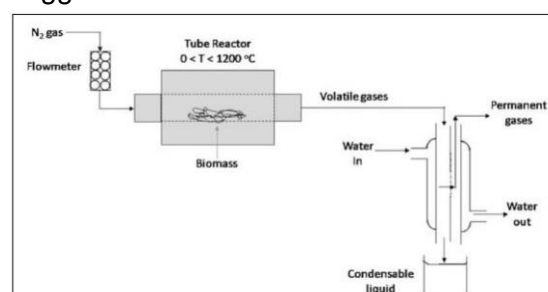
Torefaksi merupakan salah satu proses termokimia yang saat ini tengah banyak digunakan untuk meningkatkan nilai kalor dari biomassa dan menurunkan kelemahankelemahan dari biomassa

tersebut seperti rendahnya nilai kalor dan densitas energi, kelembaman tinggi, efisiensi pembakara rendah dan energi penggilingan yang tinggi. Nilai kalor biomassa merupakan parameter penting untuk perencanaan dan pengendalian pembangkit listrik menggunakan bahan bakar jenis ini. Ada berbagai macam metode torefaksi, salah satunya adalah metode batch yang paling banyak digunakan. Kelemahan metode ini adalah waktu reaksinya berbanding lurus dengan jumlah biomassa yang diproses. Metode ini menyebabkan energi persyarat torefaksi menjadi lebih tinggi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan modifikasi biomassa wadah untuk meningkatkan luas permukaan/kontak panas biomassa untuk merampingkan torefaksi waktu. Pada penelitian ini dilakukan torrefaksi cangkang sawit dari ayakan 0,5 cm dengan tiga variasi suhu dan waktu tinggal berikut 250 °C - 300 °C dan 20-40 menit kemudian menganalisis nilai kalor tinggi (HHV). Nilai HHV, cangkang inti sawit sebelum dan sesudah torefaksi kemudian digunakan untuk menentukan hasil energi dari proses ini.

Langkah Kerja

Bahan baku cangkang sawit diperoleh dari produksi minyak sawit PT. Mulia Agro Permai Mill, Kabupaten Kotawaringin Timur, Kalimantan Tengah, sampel dikeringkan di bawah sinar matahari selama 3 hari panas sampai kelembaban kurang dari 9% dan dibiarkan dalam kantong kedap udara selama 2 minggu lagi kemudian diayak dengan ukuran 0,5 cm. Proses torrefaksi kemudian dilakukan di Laboratorium Proses Baristand Banjarbaru di Kalimantan Selatan menggunakan alat torefaksi sistem batch 500 gram dengan kondisi inert. Temperatur torefaksi divariasikan dari 250 °C, 275 °C, 300 °C [13], dengan waktu tinggal bervariasi 20, 30 dan 40 menit. Proses torefaksi ditunjukkan pada gambar

1 dengan memodifikasi wadah umpan torefaksi menjadi 2 (dua) model yang berbeda (model I dan model II). Model torefaksi yang saya punya pada model I seperti metode batch konvensional, sedangkan pada model II, wadah dimodifikasi menjadi rak untuk meningkatkan panas kontak pada permukaan biomassa. Pada Gambar 1, gas nitrogen disuplai dengan laju 2 Liter/menit untuk 10 menit sampai reaktor dalam kondisi inert. Proses torrefaksi dilakukan pada suhu 275 °C, dengan waktu tinggal 30 menit.



Gambar 1. Proses Torrefaksi

1. Proses torefaksi

Proses torefaksi dengan metode batch menggunakan dua model container yang dimaksudkan untuk memodifikasi luas permukaan biomassa yang kontak dengan panas. Wadah biomassa model I itu adalah saat ini yang umum digunakan hanya terdiri dari satu wadah. Model II dimodifikasi menjadi rak sehingga kontak panas ke biomassa akan lebih efisien. Model wadah I dan II dapat dilihat pada Gambar 2.

