

Pengaruh ukuran serbuk kayu jati dan suhu pemanasan terhadap volume dan ilai kalor tar pada proses pirolisis

Mochammad Nurcholis Majid¹, Nova R. Ismail¹, Purbo Swandono², Dadang Hermawan²

¹Teknik Mesin, Universitas Widyagama

²Diploma III Mesin Otomotif, Universitas Widyagama

Jl. Borobudur, No. 35, Malang, Jawa Timur 65142

Email korespondensi: purbo@widyagama.ac.id

Abstrak

Kebutuhan akan bahan bakar minyak masih tinggi dan bahan bakar minyak tidak mudah untuk diperbaharui, sehingga diperlukan alternatif bahan bakar dari Biomassa. Bahan bakar biomassa dapat diperoleh dari limbah serbuk kayu jati. Dengan demikian, diperlukan kajian tentang pengaruh ukuran serbuk kayu jati dan suhu pemanasan terhadap volume dan nilai kalor tar pada proses pirolisis. Kajian menggunakan metode eksperimen dengan membandingkan ukuran serbuk kayu jati, yaitu ukuran 1,18 mm dan 2,36 mm dengan variasi suhu pemanasan pirolisis sebesar 250oC, 350oC, 450oC dan 550oC. Massa limbah serbuk kayu jati yang digunakan 200 gram dengan waktu pemanasan selama 3 jam. Kajian ini menghasilkan volume tar terbanyak pada suhu pirolisis 550oC sebanyak 64 ml untuk ukuran serbuk 1,18 mm dan 50 ml pada ukuran serbuk 2,36 mm. Pada proses pirolisis ukuran serbuk 2,36 mm didapatkan nilai kalor tertinggi sebesar 612 kal/gram dan pada ukuran 1,18 mm nilai kalor sebesar 565 kal/gram pada suhu 550oC. Hal ini memperlihatkan bahwa ukuran serbuk kayu jati berpengaruh terhadap jumlah volume tar dan nilai kalor yang dihasilkan.

Kata kunci: pirolisis, limbah kayu jati, ukuran serbuk, pemanasan, suhu.

Abstract

The need for fuel oil is still high and fuel oil is not easy to update, so it needs fuel alternatives from Biomassa. Biomassa fuel can be obtained from teak wood powder waste. Thus, research is needed on the effect of teak powder size and heating temperature on the volume and heat value of tar in the pyrolysis process. The study used experimental methods by comparing the size of teak wood powder, which is 1.18 mm and 2.36 mm with variations in pyrolysis heating temperatures of 250°C, 350°C, 450°C, and 550°C. The waste mass of teak wood powder is used 200 grams with a heating time of 3 hours. The study produced the most tar volume at a pyrolysis temperature of 550oC of 64 ml for a powder size of 1.18 mm and 50 ml at a powder size of 2.36 mm. In the pyrolysis process the powder size of 2.36 mm is obtained the highest heat value of 612 cal/gram and at a size of 1.18 mm the heat value of 565 cal/gram at a temperature of 550oC. This shows that the size of teak wood powder affects the amount of tar volume and the heat value produced.

Keywords: pyrolysis, teak wood waste, particle size, heating, temperature.

1. Pendahuluan

Meningkatnya jumlah penduduk dan semakin banyak industri yang berkembang, mengakibatkan kebutuhan energi semakin lama semakin meningkat. Hal ini berdampak pada meningkatnya harga jual bahan bakar minyak dunia khususnya di Indonesia. Dengan menggunakan bahan bakar yang terus menerus, maka bahan bakar semakin lama akan semakin berkurang karena sifatnya yang tidak mudah diperbaharui. Oleh karena itu, diperlukan bahan bakar alternatif yang murah dan ramah lingkungan sebagai pengganti minyak untuk industri kecil dan rumah tangga. Sumber energi alternatif yang cukup berkualitas adalah biomassa [1].

