

KARAKTERISTIK BIO-OIL DARI LIMBAH INDUSTRI HASIL HUTAN MENGUNAKAN PIROLISIS CEPAT (*Characteristics of Bio-oil Made of Forest Products Waste by Fast Pyrolysis Process*)

Santiyo Wibowo

Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan,
Jl. Gunung Batu No. 5 Bogor Tlp. (0251) 8633378, Fax. (0251) 8633413
E-mail : santiyowibowo1973@yahoo.co.id

Diterima 3 Februari 2015, Direvisi 25 Februari 2015, Disetujui 3 Agustus 2015

ABSTRACT

Petroleum consumption is increasing, while the supply is continuously depleted. Currently, the alternative biofuel such as bioethanol, biodiesel and bio-oil have been developing from various natural sources, including forest product's waste. This paper studies the characteristic of bio-oil made of wastes from forest industries by fast pyrolysis process. Mahogany wood powder, bark and paper sludge were heated in the temperatures of 400°C, 450°C, 500°C, and 550°C to produce bio-oil. Results show that bio-oil can be produced from all three materials studied. Mahogany wood powder which was heated at 550°C produces the highest liquid yield of 25%, yields of bio-oil is 5 %, phenol 3.66%, pH 2.98, specific gravity 1.092 g/cm³, heating value 9,28 MJ/kg. The fast pyrolysis process produces bio-oil which is predominantly composed of acetic acid and phenols.

Keywords: Alternative fuel, bio-oil, waste, fast pyrolysis

ABSTRAK

Konsumsi minyak bumi semakin meningkat, sementara cadangannya semakin menurun. Saat ini, biofuel alternatif seperti bioetanol, biodiesel dan bio-minyak telah berkembang dari berbagai sumber alami, termasuk limbah hasil hutan. Tulisan ini mempelajari karakteristik bio-oil yang terbuat dari limbah dari industri kehutanan dengan proses pirolisis cepat. Serbuk kayu mahoni, kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas dipanaskan pada suhu 400°C, 450°C, 500°C, dan 550°C untuk menghasilkan bio-oil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bio-oil dapat diproduksi dari ketiga bahan tersebut. Serbuk kayu mahoni yang dipanaskan pada 550°C menghasilkan rendemen *liquid* tertinggi sebesar 25%, rendemen bio-oil sebesar 5%, fenol 3,66%, pH 2,98, berat jenis 1,092 g/cm³, nilai kalor 9,28 MJ/kg. Proses pirolisis cepat menghasilkan bio-oil yang sebagian besar didominasi oleh asam asetat dan fenol.

Kata kunci: Bahan bakar alternatif, bio-oil, limbah, pirolisis cepat

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan bahan bakar minyak Indonesia dari tahun ke tahun terus naik, pada tahun 1995 : 15,84 juta kilo liter, tahun 2000 : 21,39 juta kilo liter, tahun 2005 : 27,05 juta kilo liter, pada tahun

2011 sebesar 39,23 juta kiloliter (Outlook Energy Indonesia, 2011) dan pada tahun 2012 sebesar 45 juta kiloliter (Solopos, 2014). Diperkirakan pada tahun 2020 mendatang, Indonesia akan menjadi negara importir bahan bakar minyak (BBM) secara besar-besaran, (Reksowardoyo,

2005). Dari kilang minyak lama, Indonesia pada waktu ini masih mampu memproduksi BBM sebesar 8,7 triliun kubik per hari dan akan terus menurun produksinya. Kekurangan suplai bahan bakar ditutupi oleh kebijakan impor minyak yang akan mengurangi devisa negara. Selain itu terdapat kenaikan harga minyak mentah yang pada tahun 2009 adalah US\$ 90, akan naik secara linier menjadi US\$ 200 pada tahun 2030 (Indonesia Energy Outlook, 2011). Hal ini akan semakin memberatkan APBN apabila tidak segera diatasi.

Permasalahan pemakaian BBM minyak bumi adalah karena sifatnya yang tidak dapat dipulihkan (*non renewable*), oleh karena itu perlu disubstitusi oleh bahan bakar yang dapat dipulihkan antara lain yang berasal dari tanaman pertanian atau kehutanan. Salah satunya adalah bio-oil atau dikenal juga sebagai *pyrolysis oil* atau *biocrude*, yang terbuat dari berbagai bahan berligno selulosa melalui teknologi pirolisis yaitu teknologi degradasi termal pembuatan arang (karbonisasi), tanpa udara (oksigen) dalam proses pembuatannya, dan berlangsung pada suhu 400-700°C. Proses pirolisis bio-oil dapat dilakukan dengan cara lambat (*slow pyrolysis*), cepat (*fast pyrolysis*), dan sangat cepat (*flash pyrolysis*) menggunakan *fix bed reactor*, *circulating*, *bubbling fluidized bed reactor*, *ablatif pyrolysis* dan *free fall reactor* (Senzos, 2003; Onay & Kockar, 2003; Luo, Wang, & Cen, 2005; Mohan, Pittman & Steele, 2006; Ucar & Karagoz, 2009; Ellens & Brown, 2012).

Bio-oil merupakan senyawa *oksigenat* organik yang berbeda-beda dan tidak seperti bahan bakar minyak bumi pada umumnya. Hal ini karena tingginya kadar air, sekitar 15-20% yang berfungsi juga sebagai pengikat ratusan molekul yang berbeda yang disebut sebagai emulsi mikro. *Crude bio-oil* dapat digunakan sebagai pemanas rumah tangga atau boiler untuk pengeringan dan dapat di *up grade* menjadi bahan bakar yang mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dan dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan dalam industri kimia (*oleo-kimia*), seperti *petroleum fuel* (Sudradjat & Hendra, 2011).

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi pembuatan bio-oil dari limbah industri kehutanan menggunakan teknik pirolisis cepat dengan alat *free fall reactor* dan karakteristik bio-oil yang dihasilkan.

II. BAHAN DAN METODE

A. Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk kayu mahoni, kulit kayu mahoni, dan *sludge* kertas. Bahan kimia yang digunakan antara lain metanol, etanol, asam klorida, air suling, asam asetat, natrium tio sulfat, kalium yodida, natrium hidroksida, dan kalium hidroksida.

Peralatan yang digunakan antara lain mesin pembuat serbuk kayu, saringan, reaktor pirolisis bio-oil *free fall pyrolysis*, penampung larutan bio-oil, penampung partikulat, alat distilasi, pengaduk (*stirer*), desikator, pH meter, piknometer, erlenmeyer asah, neraca, dan oven.

B. Prosedur Penelitian

1. Persiapan bahan

Bahan baku kayu dan kulit mahoni diambil dari Ciamis dan *sludge* kertas diambil di Bandung Jawa Barat, selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C sampai kering. Selanjutnya serbuk gergaji diseragamkan ukurannya yaitu antara 60 – 80 mesh dengan kadar air 11%.