2 Analisis nilai kalori

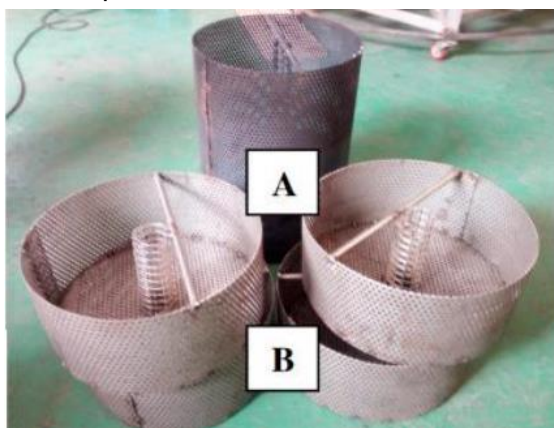
Nilai kalor atau nilai kalor yang lebih tinggi (HHV) ditentukan dengan mengikuti ASTM D240 atau EN 14918 prosedur menggunakan kalorimeter bom [4,13]. Sampel yang diukur adalah sampel sebelumnya perlakuan (kontrol), setelah torrefaction model I dan II.

3 Analisis proksimat

Analisis proksimat untuk mengetahui kelembaban, volatilitas, dan kadar abu, dalam penelitian ini diuji mengikuti prosedur standar ASTM D3171, D3175, dan D3174. Contoh analisis ini kontrol adalah torrefaction model I dan II.

4 Pengukuran HHV dan parameter efisiensi

Pengukuran nilai kalor dilakukan untuk menentukan Nilai Panas Lebih Tinggi (HHV) dan Nilai Pemanasan Terendah (LHV). Pengukuran ini mengikuti prosedur ASTM D240 atau EN14918 menggunakan kalorimeter bom Sampel yang diukur adalah sampel sebelum dan sesudah torrefaksi. Tiga parameter kritis yang digunakan untuk menentukan keberhasilan proses torrefaksi adalah penurunan berat badan, hasil massa, dan hasil energi. Fokus dalam proses torrefaksi adalah untuk mendapatkan nilai HHV yang tinggi dan kehilangan massa yang rendah karena proses ini.



Gambar 2. (A) Model I dan (B) Model II

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Produk visual dari torefaksi

Proses torefaksi dalam penelitian ini mengacu pada (Dirgantara et al. 2020), di mana kondisi optimal dari proses torrefaksi pada 275 °C dengan waktu tinggal 30 menit. Secara visual, hasil dari torefaksi model I terlihat kurang optimal dimana secara fisik terlihat tidak jauh berbeda dengan kontrol. Warna hitam pada cangkang sawit torefaksi merupakan

indikasi bahwa proses karbonisasi berhasil selama torefaksi. Hasil torefaksi dengan model II terlihat lebih baik dibandingkan model I. Warna hitam cangkang sawit terdistribusi secara merata. Berikut hasil dari torefaksi pada model I dan II dibandingkan dengan kontrol (Gambar 3).



Gambar 3. (A) Kontrol, (B) Model, dan (C) Model II

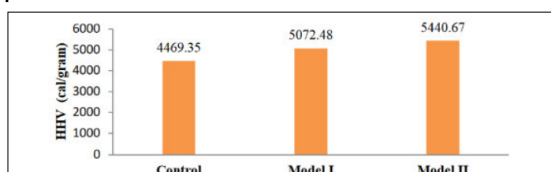
2. Nilai kalori

Nilai kalor merupakan parameter utama yang menunjukkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat. Lagi Kalor dapat dilepaskan oleh setiap gram biomassa ketika terjadi peningkatan nilai kalor. Hasil analisis nilai kalor ditunjukkan pada gambar 4. Nilai kalor meningkat secara signifikan setelah proses torrefaksi, dimana kontrol dari 4469,35 Cal/gram meningkat menjadi 5072,48 Cal/gram (model I) dan 5440,67 Cal/gram (model II). Peningkatan kandungan karbon pada cangkang sawit selama proses torrefaction menyebabkan peningkatan HHV. Hal ini menyebabkan penghapusan volatil zat selama proses torrefaksi, seperti air, asam asetat, dan fenol dalam cangkang sawit. Selama proses torrefaksi, degradasi termal hemiselulosa dan lignin terjadi di zat yang mudah menguap. Terbentuknya zat yang mudah menguap, menyebabkan rasio O/C dan H/C, akan terus menurun, sehingga meningkatkan kandungan karbon cangkang sawit [20]. Hal ini menyebabkan peningkatan nilai kalor cangkang sawit akibat torrefaksi. Membuat biomassa wadah menjadi rak (model II) pada proses torrefaksi, seperti terlihat pada gambar 2, membuat panas lebih besar merata sehingga proses termokimia pada cangkang sawit lebih baik. Dengan pemerataan panas yang terdistribusi