Biomassa merupakan energi terbarukan dalam bentuk energi padat yang berasal dari tumbuhan ber-*lignoselulosa* baik yang langsung digunakan atau diproses terlebih dahulu [2]. *Lignoselulosa* adalah

limbah pertanian yang mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin. *Lignoselulosa* dapat dikonversi menjadi *bio-oil* yang dapat digunakan untuk mensubstitusikan bahan bakar minyak/bensin [3]. Biomassa dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk memproduksi *bio-oil*.

Bio-oil merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui dan dapat dimanfaatkan oleh industri untuk memproduksi bahan kimia, resin dan dapat dicampur dengan minyak sebagai bahan bakar mesin diesel dengan campuran tertentu. *Bio-oil* dapat diperoleh dari limbah pertanian, hutan, perkebunan, industri dan rumah tangga [4]. Salah satu tanaman yang baik untuk pembuatan *bio-oil* adalah kayu jati.

Kayu jati merupakan jenis kayu yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku rumah dan mebel. Proses pemanfaatan kayu jati sebagai bahan baku rumah dan mebel akan mengalami proses

pemotongan/penggergajian dan dari proses pemotongan akan meninggalkan limbah serbuk kayu jati. Limbah serbuk kayu jati dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku *bio-oil*, karena serbuk kayu jati mengandung selulosa, lignin dan hemiselulosa. Selain itu serbuk gergaji kayu jati mempunyai nilai kalor sebesar 4714-5519 kkal/kg [5].

Salah satu cara untuk mengolah serbuk gergaji kayu jati yaitu dengan menggunakan metode pirolisis. Pirolisis merupakan proses dekomposisi suatu zat tanpa adanya oksigen, sehingga terjadi penguraian komponen-komponen penyusunan kayu. Dengan demikian, apabila serbuk kayu jati dipanaskan tanpa udara dan diberi suhu yang cukup tinggi, maka akan terjadi reaksi penguraian dari senyawa-senyawa kompleks yang menyusun kayu dan menghasilkan zat-zat dalam 3 bentuk yaitu padatan cairan dan gas. Produk yang dihasilkan dari proses pirolisis berupa arang (karbon padat), tar (minyak) dan gas permanen yang meliputi metana, hidrogen, karbon monoksida dan karbon dioksida. Proses pirolisis berlangsung dalam beberapa tahap yaitu tahap awal adalah pelepasan air disertai pelepasan gas-gas ringan seperti CO dan CO₂. Tahap kedua adalah proses dekomposisi unsur-unsur penyusun biomassa seperti hemiselulosa, selulosa dan lignin [3].

Setelah proses pirolisis, maka akan di peroleh asap cair. Asap cair merupakan salah satu bahan bakar cair berwarna kehitaman yang berasal dari biomassa seperti serbuk gergaji kayu jati. Asap cair yang diperoleh dari proses pirolisis memiliki kemampuan untuk mengawetkan bahan makanan karena adanya senyawa asam, fenolat dan karbonil. Komponen senyawa fenol pada asap cair berperan sebagai zat antioksidan [6]. Berdasarkan hasil kajian [7], pada alat penghasil asap cair dengan menggunakan bahan baku tempurung kelapa sebagai pengawet makanan. Dari hasil kajian tersebut, menunjukkan bahwa suhu optimal proses pirolisis adalah 400°C dengan suhu pirolisis yang sama dan diberikan variasi waktu yang berbeda. Hasil yang diperoleh pada kajian tersebut bahwa rata-rata volume asap cair yang dihasilkan 25 ml selama 2 jam [7].

Dari kajian di atas, diharapkan dapat memanfaatkan serbuk gergaji kayu jati sebagai bahan baku tar menggunakan proses pirolisis. Dengan demikian kajian difokuskan untuk mengetahui pengaruh ukuran serbuk kayu jati dan suhu pemanasan terhadap volume dan nilai kalor tar pada proses pirolisis.

2. Metode

Metode yang digunakan di dalam kajian ini adalah metode kajian nyata (*true experimental research*). Kajian ini dilaksanakan di Laboratorium Terpadu, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Widyagama Malang, untuk proses pengambilan data, mulai bulan Desember tahun 2020 sampai bulan Januari tahun 2021.