2. Pembuatan bio-oil

a. Penelitian pendahuluan untuk mengetahui nilai rendemen

Reaktor dipanaskan sampai mencapai suhu sesuai perlakuan 400°C, 450°C, 500°C, dan 550°C. Setelah suhu tercapai selanjutnya serbuk kayu dengan ukuran 60-80 mesh dan 80-100 mesh, dimasukkan ke dalam reaktor. Cairan yang keluar dihitung rendemennya.

b. Penelitian utama

Hasil optimum ukuran yang terbaik dari penelitian pendahuluan dilanjutkan yaitu dengan 3 jenis limbah biomassa; serbuk kayu mahoni, *sludge* kertas dan kulit kayu mahoni dan 4 level suhu; 400°C, 450°C, 500°C, dan 550°C.

c. Pemurnian bio-oil

Bio-oil yang ada dalam penampungan masih kotor, oleh karena itu masih harus dimurnikan dengan menggunakan kertas saringan.

3. Pengujian

Pengujian dilakukan terhadap sifat fisiko-kimia yaitu : rendemen (arang SNI 01-1682-1996, cairan atau *liquid* bio-oil, dan gas), berat jenis, pH (SNI

06-2413-1991), kadar fenol (SNI 06-2469-1991), nilai kalor (*calorimeter bomb*), daya nyala (Wibowo, 2013) dan sifat kimia menggunakan GCMS.

C. Analisis Data

Analisis data pada penelitian pendahuluan dilakukan secara deskriptif dan tabulasi. Perlakuan yang dilakukan dalam penelitian utama terdiri dari 2 faktor yaitu : Faktor jenis bahan baku (A) dengan 3 jenis bahan baku; serbuk mahoni (A_1), kulit kayu mahony (A_2) dan *sludge* (A_3), dan faktor suhu pirolisis (B) dengan 4 level yaitu 400°C (B_1), 450°C (B_2), 500°C (B_3), dan 550°C (B_4). Pengujian statistik menggunakan rancangan percobaan acak lengkap faktorial, 2 kali ulangan. Jumlah total kombinasi perlakuan adalah $3 \times 4 \times 2 = 24$ (Sudjana, 1980).

Model rancangan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = Hasil pengamatan untuk faktor A level ke-i, faktor B level ke-j, pada ulangan ke-k
 μ = Rataan umum
 α_i = Pengaruh faktor A pada level ke-i
 β_j = Pengaruh faktor B pada level ke-j
 $(\alpha\beta)_{ij}$ = Interaksi antara A dan B pada faktor A level ke-i, faktor B level ke-j

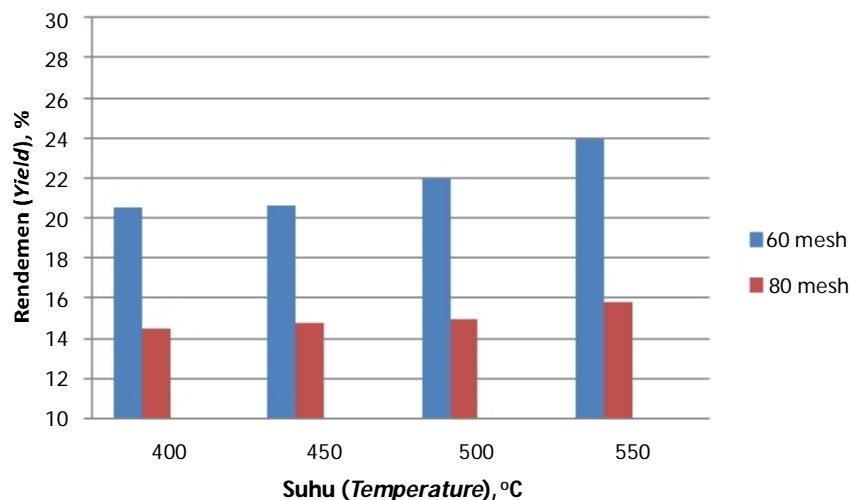
ε_{ijk} = Galat percobaan untuk faktor A level ke-i, faktor B level ke-j pada ulangan/kelompok ke-k

Jika hasil analisis sidik ragam menunjukkan perbedaan nyata, maka dilanjutkan dengan uji lanjut Duncan (Sudjana 1980).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk mengetahui pengaruh ukuran serbuk terhadap rendemen *liquid* yang dihasilkan. Penelitian dilakukan pada serbuk gergaji dengan ukuran 60-80 dan 80-100 mesh dengan suhu 400, 450 500°C dan 550°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa serbuk gergaji dengan ukuran lolos ayakan 60 mempunyai rendemen lebih tinggi dibandingkan serbuk gergaji dengan ukuran lolos ayakan 80. Pada serbuk dengan ukuran yang lebih halus (lolos ayakan 80 tertahan di 100 mesh), terjadi penggumpalan pada saat keluar dari *screw feeder* menuju reaktor pemanas, yang menyebabkan serbuk tidak terbakar sempurna. Sedangkan pada ukuran 60 mesh, terbakar dengan baik dan serbuk tidak menggumpal. Bahan baku yang masuk ke dalam reaktor pirolisis akan langsung terbakar dan menghasilkan gas dan asap yang mengandung uap



Gambar 1. Rendemen cairan yang dihasilkan pada suhu 400-550 °C pada ukuran serbuk 60 dan 80 mesh

Figure 1. The yield of liquid produced at temperatures 400-550°C in 60 and 80 mesh

air. Hal ini diduga pada ukuran serbuk yang lebih halus (80 mesh), asap yang dihasilkan akan kontak dengan bahan baku yang masuk berikutnya yang menyebabkan serbuk terionisasi sehingga bermuatan negatif (-) dan serbuk dapat menempel pada dinding atas reaktor yang bermuatan positif (+), karena adanya listrik pemanas di dinding reaktor. Banyaknya serbuk halus yang menempel dapat menyebabkan *screw feeder* tersumbat. Hal ini dibuktikan dengan adanya asap yang keluar melalui *screw feeder*. Sedangkan pada ukuran serbuk 60 mesh, meskipun ada kontak dengan asap yang dihasilkan, akan tetapi karena serbuk berukuran lebih besar sehingga akan lebih ditarik oleh gaya grafitasi menuju wadah penampung arang.

Sehingga pada penelitian selanjutnya digunakan perlakuan dengan ukuran serbuk lolos ayakan 60.

B. Penelitian Utama

1. Rendemen

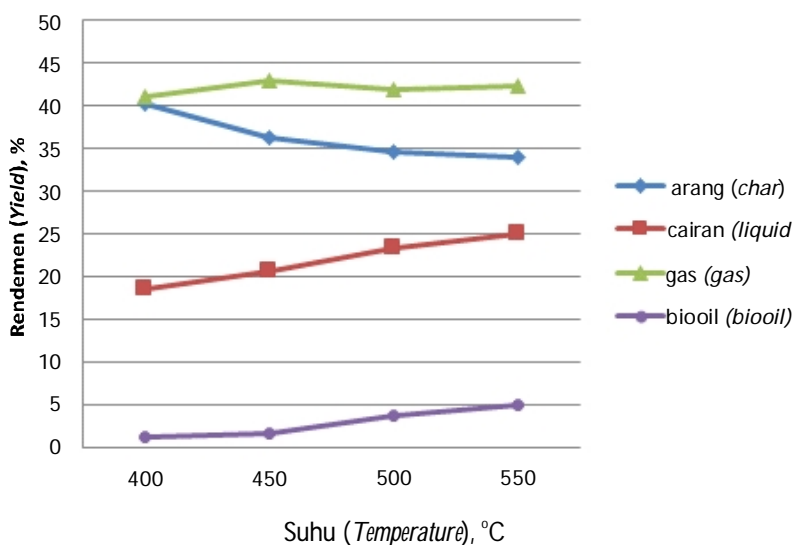
Rendemen produk pirolisis serbuk kayu mahoni, serbuk kulit mahoni dan serbuk *sludge* pada temperatur 400°C, 450°C dan 500°C dan 550°C menggunakan *free fall pyrolysis* dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2 dan 3. Dari hasil analisis diketahui bahwa rendemen arang yang dihasilkan berkisar antara 32,67-53,67% dengan rendemen terbesar diperoleh dari sampel *sludge* kertas pada perlakuan suhu 400°C dan terkecil diperoleh dari sampel serbuk kayu mahoni pada