menyebabkan lebih banyak senyawa volatil yang hilang, sehingga ikatan nilai karbon meningkat dan berdampak pada peningkatan nilai kalor.

3. Analisis proksimat

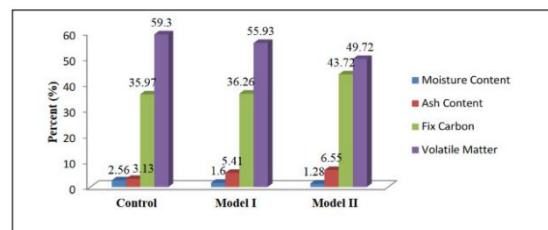
Analisis Proksimat digunakan untuk mengetahui karakteristik dan kualitas bahan bakar padat mengenai: penggunaan bahan bakar padat, yaitu untuk menentukan jumlah relatif air lembab (moisture content), zat yang mudah menguap (volatile matter), abu (ash content), dan karbon tertambat (fixed carbon). Itu hasil analisis proksimat ditunjukkan pada Gambar 5. Kadar air dalam biomassa mempengaruhi nilai kalori. Semakin tinggi kadar air bahan bakar padat, semakin signifikan nilai kalornya dibutuhkan dalam proses pembakaran, sehingga diperlukan tenaga ekstra. Juga, kandungan air yang tinggi akan meningkatkan risiko bahaya kebakaran saat menyimpan biomassa dalam waktu lama. Kelembaban tinggi berpotensi menyebabkan fermentasi sehingga suhu bahan meningkat, yang dapat menyebabkan kebakaran jika terjadi adalah gesekan atau dekat dengan sumber panas.



Gambar 4. Nilai kalor control cangkang sawit, model I dan model II

Kadar air dalam biomassa mempengaruhi nilai kalor. Semakin tinggi kadar air padatan bahan bakar, semakin besar nilai kalor yang dibutuhkan dalam proses pembakaran, sehingga diperlukan ekstra energi. Selain itu, kandungan air yang tinggi akan meningkatkan risiko bahaya kebakaran saat disimpan biomassa dalam waktu yang lama. Kelembaban yang tinggi berpotensi menyebabkan terjadinya fermentasi

sehingga suhu bahan meningkat, yang dapat menyebabkan kebakaran jika terjadi gesekan atau dekat dengan sumber panas. Itu kadar air pada model II lebih kecil dari pada model I; kondisi ini menunjukkan bahwa model II adalah lebih efisien dalam mengurangi kadar air. Kandungan abu yang tinggi pada bahan bakar padat menghasilkan panas total yang lebih rendah [21,23]. Kandungan abu yang rendah adalah signifikan dalam konversi termal biomassa, meningkatkan efisiensi, terutama ketika biomassa mengandung kalium atau halida seperti klorin. Kandungan abu produk torrefaksi cangkang sawit pada Model I dan II meningkat. Pengurangan massa yang terjadi selama proses torrefaksi tidak disertai dengan degradasi komponen anorganik pembentuk abu menjadi penyebab peningkatan ini.