Variabel pada kajian menggunakan ukuran serbuk kayu jati ukuran 1,18 mm dan 2,36 mm dengan variasi suhu pemanasan pada proses pirolisis sebesar 250°C, 350°C, 450°C dan 550°C. Instalasi pirolisis dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Instalasi pirolisis.

Gambar 1 menunjukkan beberapa peralatan yakni :

1. Tabung Gas LPG.
2. *Solenoid valve* untuk mengatur laju aliran gas LPG, sehingga diperoleh suhu yang diinginkan.
3. *Display* suhu menggunakan *Autotonics TC4S-N4R*.
4. Kontaktor untuk menyambung dan memutus arus menggunakan jeni Schneider, arus maksimal 40 A.
5. Reaktor pirolisis (*piroliser*) menggunakan pipa besi dengan ketebalan 2 mm dan dilapisi dengan insulator pada bagian samping
6. Kondensor menggunakan pipa tembaga yang dibentuk spiral untuk meningkatkan luas penampang, di dalam kondensor menggunakan es untuk mendinginkan.
7. Tabung nitrogen digunakan sebagai *sweeping* gas dalam reaktor pirolisis, sehingga tidak terdapat oksigen di dalam reaktor.
8. Regulator nitrogen untuk membuka dan menutup nitrogen, laju massa alir yang digunakan untuk *sweeping* gas sekitar 3 L/menit.

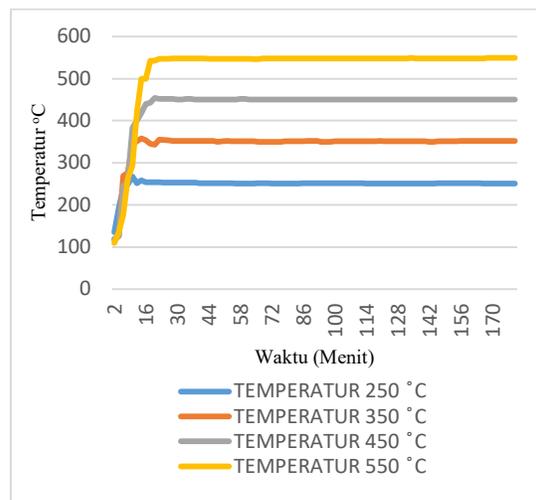
Prosedur pengambilan data menggunakan beberapa tahap yaitu serbuk kayu jati didapat dari industri mebel yang menggunakan serbuk kayu jati. Selanjutnya proses pengayakan untuk menyeragamkan ukuran dari serbuk kayu jati dengan menggunakan *mesh* ukuran 1,18 mm dan 2,36 mm. Volume limbah serbuk kayu jati yang digunakan 200 gram dengan waktu pemanasan selama 3 jam. Sebelum dilakukan proses pirolisis, serbuk kayu diukur kadar air yang terkandung didalamnya, di mana rata-rata dari pengujian kadar air didapatkan kadar air antara 5-8%. Kadar air yang cukup tinggi dapat mempengaruhi hasil tar yang dihasilkan, oleh karena itu perlu dilakukan pengurangan kadar air.

Metode untuk mengurangi kadar air adalah dengan memanaskan serbuk kayu pada suhu $\pm 70^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam. Setelah kadar air turun hingga 0-2%, serbuk kayu siap digunakan dan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Alat yang digunakan untuk mengukur kadar air adalah Shimadzu MOC-120 H dengan prinsip kerja menguapkan air dari material yang diuji. Selanjutnya serbuk kayu jati dimasukkan ke dalam reaktor piroliser. Katup nitrogen dibuka untuk mengalirkan nitrogen ke dalam ruang pemanas piroliser selama lima menit dengan *flow rate* 3 L/menit. Kemudian katup nitrogen ditutup dan selanjutnya mengatur suhu sesuai variabel kajian pada suhu *control*, lalu *heater* pada piroliser dihidupkan selama 3 jam. Selama proses pirolisis berlangsung selama 3 jam, mengamati *flow rate* dari tar dengan cara mengukur di gelas ukur. Setelah didapatkan tar, maka dilakukan pengujian nilai kalor menggunakan *bomb calorimeter* dengan merek Parr 1241 Oksigen Bomb Kalorimeter Standar ASTM D240.