Tabel 1. Rendemen produk pirolisis cepat serbuk mahoni, kulit kayu mahoni dan *sludge*
Table 1. Fast Pyrolysis yield of mahogany wood powder, mahogany bark powder and sludge

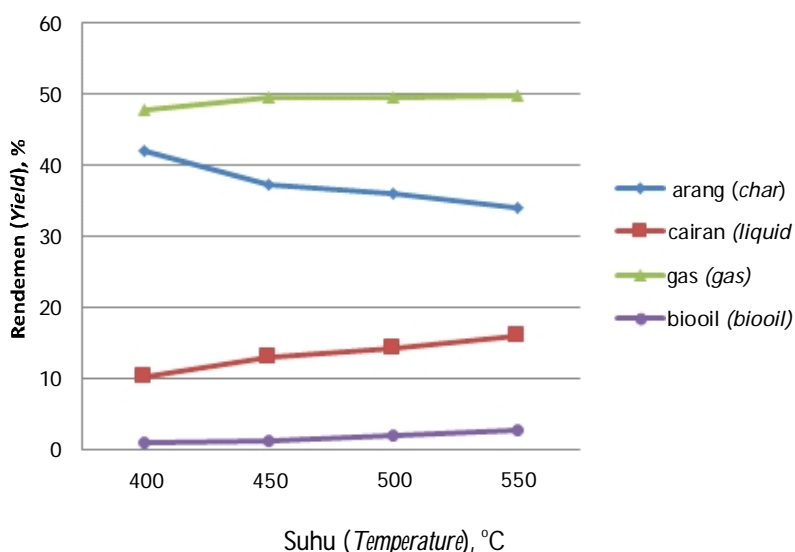
Produk (Product) %	Sampel (Sample)	Suhu (Temperature), °C			
		400	450	500	550
Arang (Charcoal)	Serbuk kayu mahoni (Mahogany wood powder)	40,33	36,33	34,67	32,67
	Kulit kayu mahoni (Mahogany bark powder)	42	37,33	36	34
	Sludge (Sludge)	53,67	52,83	51,33	50,67
Cair (Liquid)	Serbuk kayu mahoni (Mahogany wood powder)	18,68	20,67	23,34	25
	Kulit kayu mahoni (Mahogany bark powder)	10,3	13,07	14,34	16,1
	Sludge (Sludge)	4,6	5,27	6	7,33
Bio-oil (Bio-oil)	Serbuk kayu mahoni (Mahogany wood powder)	1,23	1,67	3,7	5
	Kulit kayu mahoni (Mahogany bark powder)	0,93	1,41	2	2,67
	Sludge (Sludge)	0,27	0,37	0,5	0,72
Gas (Gas)	Serbuk kayu mahoni (Mahogany wood powder)	41	43	42	42,33
	Kulit kayu mahoni (Mahogany bark powder)	47,8	49,6	49,67	49,9
	Sludge (Sludge)	42	42,67	41,9	41,83

perlakuan suhu 550°C. Tingginya rendemen arang *sludge* kertas dapat disebabkan oleh karakteristik bahan *sludge* yang sudah bercampur dengan lumpur kaolin sebagai bagian dari proses pengolahan kertas. Rendemen gas berkisar antara 41 - 49,9% dengan rendemen terbesar diperoleh pada dari sampel kulit kayu mahoni pada perlakuan suhu 550°C dan terkecil diperoleh dari sampel serbuk kayu mahoni pada perlakuan suhu 400°C. Tinggi rendahnya asap dapat disebabkan oleh perbedaan kandungan kimia dari jenis bahan baku yang digunakan.

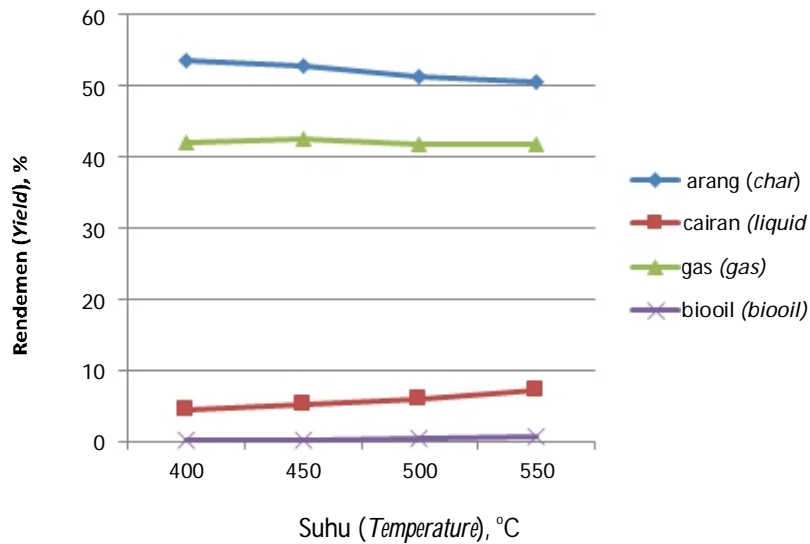
Liquid atau cairan hasil pirolisis merupakan gabungan antara produk cair (terdiri dari asam pyrolignic atau cuka kayu) dan fase minyak (tar kayu atau *pyrolitic oil*) (Sensoz, 2003). *Liquid* yang dihasilkan berkisar antara 4,6 - 25% dengan rendemen terbesar diperoleh dari serbuk kayu mahoni pada perlakuan suhu 550°C yaitu sebesar 25% dan yang terkecil dihasilkan dari sampel *sludge* pada suhu 400°C. Rendahnya rendemen cairan *sludge* diduga disebabkan karakteristik bahan *sludge* kertas yang sudah melalui proses pengolahan dan penambahan bahan lain seperti



Gambar 2. Rendemen produk pirolisis serbuk kayu mahoni
Figure 2. Pyrolysis products yield of mahogany wood powder



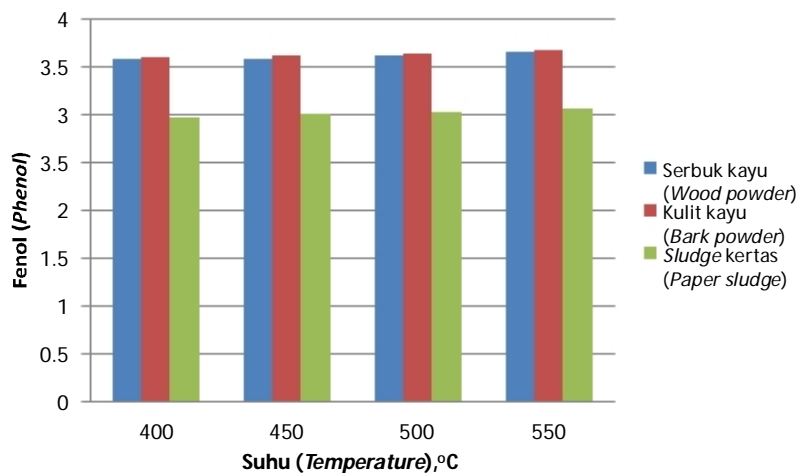
Gambar 3. Rendemen produk pirolisis kulit kayu mahoni
Figure 3. Pyrolysis products yield of mahogany bark powder