Gambar 5. Analisis proksimat cangkang sawit torefaksi (kontrol, model I dan model II)

Volatile matter (VM) adalah jumlah zat yang hilang ketika biomassa dipanaskan pada suhu tertentu suhu dan waktu. Salah satu faktor yang mempengaruhi laju pelepasan senyawa volatil adalah luas permukaan biomassa. Semakin banyak luas permukaan (torefaksi model II), semakin cepat laju pelepasannya dari senyawa volatil. Komponen kimia utama yang hilang selama proses torrefaksi dalam biomassa adalah hidrogen dan oksigen. Fenol dan karbonil diproduksi dalam kisaran suhu 200 - 300 °C dari senyawa volatil, terutama oksigen. Pengurangan hidrogen dan oksigen kandungan menyebabkan peningkatan

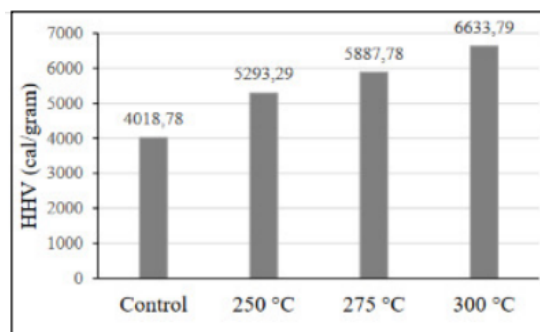
rasio karbon terhadap hidrogen dan oksigen, yang mempengaruhi peningkatan produk nilai kalori.

Fixed Carbon (FC) menyatakan jumlah karbon yang terkandung dalam bahan atau biomassa. Proses torrefaksi menyebabkan banyak volatile matter hilang sehingga fixed carbon akan terus meningkat setelah torrefaksi. Tingkat karbon tetap dikaitkan dengan tingkat volatil. Semakin rendah kadar volatil dalam biomassa menyebabkan kadar karbon tetap yang lebih tinggi sehingga nilai kalor juga lebih tinggi. Produk torrefaction dengan model II memiliki nilai karbon tetap yang lebih tinggi daripada model I produk torrefaksi. Luas permukaan biomassa yang besar pada model II menyebabkan lebih banyak senyawa volatil yang hilang mempengaruhi semakin tinggi kandungan karbon yang terikat pada produk torrefaksi model II.

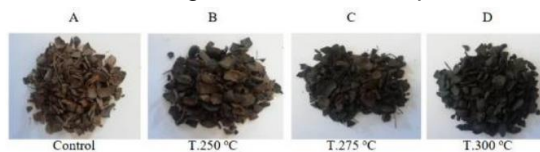
4 Efek suhu pada torrefaksi

Pengaruh suhu torrefaksi pada cangkang sawit dilakukan dengan variasi suhu 0 °C (kontrol), 250 °C, 275 °C dan 300 °C dengan waktu tinggal 40 menit. Pengaruh suhu terhadap nilai HHV ditunjukkan pada Gambar 1 dan pengaruh suhu pada parameter efisiensi proses ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai kalor adalah salah satu yang utama parameter yang menentukan kualitas bahan bakar padat. Semakin tinggi nilai kalor, semakin banyak panas dapat dilepaskan oleh setiap gram atau kilogram bahan bakar padat. Gambar 1 menunjukkan semakin tinggi suhu torrefaksi, semakin tinggi nilai kalor. Nilai kalor meningkat secara signifikan di mana kontrol 4.018,78 kal/gram meningkat menjadi 6633,79 kal/gram pada suhu 300 °C. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan jumlah kandungan karbon pada cangkang sawit yang telah mengalami torrefaksi dan penghilangan beberapa senyawa kimia dalam cangkang sawit yang berpotensi menimbulkan asap, terutama kehilangan

zat volatil selama proses torrefaksi seperti air, asam asetat, dan fenol. Selama proses torrefaction, dekomposisi termal hemiselulosa menjadi mudah menguap. Dengan terbentuknya zat yang mudah menguap maka kadar O/C dan H/C akan terus menurun sehingga meningkatkan kandungan karbon cangkang sawit.

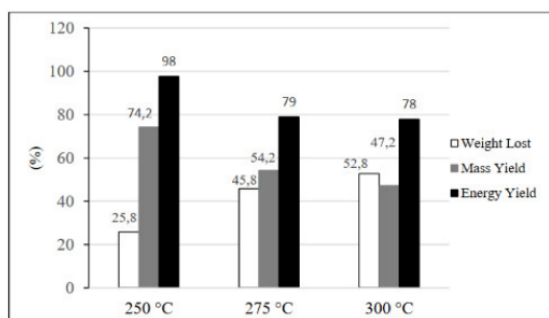


Gambar 6. Pengaruh suhu terhadap nilai HHV



Gambar 7. (A) Kontrol; (B) Torrefaksi 250 °C; (C) Torrefaksi 275 °C; (D) Torrefaksi 300 °C