3. Hasil dan Pembahasan

Perubahan Suhu

Pada proses pirolisis suhu pemanasan 250°C suhu konstan didapatkan pada menit ke-8, dikarenakan suhu 250°C merupakan suhu yang tergolong rendah, maka akan cepat tercapai suhu konstan. Pada proses pirolisis temperatur 350°C suhu konstan didapatkan pada menit ke-12, untuk proses pirolisis suhu 450°C didapatkan suhu konstan pada menit ke-14, dan proses pirolisis dengan suhu 550°C , suhu konstannya didapatkan pada menit ke-24.

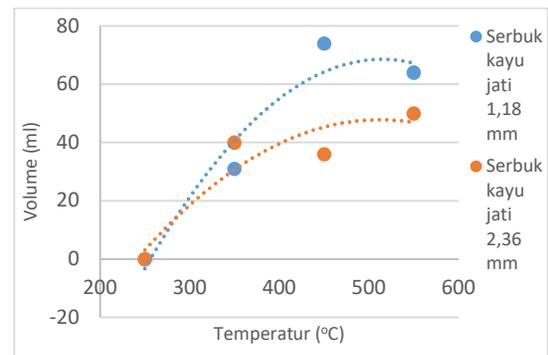


Gambar 2. Grafik hubungan antara waktu dengan suhu pirolisis.

Volume Tar

Laju perubahan suhu (*heat rate*) cenderung konstan dan normal menandakan bahwa proses pirolisis bisa dikatakan seragam untuk variasi suhu akhir yang diinginkan. Pada proses pirolisis ini berlangsung selama 3 jam dengan pengamatan setiap 2 menit, suhu dikontrol melalui *solenoid* yang terhubung dengan

temperature controller menggunakan sensor *thermocouple* yang terletak pada tabung piroliser untuk membaca suhu di dalam tabung. Panas yang dihasilkan untuk pirolisis ini berasal dari kompor gas yang bertekanan, yang diatur oleh *regulator*. *Regulator* dan *solenoid* menjadi satu rangkaian, sehingga ketika suhu belum tercapai pada *temperature setting* maka *solenoid* akan tetap terbuka mengakibatkan api tetap besar dan terus memanaskan piroliser sampai suhu tercapai. Apabila suhu sudah tercapai maka *solenoid* akan menutup. Dapat dilihat dari grafik bahwa setelah pemanasan berjalan beberapa menit suhu dapat ditahan sampai waktu pirolisis selesai tanpa ada perubahan signifikan.

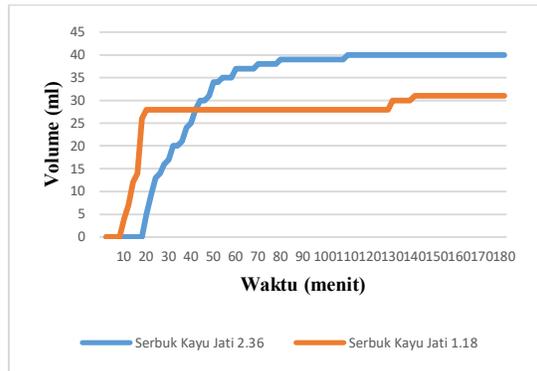


Gambar 3. Grafik hubungan antara suhu dan volume tar.

Gambar 3 menunjukkan volume akhir pada proses pirolisis serbuk kayu jati dengan ukuran 1,18 dan ukuran 2,36 mm, dapat dilihat pada suhu 250°C dari pemanasan tersebut tidak menghasilkan tar, dikarenakan panas belum mampu untuk melakukan pirolisis atau dekomposisi zat pada biomassa. Panas hanya mampu menguapkan sebagian air yang terkandung pada biomassa dan sedikit gas, dikarenakan energi yang dibutuhkan untuk melakukan dekomposisi belum terpenuhi.