Gambar 4. Rendemen produk pirolisis *sludge* kertas
Figure 4. Pyrolysis products yield of paper *sludge*

kaolin dan zat kimia lainnya sehingga kandungan kimia *sludge* berkurang. Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa faktor suhu dan jenis bahan baku berpengaruh nyata terhadap rendemen bio-oil. Uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa tidak semua perlakuan berbeda nyata, terdapat perlakuan yang tidak berbeda nyata (Lampiran 2 dan 3). Pada bahan baku kayu mahoni semua perlakuan suhu memberikan hasil berbeda nyata dengan bahan lainnya. Pada kulit kayu mahoni, antara suhu 450°C dan 500°C tidak berbeda nyata tetapi berbeda nyata dengan suhu lainnya. Hal ini

diduga karena karakteristik kulit kayu mahoni yang berbeda dengan bahan lainnya. Sedangkan *sludge* kertas pada suhu 400°C, 450°C dan 500°C tidak berbeda nyata, hal ini dapat disebabkan oleh karakteristik *sludge* kertas yang sudah melalui proses pengolahan kimia dan penambahan kaolin sehingga kandungan selulosa dan lignin sudah berkurang. Menurut Mohan, Pittman, dan Steele, (2006) dan Ucar dan Karagoz (2009), rendemen bio-oil tergantung dari jenis bahan baku yang digunakan, kandungan kimia dalam bahan baku, dan peralatan pirolisis serta suhu yang digunakan.



Gambar 5. Kadar fenol bio-oil serbuk kayu, kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas suhu 400 – 550°C
Figure 5. Bio-oil phenol content of mahogany wood and bark powder, and paper *sludge* in 400 – 550°C

2. Kadar Fenol

Tabel 2 menunjukkan bahwa kadar fenol bio-oil terendah diperoleh pada sampel sludge kertas dengan suhu 400°C yaitu 2,89% dan kadar fenol tertinggi diperoleh pada sampel serbuk kayu dengan suhu 550°C. Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa suhu dan jenis bahan baku berpengaruh nyata terhadap kadar fenol. Sementara itu uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa tidak semua perlakuan berbeda nyata, terdapat perlakuan yang tidak berbeda nyata (Lampiran 2 dan 3). Ada kecenderungan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis kadar fenol semakin

bertambah besar. Hal ini disebabkan dengan suhu tinggi, kestabilan lignin terurai atau terpecah dari bahan baku dan bercampur dengan cairan hasil pirolisis. Menurut Girard (1992) kandungan fenol dalam cairan hasil pirolisis dipengaruhi oleh kandungan lignin bahan dan suhu pirolisis. Lignin pada dasarnya adalah suatu fenol yang sangat stabil dan sukar dipisahkan dan mempunyai bentuk yang bermacam-macam, sehingga baru akan terurai pada suhu tinggi seperti pada proses pirolisis suhu 300-500°C (Djarmiko, Ketaren, & Setyahartini, 1985; Maga, 1987; Haygreen & Bowyer, 1996).

Tabel 2. Karakteristik bio-oil serbuk kayu dan kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas
Table 2. Bio-oil characteristics of mahogany wood and bark powder and paper sludge

Parameter (Parameters)	Sampel (Sample)	Suhu (Temperature), °C			
		400	450	500	550
Fenol (Phenol) %	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)	3,58	3,59	3,62	3,66
	Kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)	3,61	3,63	3,65	3,68
	Sludge (<i>Sludge</i>)	2,97	3,01	3,03	3,06
pH	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)	3,22	3,17	3,13	2,98
	Kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)	3,25	3,24	3,21	3,19
	Sludge (<i>Sludge</i>)	3,37	3,35	3,34	3,31
Bj g/cm ³	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)	1,091	1,091	1,092	1,092
	Kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)	1,089	1,087	1,088	1,088
	Sludge (<i>Sludge</i>)	1,086	1,086	1,087	1,089
Nilai kalor (Calorific value) MJ/kg	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)	ttd*	ttd	8,97	9,28
	Kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)	ttd	ttd	ttd	ttd
	Sludge (<i>Sludge</i>)	ttd	ttd	ttd	ttd
Daya nyala (<i>Flame power</i>)	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Sedang (<i>Medium flame</i>)
	Kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)	Tidak menyala (<i>Not flame</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)
	Sludge (<i>Sludge</i>)	Tidak menyala (<i>Not flame</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)	Lambat (<i>Slow</i>)

*ttd : tidak terdeteksi (*undetected*)

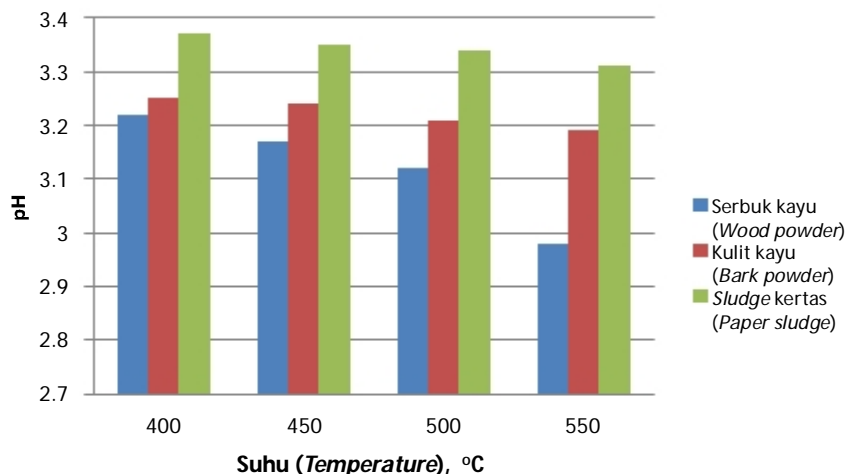
3. pH Bio-oil

Tabel 2 dan Gambar 6 menunjukkan pH bio-oil serbuk gergaji mahoni, kulit mahoni dan *sludge* yang berkisar antara 2,98-3,37. pH terendah terapat pada suhu 550°C dengan sampel serbuk kayu mahoni yaitu sebesar 2,98 dan pH tertinggi diperoleh pada sampel *sludge* kertas pada suhu 400°C yaitu sebesar 3,37. Derajat keasaman bio-oil disebabkan adanya kandungan asam organik yang dihasilkan dalam proses pirolisis. Hasil GCMS (Lampiran 1) menunjukkan adanya asam asetat, asam formic dan asam propanoik. Bio-oil yang dihasilkan dari serbuk kayu lebih asam dibandingkan cairan dari *sludge* kertas. Hal ini diduga karena perbedaan karakteristik bahan baku, serbuk kayu dan kulit kayu belum mengalami proses pengolahan secara kimia jika dibandingkan dengan *sludge* kertas yang sudah mengalami proses pengolahan secara kimiawi. Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa suhu dan bahan baku serta interaksi keduanya berpengaruh nyata terhadap pH bio-oil. Sementara itu hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa tidak semua perlakuan berbeda nyata terdapat perlakuan yang tidak berbeda nyata (Lampiran 2 dan 3). Keasaman bio-oil yang cukup tinggi yaitu antara 2,5 sampai 3,0 (Easterly, 2002), mensyaratkan