Dengan peningkatan suhu, juga diamati bahwa produk torrefied menjadi lebih gelap dari warna coklat mentah setelah torrefaction [6]. Salah satu indikator keberhasilan proses torrefaksi adalah mengubah kenampakan fisik biomassa, dalam hal ini cangkang sawit. Gambar 2 (B), (C) dan (D) yang merupakan hasil torrefaksi menunjukkan warna kenampakan fisik yang berbeda dari cangkang kontrol (Gambar 2 (A)). Hal ini disebabkan proses karbonisasi dan pengurangan kadar air selama torrefaksi menghasilkan warna cangkang yang lebih gelap. Semakin tinggi suhu torrefaksi, telapak tangan warna cangkang tampak lebih gelap dan lebih merata, sehingga sesuai dengan penampilan fisik dapat mengatakan proses torrefaksi dengan peralatan yang ada berhasil.



Gambar 8. Pengaruh suhu terhadap parameter efisiensi proses

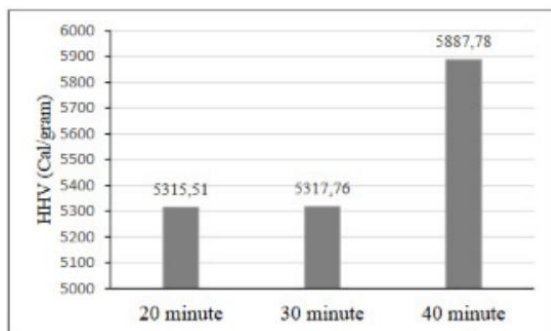
Kehilangan berat pada 200 °C dikaitkan dengan hilangnya kelembaban terikat dan tidak terikat yang tersisa, devolatilisasi proses organik yang dimulai pada 210 °C ketika hemiselulosa mulai rusak oleh pemutusan ikatan. Saat hemiselulosa terurai, H₂O dihasilkan dari ikatan -C-O-H, memimpin juga untuk produksi gas non-condensable seperti CO dan CO₂. Semakin tinggi suhu lebih tinggi kehilangan berat dan menghasilkan hasil massa yang lebih kecil. Selain kelembaban, hal ini disebabkan oleh degradasi hemiselulosa, selulosa, dan lignin dengan meningkatnya suhu. Terlihat pada suhu pada suhu 300 °C nilai susut bobot lebih tinggi dari hasil massa.

Hasil energi merupakan parameter yang dipengaruhi oleh nilai HHV dan juga hasil massa. Jika nilai rendemen energi diatas 100%, proses torrefaksi telah mampu meningkatkan energi yang dapat digunakan dalam biomassa. Kehilangan massa yang besar karena kenaikan suhu menyebabkan energi rendemen menurun meskipun nilai kalor meningkat. Gambar 3 menunjukkan hasil energi pada a suhu 250 °C sebesar 98%, kehilangan massa yang kecil dan peningkatan panas yang signifikan menyebabkan nilai panas dari yang lain tetapi nilainya belum melebihi 100%.