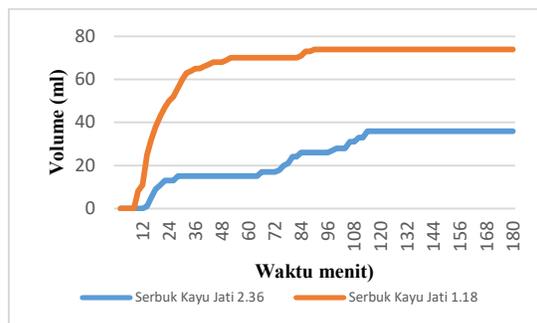
Pada suhu pemanasan 350°C , 450°C dan 550°C sudah menghasilkan tar, namun pada setiap variabel suhu pemanasan, volume yang dihasilkan semakin meningkat, dikarenakan semakin tinggi suhu pemanasan, maka proses dekomposisi kimia berjalan lebih baik dan menghasilkan tar lebih maksimal. Dapat dilihat dari perbandingan kedua ukuran serbuk kayu tersebut bahwa serbuk dengan ukuran yang lebih kecil memiliki volume tar yang lebih banyak. Hal ini dikarenakan semakin kecil ukuran serbuk, maka luas penampang akan semakin besar. Semakin besar ukuran luas penampang, maka laju perpindahan panas antar partikel juga akan semakin meningkat [8], [9]. Semakin besar ukuran partikel, maka akan menurunkan laju reaksi. Hal ini terjadi karena adanya keterbatasan perpindahan massa dan laju pemanasan, di mana partikel yang lebih besar akan mengalami perpindahan panas yang lebih lambat, sehingga jumlah tar akan berkurang [10]. Dapat dilihat pada gambar bahwa volume tar paling tinggi didapatkan pada suhu 450°C sebesar 74 ml. Hal ini sesuai dengan

dasar teori yang menyatakan bahwa suhu 450°C-550°C adalah suhu yang optimal untuk mendapatkan tar.



Gambar 4. Grafik hubungan antara waktu dengan volume tar pada suhu 350°C.

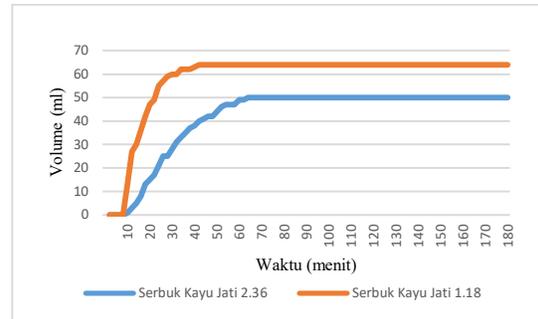
Gambar 4 di atas menunjukkan tar pertama didapatkan pada menit ke-10 pada pirolisis serbuk kayu jati ukuran 1,18 dengan suhu 343°C, dan pada menit ke-14 pada proses pirolisis serbuk kayu jati ukuran 2,36 mm pada suhu 189°C. Perolehan Tar tidak dapat terus menerus secara konstan, namun memiliki jeda yang berbeda-beda hingga akhir pirolisis berlangsung. Hal ini dikarenakan naik turunnya suhu yang diatur oleh *solenoid* melalui pembaca suhu *thermocouple* yang diletakkan di dalam tabung piroliser, sehingga suhu yang ada dalam tabung piroliser tidak konstan selalu naik dan memerlukan waktu yang lebih lama untuk melakukan dekomposisi biomassa dalam tabung piroliser. Dari Gambar 4, didapatkan perbandingan volume dengan serbuk kayu jati ukuran 2,36 mm menghasilkan tar lebih banyak dari pada serbuk kayu jati ukuran 1,18 mm. Pada suhu 350°C pirolisis sudah terjadi namun belum terlalu banyak, zat yang terkandung di dalam kayu seperti selulosa dan hemiselulosa sudah mulai terdekomposisi.