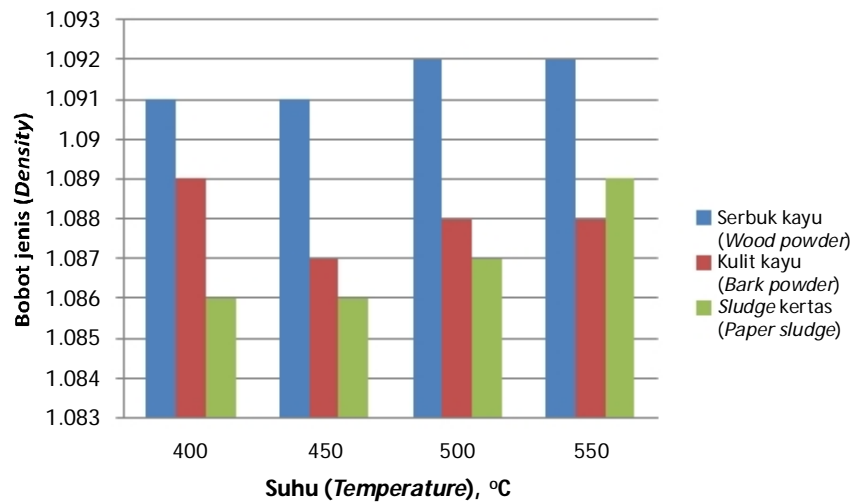
penanganan penyimpanan bio-oil menggunakan bahan yang tahan karat, seperti stainless steel, gelas kaca, plastik, dan fiberglass.

4. Bobot Jenis

Density atau bobot jenis bio-oil yang diperoleh dari sampel serbuk kayu, kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas pada suhu 400-550°C berkisar antara 1,086-1,092 g/cm³ (Tabel 2). Berdasarkan analisis sidik ragam menunjukkan bahwa faktor suhu dan bahan baku serta interaksi keduanya berpengaruh nyata (Lampiran 2). Sementara itu hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa pada bahan *sludge* kertas suhu 400°C tidak berbeda nyata dengan suhu 450 dan 500°C tapi berbeda nyata dengan suhu 550°C. Hal ini diduga disebabkan rentang suhu 50-100°C belum berpengaruh terhadap dihasilkannya senyawa dengan berat molekul tinggi, sehingga bobot jenis bio-oil pada rentang suhu 400-500°C relatif sama. Secara umum hasil ini lebih rendah dari penelitian Sensoz (2003) yang menghasilkan density bio-oil kulit kayu *Pinus brutia* Ten sebesar 1,2 g/cm³. Ini menunjukkan bahwa bio-oil yang dihasilkan menggunakan *free fall pyrolysis* pada suhu 400-550°C, belum banyak menghasilkan fraksi dengan berat molekul tinggi, yang ditunjukkan dengan rendahnya kadar bio-oil yang dihasilkan (Tabel 1).



Gambar 6. pH bio-oil serbuk kayu, kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas suhu 400 – 550°C
Figure 6. Bio-oil pH content of mahogany wood and bark powder, and paper sludge in 400 – 550°C



Gambar 7. Bobot jenis bio-oil serbuk kayu, kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas suhu 400 – 550°C.

Figure 7. Bio-oil density of mahogany wood and bark powder, and paper sludge in 400 – 550°C

5. Nilai kalor

Nilai kalor pembakaran menunjukkan energi kalor yang dikandung dalam tiap satuan massa bahan bakar. Tabel 2 menunjukkan hanya nilai kalor bio-oil dari serbuk kayu mahoni pada perlakuan 500°C dan 550°C yang dapat dideteksi alat *calorimeter bomb* yaitu 8,97 dan 9,28 MJ/kg, sedangkan perlakuan 400 dan 450°C serta sampel kulit kayu dan *sludge* kertas tidak terdeteksi nilai kalornya. Hal ini diduga disebabkan oleh rendahnya kadar bio-oil yang dihasilkan dan tingginya kadar air (komponen cuka kayu) di dalam sampel. Hasil penelitian bio-oil sengon dengan proses pirolisis lambat menghasilkan nilai kalor 22,42 MJ/kg (Wibowo, 2013). Sedangkan penelitian Onay dan Kockar (2006) dalam pembuatan bio-oil dari biji *rapeseed* menghasilkan bio-oil dengan nilai kalor sebesar 37,9 MJ/kg. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan bahan baku dan model alat pirolisis yang digunakan.

6. Daya nyala

Pengujian daya nyala dilakukan untuk mengetahui kemampuan bio-oil untuk menyala bila diberi sumber api. Daya nyala bio-oil serbuk kayu mahoni, kulit kayu dan *sludge* menggunakan *free fall pyrolysis* dapat dilihat pada Tabel 2. Terdapat sampel yang tidak dapat menyala yaitu sampel kulit kayu dan *sludge* pada suhu 400°C. Hal ini diduga disebabkan oleh rendahnya kadar bio-

oil dan tingginya kandungan air (cuka kayu) yang terdapat di dalam sampel bio-oil tersebut. Selain itu pada suhu lebih rendah kandungan bahan mudah terbakar lebih rendah dibandingkan bio-oil yang dihasilkan pada suhu tinggi. Sampel bio-oil serbuk kayu mahoni suhu 550°C mempunyai kemampuan menyala sedang, sedangkan sampel lainnya termasuk dalam katagori lambat.

Kemampuan nyala bio-oil serbuk kayu mahoni, kulit kayu dan *sludge* kertas masih di bawah kemampuan nyala bio-oil serbuk kayu sengon hasil pirolisis lambat 350-500°C yang semuanya dapat menyala meskipun hanya dalam nyala katagori lambat-sedang (Wibowo, 2013). Hal ini dapat terjadi karena perbedaan bahan baku dan peralatan pirolisis yang digunakan.

7. Hasil GCMS

Komponen kimia bio-oil serbuk kayu mahoni menggunakan proses *free fall pyrolysis* pada suhu 550°C terdapat 38 komponen, yang didominasi oleh asam asetat, golongan phenol, golongan 1-hydroxy 2-Propanone, furfural dan benzene. Komponen kimia bio-oil kulit kayu mahoni pada suhu 550°C terdapat 35 komponen, yang juga didominasi oleh asam asetat, golongan phenol, golongan 1-hydroxy 2-Propanone, furfural dan benzene. Komponen kimia bio-oil *sludge* kertas menggunakan proses *free fall pyrolysis* pada suhu 550°C terdapat 34 komponen, yang didominasi

oleh asam asetat, 1-hydroxy 2-Propanone, phenol, dan benzene.