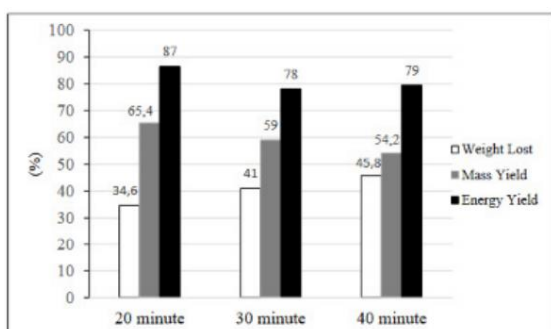
5 Efek waktu tinggal pada torefaksi

Pengaruh waktu tinggal pada torrefaksi pada cangkang sawit dilakukan

dengan variasi waktu 20, 30 dan 40 menit dengan suhu konstan 275 °C tidak berbeda dengan pengaruh suhu. Secara umum semakin lama waktu tinggal maka nilai kalor akan semakin meningkat seperti pada Gambar 4. Hal ini disebabkan semakin lama waktu karbonisasi maka nilai kalor akan semakin meningkat pula. Dengan bertambahnya waktu tinggal, O₂ dan H akan habis untuk membentuk uap air, CO dan CO₂ yang kemudian dilepaskan ke atmosfer. Ini menghasilkan rasio C/O dan C/H yang tinggi menyebabkan kalori yang lebih tinggi nilai. Peningkatan nilai kontras HHV terlihat pada waktu penahanan 40 menit, hal ini karena pada menit ke 20 dan 30 masih dominan terhadap degradasi kelembaban dan hemiselulosa. Ini dapat dilihat dari penurunan berat badan dimana pada suhu 20-30 menit selisihnya sebesar 6,5% sedangkan 30-40 lebih kecil pada 4,8%, artinya volatilitas ringan telah berkurang secara signifikan. Pengaruh waktu tinggal terhadap parameter efisiensi proses ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan data ini, penurunan berat badan meningkat dengan peningkatan waktu tinggal yang menghasilkan penurunan massa menghasilkan. Hasil energi menurun karena peningkatan waktu tinggal, tetapi pada 40 menit lebih tinggi dari 30 menit. Hal ini disebabkan nilai HHV yang jauh lebih tinggi dari waktu 30 menit, sedangkan nilai HHV antara 20 dan 30 menit tidak berbeda jauh. Berdasarkan data, waktu penahanan 20 menit memiliki menghasilkan energi yang lebih tinggi sebesar 87%, karena dalam kondisi ini hasil massa lebih tinggi dan kehilangan massa adalah lebih kecil.



Gambar 9. Pengaruh waktu tinggal terhadap nilai HHV



Gambar 10. Pengaruh waktu tinggal terhadap parameter efisiensi proses

KESIMPULAN

Modifikasi wadah biomassa dalam reaktor torrefaction (model II) metode batch yang dihasilkan produk yang lebih optimal dibandingkan tanpa modifikasi (model I). Kualitas produk ini dapat dilihat dari nilai kalor yang lebih tinggi dan bahan volatil yang lebih rendah dalam model II. Jadi, meningkatkan luas permukaan/panas area kontak biomassa dapat merampingkan proses torrefaksi metode batch dan menghasilkan yang lebih baik kualitas bahan bakar. Peningkatan suhu akan meningkatkan nilai HHV tetapi menyebabkan kehilangan massa yang besar. Meningkat dalam waktu tinggal juga menunjukkan hal serupa dimana nilai kalor meningkat diikuti dengan besar kehilangan massa. Berdasarkan nilai HHV dan hasil energi, kondisi optimal untuk metode batch proses torrefaksi yang memiliki nilai kalor tinggi dan kehilangan massa sedang yaitu 275 °C dan waktu 20 menit memegang waktu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah mendukung penelitian ini. Kegiatan ini didukung oleh Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) yang telah didanai melalui Grant Palm Research Scheme.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Perea-Moreno M-A, E. Samerón-Manzano and Perea-Moreno A J 2019 Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends Sustainability 11 8638
- [2]. Pranoto B, Pandin M, Fithri S R and Nasution S 2016 Peta Potensi Limbah Biomassa Pertanian dan Kehutanan Sebagai Basis Data Pengembangan Energi Terbarukan. Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan 12 123–30
- [3]. Mafu L D, Neomagus H W J P, Everson R C, Carrier M, Strydom C A and Bunt J R 2016 Structural and chemical modifications of typical South African biomasses during torrefaction. Bioresource Technology 202 192–97
- [4]. Mamvura T A, Pahla G and Muzenda E 2018 Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. South African Journal of Chemical Engineering 25 1–12
- [5]. Mohd Faizal H et al. 2018 Torrefaction of densified mesocarp fibre and palm kernel shell Renewable Energy 122 419–28 6. BPS Badan Pusat Statistik 2020 <https://www.bps.go.id/dynamictable/2015/09/04/839/produksi-tanamanperkebunan-menurut-propinsi-dan-jenis-tanaman-indonesia-ribu-ton-2011-2019-.html> (accessed Jul. 14, 2020)
- [7]. Thaim T and Rasid R A 2016 Improvement Empty Fruit Bunch Properties through Torrefaction. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 10 114–21