Gambar 5. Grafik hubungan antara waktu dengan volume tar pada suhu 450°C.

Dari Gambar 5 di atas, dapat diketahui bahwa hasil volume perbandingan pirolisis serbuk kayu jati ukuran 1,18 mm dengan serbuk kayu jati ukuran 2,36 mm di dapatkan hasil lebih banyak daripada variabel suhu sebelumnya. Pada suhu 450°C ini didapatkan tar

yang paling banyak, hal ini dikarenakan selulosa, hemiselulosa hampir semuanya terdekomposisi dan sedikit lignin yang terdekomposisi. Lignin mulai terdekomposisi pada suhu 500°C. Pada suhu 450°C ini terjadi *primary cracking* atau dekomposisi utama pada proses pirolisis [11].



Gambar 6. Grafik hubungan antara waktu dengan volume tar pada suhu 550°C.

Dari Gambar 6 di atas, dapat kita ketahui volume terbanyak hasil pirolisis terdapat pada suhu 550°C. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi suhu, maka semakin banyak komponen-komponen biomassa yaitu, selulosa, hemiselulosa dan lignin yang terdekomposisi. Namun pada suhu 550°C volume tar cenderung menurun, hal ini dikarenakan proses pirolisis sudah memasuki fase *secondary cracking*. *Secondary cracking* ini adalah suatu fenomena, di mana tar akan terdekomposisi menjadi gas yang tidak dapat terkondensasi, sehingga volume tar berkurang. Pada suhu tinggi ini zat yang terkandung di dalam tar sebagian besar adalah *phenols* dan *olefin*. Jika suhu pemanasan terus ditambahkan, volume tar tidak akan bertambah namun malah akan terus menurun, karena banyak terjadi *secondary cracking* pada tar terus menerus bahkan bisa terjadi *tertiary cracking*. Di atas suhu 550°C, gas yang tidak bisa terkondensasi akan semakin banyak.

Massa Jenis

Massa jenis tar merupakan massa per satuan volume dari cairan hasil proses pirolisis. Massa jenis dapat dihitung dan mengukur massa serta volume cairan yang didapatkan dari proses pirolisis.

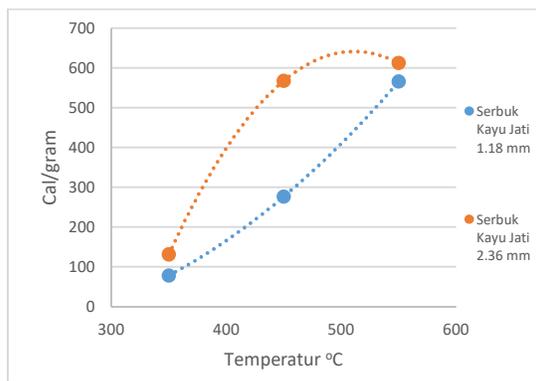
Dari Tabel 1 berikut, dapat dilihat bahwa ada perbedaan antara densitas tar pirolisis dengan biodiesel. Pada suhu 350°C densitas masih cukup tinggi, seiring dengan meningkatnya suhu densitas tar akan semakin turun, hal ini dikarenakan ikatan rantai hidrokarbon yang panjang akan terurai menjadi ikatan rantai hidrokarbon yang lebih kecil. Ikatan rantai hidrokarbon yang kecil menyebabkan densitas dari tar akan semakin menurun.

Tabel 1. Massa jenis tar pirolisis dengan biodiesel dan solar.

Suhu (°C)	Densitas Serbuk Kayu Jati 1,18 (g/ml)	Densitas Serbuk Kayu Jati 2,36 (g/ml)
350	0,935	0,900
450	0,919	0,917
550	0,906	0,900

Nilai Kalor

Pada proses pirolisis serbuk kayu jati 1,18 ml menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya suhu, maka nilai kalor tar yang dihasilkan akan semakin meningkat. Pada suhu 300°C-450°C, dekomposisi selulosa dan hemiselulosa yang memiliki karakteristik dapat menghasilkan cairan yang lebih banyak, hasil cairan ini termasuk tar, sehingga pada puncak 450°C (276 kal/gram). Tar lebih banyak didapatkan daripada uap air, maka tar yang memiliki karakteristik bensol lebih besar daripada zat lainnya.