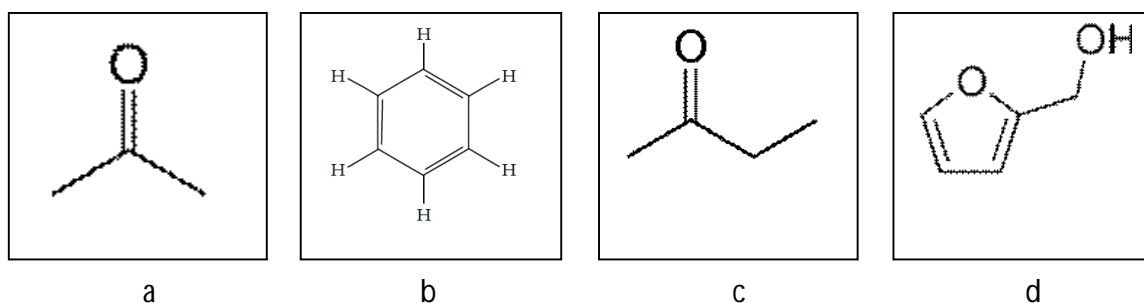
Dari hasil analisis GCMS (Lampiran 1) dapat dilihat bahwa bio-oil yang dihasilkan dari serbuk kayu, kulit kayu mahoni dan *sludge* kertas pada suhu 550°C menggunakan proses *free fall pyrolysis* masih banyak mengandung komponen asap cair seperti asam asetat, propionat dan komponen fenol. Ini tidak berbeda dengan bio-oil yang dihasilkan dari serbuk kayu sengon (Wibowo, 2013). Asam asetat berperan penting dalam produksi etanol di mana dua pertiga energi di dalam etanol berasal dari asam asetat, dan sepertiganya berasal dari penambahan hidrogen (Kanellos, 2009).

Fenolatau fenil alkohol (C_6H_5OH) merupakan zat padat berbentuk kristal yang tidak berwarna dan mudah terlarut baik di dalam air. Fenol memiliki sifat yang cenderung asam, artinya ia dapat melepaskan ion H^+ dari gugus hidroksilnya. Dibandingkan dengan alkohol alifatik lainnya, fenol bersifat lebih asam.

Terdapat komponen yang termasuk bahan bakar mudah terbakar yaitu 1-hydroxy 2-propanone atau aseton, benzene, dan turunan furfural yaitu 1dan 2- furfuryl alkohol. Aseton adalah senyawa berbentuk cairan yang tidak berwarna, mudah menguap, mudah terbakar dan mudah larut dalam pelarut polar, mempunyai rumus molekul C_3H_6O , titik didih 56°C. Aseton digunakan untuk membuat plastik, serat, obat-obatan, dan senyawa-senyawa kimia lainnya. Benzene merupakan senyawa kimia organik berupa cairan tidak berwarna dan mudah terbakar

serta merupakan salah satu jenis hidrokarbon aromatik siklik dengan rumus kimia C_6H_6 yang memiliki 6 atom karbon yang membentuk cincin, dengan 1 atom hidrogen berikatan pada setiap 1 atom karbon. Benzene adalah salah satu komponen dalam minyak bumi, dan merupakan salah satu bahan petrokimia yang paling dasar serta pelarut yang penting dalam dunia industri. Benzene mempunyai bilangan oktan yang tinggi, sehingga benzene digunakan juga sebagai salah satu campuran penting pada bensin. Pemanfaatan benzene lainnya adalah sebagai bahan dasar dalam produksi obat-obatan, plastik, bensin, karet buatan, dan pewarna. Terdapat juga turunan furfural yaitu furfuryl alkohol ($C_5H_6O_2$) yang termasuk bahan mudah terbakar dan telah digunakan sebagai bahan bakar roket.

Furfural merupakan zat cair tak berwarna yang termasuk senyawa organik dari golongan furan. Furfural dimanfaatkan dalam industri antara lain pengolahan minyak, pembuatan nilon, pembuatan resin, farmasi, dan lain-lain. Furfural dapat dihasilkan dari limbah pertanian maupun perkebunan seperti tongkol jagung, kulit gandum, sekam padi, ampas tebu, tandan kosong kelapa sawit dengan proses hidrolisis dan destilasi uap menggunakan bantuan asam atau enzim sebagai katalis. Selanjutnya terdapat 2- butanone (C_4H_8O) yang merupakan cairan tidak berwarna, berbau seperti aseton, mempunyai titik didih 80°C dan sangat mudah terbakar (Fessenden & Fessenden, 1992; Riswiyanto, 2009; Ardiana & Mitarlis, 2012; Pubchem, 2009).



Gambar 8. Aseton (a), benzene (b), butanone (c), furfuryl alkohol (d)
Figure 8. Acetone (a), benzene (b), butanone (c), Furfuryl alcohol (d)

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Pembuatan bio-oil dari serbuk kayu, kulit kayu dan sludge menggunakan teknik pirolisis *free fall pyrolysis* dengan suhu 400–550°C, diperoleh rendemen bio-oil berkisar antara 1–5%, kadar fenol 2,97–3,68%, pH 2,98– 3,37, berat jenis 1,086–1,092 g/cm³, nilai kalor 8,97- 9,28 MJ/kg (hanya sampel serbuk kayu pada suhu 500 dan 550°C), dan daya nyala termasuk dalam katagori tidak terbakar sampai katagori sedang. Bio-oil yang dihasilkan didominasi oleh asam-asam terutama asam asetat, dan fenol serta terdapat beberapa komponen zat yang mudah terbakar yaitu aseton, benzene, dan furfural alkohol.

Perlakuan yang menghasilkan bio-oil tertinggi adalah suhu 550°C dengan bahan baku serbuk kayu mahoni yang mempunyai karakteristik; rendemen liquid 25%, rendemen bio-oil sebesar 5%, kadar fenol 3,66%, pH 2,98, bobot jenis 1,092 g/cm³, nilai kalor 9,28 MJ/kg dan daya nyala lambat.

B. SARAN

Bio-oil dari limbah biomasa merupakan sumber energi terbarukan yang cukup prospektif sebagai salah satu upaya memanfaatkan limbah industri kehutanan dan pertanian. Meskipun demikian, perlu pemilihan teknik pengolahan yang tepat untuk menghasilkan karakteristik bio-oil yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Untuk pirolisis *free fall reactor* disarankan ukuran bahan baku di bawah 80 mesh dan suhu 550°C. Disarankan perlu penelitian lanjutan pembuatan bio-oil dengan memperbaiki kinerja atau memodifikasi alat pirolisis *free fall pyrolysis* tipe 1, untuk meningkatkan rendemen dan mutu bio-oil yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

Ardiana, R., & Mitarlis. (2012). Pemanfaatan kulit buah siwalan (*Borassus flabellifer* L.) sebagai bahan dasar pembuatan furfural. *UNESA Journal of Chemistry*, 1(2), September 2012.