- [8]. Saelor S, Kongjan P and Thong S O 2017 Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches Energy Procedia 138 717–22
- [9]. Abdul Samad N A F, Jamin N A and Saleh S 2017 Torrefaction of Municipal Solid Waste in Malaysia Energy Procedia 138 313–18
- [10]. Abdul Wahid F R A, Saleh S and Abdul Samad N A F 2017 Estimation of Higher Heating Value of Torrefied Palm Oil Wastes from Proximate Analysis. Energy Procedia 138 307–12
- [11]. Alamsyah R, Siregar N C and Hasanah F 2017 Torrefaction study for energy upgrading on Indonesian biomass as low emission solid fuel. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 65 012051
- [12]. Dirgantara M, Karelius, Cahyana B T, Suastika K G and Akbar A R 2020 Effect of Temperature and Residence Time Torrefaction Palm Kernel Shell On The Calorific Value and Energy Yield Journal of Physics: Conference Series 1428 012010
- [13]. Nyoman Sukarta I and Sri Ayuni P 2016 Analisis Proksimat dan Nilai Kalor pada Pellet Biosolid yang Dikombinasikan Dengan Biomassa Limbah Bambu JST (Jurnal Sains dan Teknologi) 5 8278
- [14]. Susanty W, Helwani Z and Zulfansyah 2018 Torrefaction of oil palm frond: The effect of process condition to calorific value and proximate analysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 345 012016
- [15]. Bach Q-V and Skreiberg Ø 2016 Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 665–77
- [16]. Asadullah M, Adi A M, Suhada N, Malek N H, Saringat M I and Azdarpour A 2014 Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal Energy Conversion and Management 88 1086–939
- [17]. Erol M, Haykiri-Acma H and Küçükbayrak S 2010 Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data 35 170–73
- [18]. Dirgantara M, Kristian N and Karelius 2019 Evaluasi Prediksi Nilai Higher Heating Value (HHV) Biomassa Berdasarkan Analisis Ultimate. Jurnal Jejaring Matematika dan Sains 1 107–13
- [19]. Hosseinpour S, Aghbashlo M and Tabatabaei M 2018 Biomass higher heating value (HHV) modeling on the basis of proximate analysis using iterative network-based fuzzy partial least squares coupled with principle component analysis (PCA-INFPLS) Fuel 222 1–10
- [20]. Karelius, Dirgantara M, Rumbang N, Suastika K G and Akbar A R M 2020 Torrefaction of palm kernel shell using COMB method and its physicochemical properties Journal of Physics: Conference Series 1422 012005
- [21]. Sirisomboon P, Funke A and Posom J 2020 Improvement of proximate data and calorific value assessment of bamboo through near infrared wood chips acquisition Renewable Energy 1471921–31
- [22]. Pahla G, Mamvura T A, Ntuli F and Muzenda E 2017 Energy densification of animal waste lignocellulose biomass and raw biomass South African Journal of Chemical Engineering 24 168–75
- [23]. Sukiran M A, Abnisa F, Wan W M A Daud, Abu Bakar N and Loh S K 2017 A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production Energy Conversion and Management 149 101–20
- [24]. Karelius, Dirgantara M, Rumbang N, Suastika K G, Prabawa I D G P and Ernawati L 2020 The Prediction of Optimal Torrefaction Condition Palm Kernel Shell based on Elemental Composition

International Conference on Industrial Technology 2019 46–51

[25]. Nhuchhen D R and Abdul Salam P 2012 Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach Fuel 99 55–63

[26]. Chen Y-C, Chen W-H, Lin B-J, Chang J-S and Ong H C 2017 Fuel Property Variation of Biomass Undergoing Torrefaction Energy Procedia 105 108–12

[27]. J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, C. T. Wright, J. R. Hess, and R. D. Boardman, "A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties," Symp. Thermochem. Convers., pp. 1–14, 2011.