**Gambar 7.** Pengaruh suhu pirolisis terhadap nilai kalor tar.

Pada proses pirolisis dengan ukuran 2,36 ml nilai kalor tertinggi pada suhu 550°C (612 kal/gram) dan pada proses pirolisis ukuran 1,18 ml didapatkan pada suhu 450°C (276 kal/gram) dikarenakan ukuran 2,36 ml mempunyai sifat karakteristik memberikan perambatan suhu yang cepat dan stabil pada biomassa, dan mampu memecahkan jaringan pada lignin [12]. Sehingga mampu terdekomposisi dan menghasilkan tar dan nilai kalor tertinggi baik dari variabel suhu sebelumnya maupun perbandingan nilai kalor dengan proses pirolisis ukuran 1,18 ml.

Adanya air di dalam reaksi pirolisis adalah hasil dari mekanisme reaksi utama yaitu dari dehidrasi dari struktur biomassa dan terjadinya *secondary cracking* dari biomassa. *Secondary cracking* ini biasanya terjadi pada partikel yang kecil [13]. Semakin kecil ukuran partikel, maka perpindahan panas antar partikel yang terjadi juga akan semakin tinggi, yang menyebabkan suhu dalam partikel tinggi dan menyebabkan *secondary cracking reactions*. Semakin besar ukuran partikel, efek dari *secondary cracking reactions* berkurang menyebabkan kadar air di dalam

tar juga berkurang [14]. Semakin berkurangnya kadar air di dalam tar menyebabkan nilai kalor akan semakin tinggi. Hal ini yang menyebabkan tar pirolisis dengan ukuran partikel/serbuk yang lebih besar memiliki nilai kalor yang lebih tinggi.

Tampilan Fisik Tar

Pada warna spesimen tar, hasil pirolisis tidak terlalu terlihat perbedaan warna di ketiga spesimen ini yaitu tar hasil pirolisis pada suhu 350°C, 450°C dan 550°C cenderung cokelat, dan untuk suhu 250°C sama sekali tidak mengeluarkan tar. Namun, bila diamati dengan sorotan cahaya dari ketiga spesimen tersebut, paling terang pada suhu 550°C dikarenakan hasil dekomposisi dapat dianggap lebih baik daripada suhu lainnya, sehingga hasil volume tar lebih banyak dan abu karbon lebih sedikit. Pada suhu 550°C rantai ikatan karbon terpecah menjadi senyawa yang lebih kecil, sehingga berwarna terang [15], [16].



(a)



(b)

Gambar 8. Warna tar pirolisis serbuk ukuran (a) 1,18 mm dan (b) 2,36 mm.

Dan hasil tar dari ukuran 2,36 mm untuk ketiga warna spesimen tersebut tidak begitu banyak perbedaannya, namun jika kita amati dengan lebih seksama dan juga dengan bantuan sorotan cahaya, maka didapat dari tiga spesimen tersebut yang paling terang didapatkan pada suhu 550°C, dikarenakan tidak begitu tercampur dengan abu karbon dan memperoleh tar terbanyak.

4. Kesimpulan

Dari kajian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa ukuran serbuk kayu jati memiliki pengaruh terhadap volume dan nilai kalor tar. Serbuk kayu jati yang berukuran 1,18 mm menghasilkan volume yang lebih banyak dibanding serbuk kayu jati yang berukuran 2,36 mm. Semakin kecil ukuran serbuk, maka luas penampang di dalam partikel juga akan semakin besar, yang menyebabkan perpindahan panas antar partikel juga meningkat. Pada ukuran serbuk yang kecil sangat memungkinkan terjadinya *secondary cracking reactions*, di mana pada reaksi ini memiliki kadar air yang cukup tinggi. Kadar air yang cukup tinggi inilah yang menyebabkan nilai kalor pada serbuk kayu jati 1,18 mm lebih kecil bila dibandingkan dengan serbuk kayu ukuran 2,36 mm.