- Brown, R.C. & Holmgren, J. (2012). *Fast Pyrolysis and bio-oil upgrading*. <http://www.ascension-publishing.com/BIZ/HD50.pdf>, diakses 27 Februari 2012.
- Djarmiko, B., Ketaren, S., & Setyahartini, S. (1985). *Pengolahan arang dan kegunaannya*. Bogor: Agro Industri Press.
- Easterly J.L. (2002). Assessment of bio-oil as a replacement for heating oil. CONEG Policy Research Center, Inc.
- Ellens, C.J., & Brown, R.C. (2012). Optimization of a free-fall reactor for the production of fast pyrolysis bio-oil. *Bioresources Technology*, 103, 374-380.
- Fessenden, R.J., & Fessenden, J.S. (1992). *Kimia organik*, Terjemahan oleh Aloysius Hadyana Pudjaatmaka, (Edisi Kedua). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Girard, J.P. & Morton, I. (1992). Smoking. Dalam Girard J.P. & I. Morton (Eds). *Teknologi of meat and meat products*. New York: Ellis Horwood Limited.
- Hambali, E., Mujdalifah, S., Tambunan, A.H., Pattiwiri, A.W., & Hendroko, R. (2007). *Teknologi bioenergi*. Jakarta: Agro Media Pustaka.
- Haygreen, J.G. & Bowyer, J.L. (1996). Hasil hutan dan ilmu kayu Suatu pengantar. Hadikusomo S.A., (Penerjemah); Yogyakarta. Gajah Mada University Press. Terjemahan dari: *Forest product and wood science, an introduction*.
- Kanellos M. (2009). Fuel from vinegar? Zechem Gets \$34M to Try it Out. <http://www.greentechmedia.com/articles/read/fuel-from-vinegar-zechem-gets-34m-to-try-it-out-5472/>, diakses tanggal 3 Desember 2012.
- Krause, R. (2001). Bio and alternative fuels for mobility. Enhancing biodiesel development and use. *Proceedings of the International Biodiesel Workshop*, Tiara Convention Center, Medan. 24 Oktober 2001. Ditjen Perkebunan, Departemen Pertanian. Jakarta.

- Luo, Z., Wang, S. & Cen, K. (2005). A model of wood flash pyrolysis in fluidized bed reactor. *Renewable Energy*, 30, 377-392.
- Mohan, D., Pittman, Jr., C.U. & Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 20, 848-889.
- Onay, O. & Kockar, O.M. (2006). Pyrolysis of rapeseed in a free fall reactor for production of bio-oil. *Fuel*, 85, 1921-1928.
- Outlook Energy Indonesia. (2011). Energi masa depan di sektor transportasi dan kelistrikan. Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya dan Energi. Jakarta: BPPT-Press.
- Pubchem. (2009). 2-butanone. <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2-Butanone>, diakses 10 Januari 2015.
- Reksowardoyo, R. P. (2005, November). *Melaju kendaraan berkat biji-bijian*. Trubus, XXXVI/November 2005
- Riswiyanto. (2009). *Kimia organik*. Jakarta: Erlangga.
- Samiarso, L. (2001). Indonesian policy on renewable energy development Enhancing biodiesel development and use. *Proceedings of the International Biodiesel Workshop*, Tiara Convention Center, Medan. 24 Oktober 2001. Jakarta: Ditjen Perkebunan, Departemen Pertanian.
- Sensoz, S. (2003). Slow pyrolysis of wood bark from *Pinus bruti* Ten. end product compositions. *Jurnal Bioresource Technology*, 89, 307-311.
- Standari Nasional Indonesia (SNI). (1996). *Arang tempurung kelapa*. (SNI 01-1682-1996). Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (1991). *Metode pengujian kadar padatan dalam air*. (SNI 06-2413-1991). Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (BSN). (1991). *Metode pengujian kadar fenol*. (SNI 06-2469-1991). Badan Standarisasi Nasional.
- Solopos. (2014). Konsumsi BBM. <http://www.solopos.com/2013/01/06/konsumsi-bbm-kebutuhan-terus-meningkat-imporminyak-indonesia-2013-bakal-membengkak-365108>, diakses tanggal 30 April 2014.
- Sudjana. (1980). *Disain dan analisis eksperimen*. Bandung: Tarsito.
- Sudradjat, R., & Hendra, D. (2011). Teknologi pengolahan bahan bakar nabati berbasis selulosa dan hemiselulosa (bio-oil). *Laporan Hasil Penelitian*. Bogor. Pusat Penelitian dan Pengembangan Keteknikan Kehutanan dan Pengolahan Hasil Hutan.
- Wibowo, S. (2013). Karakteristik bio-oil serbuk gergaji sengon (*Paraserianthes falcataria* L. Nielsen) menggunakan proses pirolisis lambat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 31, 4, 258-270.
- Ucar, S., & Karagoz, S. (2009). The slow pyrolysis of pomegranate seeds: The effect of temperature on the product yields and bio-oil properties. *Jurnal Analytical Applied Pyrolysis*, 84, 151-156.

Lampiran 1 : Komponen kimia bio-oil pada 550 °C
Appendix 1 : Chemical compound of bio-oil in 550 °C