[28]. C. Chen, S. Qin, F. Chen, Z. Lu, and Z. Cheng, "Co-combustion characteristics study of bagasse, coal and their blends by thermogravimetric analysis," J. Energy Inst., vol. 92, no. 2, pp. 364–369, Apr. 2019.

[29]. S. Haryati, Rahmatullah, and R. W. Putri, "Torrefaction of Durian peel and bagasse for bio- briquette as an alternative solid fuel," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 334, p. 012008, Mar. 2018.

[30]. T. Thaim and R. A. Rasid, "Improvement Empty Fruit Bunch Properties through Torrefaction," Aust. J. Basic Appl. Sci., vol. 10, no. 17, pp. 114–121, 2016.

[31]. Q.-V. Bach, Ø. Skreiberg, and C.-J. Lee, "Process modeling and optimization for torrefaction of forest residues," Energy, vol. 138, pp. 348–354, Nov. 2017.

[32]. T. A. Mamvura, G. Pahla, and E. Muzenda, "Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa," South Afr. J. Chem. Eng., vol. 25, pp. 1–12, Jun. 2018

[33]. G. Pahla, T. A. Mamvura, F. Ntuli, and E. Muzenda, "Energy densification of animal waste lignocellulose biomass and raw biomass," South Afr. J. Chem. Eng., vol. 24, pp. 168–175, Dec. 2017.

[34]. E. Barta-Rajnai et al., "Effect of Temperature and Duration of Torrefaction on the Thermal Behavior of Stem Wood, Bark, and Stump of Spruce," Energy Procedia, vol. 105, pp. 551–556, May 2017.

[35]. D. Chen, A. Gao, K. Cen, J. Zhang, X. Cao, and Z. Ma, "Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin," Energy Convers. Manag., vol. 169, pp. 228–237, Aug. 2018.

[36]. BPS, "Badan Pusat Statistik," 2019. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/dynamic/table/2015/09/04/839/produksi-tanamanperkebunan-menurut-propinsi-dan-jenis-tanaman-indonesia-000-ton-2012-2017-.html>. [Accessed: 05-Mar-2019].

[37]. S. Saelor, P. Kongjan, and S. O-Thong, "Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches," Energy Procedia, vol. 138, pp. 717–722, Oct. 2017.

[38]. H. S. Lau, H. K. Ng, S. Gan, and S. A. Jourabchi, "Torrefaction of oil palm fronds for co-firing in coal power plants," Energy Procedia, vol. 144, pp. 75–81, Jul. 2018.

[39]. H. Mohd Faizal et al., "Torrefaction of densified mesocarp fibre and palm kernel shell," Renew. Energy, vol. 122, pp. 419–428, Jul. 2018.

[40]. A. Rodrigues, L. Loureiro, and L. J. R. Nunes, "Torrefaction of woody biomasses from poplar SRC and Portuguese roundwood: Properties of torrefied products," Biomass Bioenergy, vol. 108, pp. 55–65, Jan. 2018.

[41]. C. M. S. da Silva et al., "Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 82, pp. 2426–2432, Feb. 2018.

[42]. W. Susanty, Z. Helwani, and Zulfansyah, "Torrefaction of oil palm frond:

The effect of process condition to calorific value and proximate analysis,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 345, p. 012016, Apr. 2018.

[43]. L. D. Mafu, H. W. J. P. Neomagus, R. C. Everson, M. Carrier, C. A. Strydom, and J. R. Bunt, “Structural and chemical modifications of typical South African biomasses during torrefaction,” Bioresour. Technol., vol. 202, pp. 192–197, Feb. 2016.

[44]. M. Asadullah, A. M. Adi, N. Suhada, N. H. Malek, M. I. Saringat, and A. Azdarpour, “Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal,” Energy Convers. Manag., vol. 88, pp. 1086–1093, Dec. 2014.

[45]. G. Pahla, F. Ntuli, and E. Muzenda, “Torrefaction of landfill food waste for possible application in biomass co-firing,” Waste Manag., vol. 71, pp. 512–520, Jan. 2018. 46. A. Özyüğüran, S. Yaman, and S. Küçükbayrak, “Prediction of calorific value of biomass based on elemental analysis,” p. 7, 2018.