Daftar Pustaka

- [1] H. M. Kadlimatti, B. R. Mohan, and M. B. Saidutta, "Biomass and Bioenergy Bio-oil from microwave assisted pyrolysis of food waste-optimization using response surface methodology," *Biomass and Bioenergy*, vol. 123, no. June 2018, pp. 25–33, 2019.
- [2] A. P. Tampubolong, "Study of fuelwood biomass energy policies," *Puslitbang Has. Hutan Bogor*, vol. V, pp. 29–37, 2013.
- [3] E. Erawati, T. W. Kirana, E. Budiyati, and W. B. Sediawan, "Distilasi Asap Cair Hasil Pirolisis Limbah Serbuk Gergaji Kayu Glugu," *Simp. Nas.*, pp. 213–219, 2015.
- [4] L. Teknik *et al.*, "Bio-Oil dari Limbah Padat Sawit," *J. Rekayasa Kim. Lingkung.*, vol. 6, no. 2, pp. 45–49, 2007.
- [5] A. Setiawan, O. Andrio, and P. Coniwanti, "Pengaruh Komposisi Pembuatan Biobriket dari Campuran Kulit Kacang dan Serbuk Gergaji Terhadap Nilai Pembakaran," *J. Tek. Kim.*, vol. 18, no. 2, pp. 9–16, 2012.
- [6] P. Suwandono, W. Wijayanti, and N. Hamidi, "Pengaruh Temperatur Terhadap Entalpi dan Kinetic Rate Gas Pirolisis Kayu Mahoni Pengaruh Temperatur Terhadap Entalpi dan Kinetic Rate Gas Pirolisis Kayu Mahoni," no. May 2015, 2018.
- [7] L. S. Ningsih, "Pembuatan Asap Cair dari Sekam Padi dengan Proses Pirolisa untuk Menghasilkan Insektisida Organik," *J. Teknol. Pertan. Andalas*, vol. 01, no. No. 2, p. 23, 2011.
- [8] S. Luo, B. Xiao, Z. Hu, and S. Liu, "Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 93–97, 2010.
- [9] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory* - Prabir Basu - Google Books. 2013.
- [10] D. Vamvuka, E. Kakaras, E. Kastanaki, and P. Grammelis, "Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite," *Fuel*, vol. 82, no. 15–17, pp. 1949–1960, 2003.
- [11] R. Omar and J. P. Robinson, "Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Conventional and microwave-assisted pyrolysis of rapeseed oil for bio-fuel production," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 105, pp. 131–142, 2014.
- [12] K. K. Zaman *et al.*, "Effect of particle size and temperature on pyrolysis of palm kernel shell," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 118–124, 2018.
- [13] J. Shen, X. S. Wang, M. Garcia-Perez, D. Mourant, M. J. Rhodes, and C. Z. Li, "Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass," *Fuel*, vol. 88, no. 10, pp. 1810–1817, 2009.
- [14] G. Aguilar, P. D. Muley, C. Henkel, and D. Boldor, "Effects of biomass particle size on yield and composition of pyrolysis bio-oil derived from Chinese tallow tree (*Triadica Sebigifera L.*) and energy cane (*Saccharum complex*) in an inductively heated reactor," *AIMS Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 838–850, 2015.
- [15] B. Biswas, R. Singh, J. Kumar, R. Singh, and P. Gupta, "Pyrolysis behavior of rice straw under carbon dioxide for production of bio-oil," *Renew. Energy*, vol. 129, pp. 686–694, 2018.
- [16] J. Wang *et al.*, "Upgraded bio-oil production via catalytic fast co-pyrolysis of waste cooking oil and tea residual," *Waste Manag.*, vol. 60, pp. 357–362, 2017.