Peak	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)			Serbuk kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)			Sludge (<i>Sludge powder</i>)		
	R:Time	Name	Conc. (%)	R: Time	Name	Conc. (%)	R:Time	Name	Conc. (%)
1	1.363	Formic acid	0,64	1.357	Carbamic acid methyl ester	1,46	1.361	Formic acid	1,45
2	1.435	Acetone	2,62	1.432	2-propanon	1,56	1.389	1,2-Ethanediol, monoformic	1,48
3	1.475	Acetic acid, methyl ester	7,01	1.469	Acetic acid, methyl ester	6,38	1.435	Acetone	2,57
4	1.509	Formic acid	0,64	1.532	Formic acid	1,01	1.477	Acetic acid, methyl ester	7,51
5	1.567	2,3-Butanedione	3,66	1.547	2,3-Butanedione	3,42	1.571	2,3-Butanedione	4,73
6	1.598	2-butanone	1,71	1.590	2-Butanone	1,89	1.597	Butan-2-one	1,50
7	1.740	Ethylacetic acid	36,96	1.769	Acetic acid (CAS) Ethylacetic acid	34,42	1.719	Acetic acid	31,31
8	1.792	2-Propanone, 1-hydroxy-	1,04	1.821	4-Pentene-2-one	0,84	1.747	2-Butanal	0,53
9	1.824	3-penten-2-one	0,32	1.877	2-Propanone, 1-hydroxy-	8,77	1.797	2-Propanone, 1-hydroxy-	2,67
10	1.855	2-propanon, 1-hydroxy	7,45	1.989	Propanoic acid	1,05	1.844	Acetic acid	7,21
11	1.970	propanoic acid	1,10	2.220	2-methoxytetrahydrofuran	0,25	1.955	Propanoic acid	0,92
12	2.348	1-hydroxyethyl acetate	0,7	2.356	Acetic acid	0,62	2.335	Acetic acid (acetyloxy)	0,68
13	2.388	2-hydroxy-2-butanone	1,46	2.469	Butanedial (CAS) Succinaldehyde	3,26	2.391	2-Propan-1-ol (CAS) Alil alcohol	1,6
14	2.452	Butanedial	1,45	2.505	Cyclopentena	0,57	2.442	Butanedial (CAS) Succinaldehyde	2,00
15	2.504	Cyclopentanone	0,50	2.865	Furfural	6,31	2.509	Cyclopentanone	0,82
16	2.868	3-Furaldehyde	6,22	3.123	2-Hexanone, 3,4 dimethyl	1,11	2.868	3-Furaldehyde	9,18
17	3.116	5,9-Dodecadien-2-one,6,10-dimethyl	1,09	3.202	1,2-butanediol,diacetat	0,94	3.109	6,10-dimethyl, 5,9-Dodecadien-2-one,	0,84
18	3.193	1,2-Ethanediol, diacetate	0,95	3.321	2,5-Dimethoxytetrahydrofuran	0,50	3.155	1,2-Ethanediol, diacetate (CAS) Ethyl	0,64
19	3.322	Furan, tetrahydro 2,5-Dimethoxy	0,28	3.509	2,5-Dimethoxytetrahydrofuran	0,33	3.185	2-propanon, 1-acetyloxy	0,52
20	3.519	2,5-Dimethoxytetrahydrofuran	0,43	3.671	2-clopten-1-one, 2-methyl	0,50	3.527	2,5-Dimethoxy tetrahydrofuran	0,77
21	3.675	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	0,55	3.714	Ethanone, 1-(2-furfuryl)	0,42	3.674	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	0,61
22	3.724	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	0,46	3.834	2(5H)-Furanone	2,02	3.724	Ethanone, 1-(2-furanyl) =(CAS)	0,51
23	3.819	Cyclopentanone (CAS) Dumasin	1,71	3.955	1,2-Cyclopentanadion	1,58	3.811	Cyclopentanone	2,35
24	3.937	1,2-Cyclopentanedione	1,04	4.428	2-Furancarboxaldehyda, 5-methyl	0,58	3.930	1,2-Cyclopentanedione	1,13
25	4.432	5-methyl-2-furfural	0,59	4.497	2-Cyclopentan-1-one, 3-methyl	0,54	4.436	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	0,17
26	4.495	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	0,33	5.082	Propionic acid, 2-methyl, anhydride	0,49	4.490	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	0,34
27	4.696	Benzene, [(3methyl-2-butanil)]	0,59	5.477	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	2,71	4.692	Benzene	0,66
28	5.076	Tetrahydrofurfuryl alcohol	0,76	6.474	Phenol, 2-methoxy	2,85	5.074	Tetrahydrofurfuryl alcohol	0,41
29	5.460	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl	2,36	6.980	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy	0,58	5.453	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- (CAS) Corylon	2,51
30	6.475	Phenol, 2-methoxy-	2,96	8.251	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	1,88	6.468	2-Cyclopenten-1-one, 2,3,4-trimethyl	2,44
31	6.978	2-cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy	0,58	9.723	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	1,17	8.247	Phenol, 2-methoxy-5-methyl-	1,67
32	8.246	Phenol, 2-methoxy-4-methyl	1,25	10.963	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	5,09	9.724	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	0,98
33	9.720	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy	0,96	12.487	1,2,4-Trimethoxybenzene	2,31	10.951	Phenol, 2,6-dimethoxy-(CAS) Syringol	4,35

Lampiran 1 : Lanjutan
Appendix 1 : Continued

Peak	Serbuk kayu mahoni (<i>Mahogany wood powder</i>)			Serbuk kulit kayu mahoni (<i>Mahogany bark powder</i>)			Sludge (<i>Sludge powder</i>)		
	R:Time	Name	Conc. (%)	R: Time	Name	Conc. (%)	R:Time	Name	Conc. (%)
34	10.953	Phenol, 2,6-dimethoxy-	3,95	12.535	Phenol, 2,methoxy-4-(1-propanil)	0,97	12.487	1,2,4-Trimethoxybenzene (CAS)	2,08
35	12.484	1,2,4-Trimethoxybenzene	1,97	13.716	Benzene, 1,2,4-trimethoxy-5-methyl	1,61		methylsyringol	
36	12.536	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)	0,36						
37	13.718	Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-	2,32						
38	13.811	2-Propanon, 1-(4-hydroxy-3-methoxy)	0,56						

Lampiran 2. Analisis sidik ragam sifat fisiko-kimia bio-oil
Appendix 2 : Analysis of variance of bio-oil

No.	Sumber (Source)	Jumlah kuadrat (Sum of squares)	Kuadrat tengah (Mean square)	F-hitung (F-calculated)
1.	Rendemen (Yield), %			
	- Suhu (Temperature)	14,528	4,843	107,446
	- Bahan baku (Material)	23,817	11,908	264,213
	- Suhu x Bahan baku (Temperature vs Material)	7,727	1,288	28,572
2.	Kadar fenol (Fenol value), %			
	- Suhu (Temperature)	0,022	0,007	30,188
	- Bahan baku (Material)	1,975	0,987	4139,428
	- Suhu x Bahan baku (Temperature vs Material)	0.001	0,738	0,629
3.	Kadar pH (pH value),			
	- Suhu (Temperature)	0,048	0,016	55,435
	- Bahan baku (Material)	0,194	0,097	337,406
	- Suhu x Bahan baku (Temperature vs Material)	0,024	0,004	13,812
4.	Bobot jenis (Density)			
	- Suhu (Temperature)	9,353E-6	3,118E-6	3,105
	- Bahan baku (Material)	7,152E-5	3,576E-5	35,613
	- Suhu x Bahan baku (Temperature vs Material)	8,034E-6	1,339E-6	1,333

Lampiran 3. Uji Duncan (DMRT)
Appendix 3. Duncan test

No.	Parameter (Parameter)	Perlakuan (Treatment)	Nilai rata-rata untuk uji beda dari setiap perlakuan (<i>Value of average for significant test</i>)											
1.	Rendemen (Yield)	A ₁ B ₁ 18,68 i	A ₁ B ₂ 20,67 j	A ₁ B ₃ 23,34 k	A ₁ B ₄ 25 l	A ₂ B ₁ 10,3 e	A ₂ B ₂ 13,07 f	A ₂ B ₃ 14,34 fg	A ₂ B ₄ 16,1 h	A ₃ B ₁ 4,6 a	A ₃ B ₂ 5,27 ab	A ₃ B ₃ 6 abc	A ₃ B ₄ 7,33 cd	
2.	Kadar fenol (Fenol value)	A ₁ B ₁ 3,58 d	A ₁ B ₂ 3,59 de	A ₁ B ₃ 3,62 defg	A ₁ B ₄ 3,66 defghijkl	A ₂ B ₁ 3,61 def	A ₂ B ₂ 3,63 defgh	A ₂ B ₃ 3,65 defghi	A ₂ B ₄ 3,68 defghijkl	A ₃ B ₁ 3,97 efghijkl	A ₃ B ₂ 3,01 a	A ₃ B ₃ 3,03 ab	A ₃ B ₄ 3,06 abc	
3.	pH (<i>Acid value</i>)	A ₁ B ₁ 3,22 abcdef	A ₁ B ₂ 3,17 abc	A ₁ B ₃ 3,13 ab	A ₁ B ₄ 2,98 a	A ₂ B ₁ 3,25 abcdefgh	A ₂ B ₂ 3,24 abcdefg	A ₂ B ₃ 3,21 abcde	A ₂ B ₄ 3,19 abcd	A ₃ B ₁ 3,37 bcdefghijkl	A ₃ B ₂ 3,35 bcdefghijk	A ₃ B ₃ 3,34 bcdefghij	A ₃ B ₄ 3,31 abcdefghi	
4.	Bobot jenis (Density), g/ml	A ₁ B ₁ 1,091 ghi	A ₁ B ₂ 1,091 ghij	A ₁ B ₃ 1,092 ijk	A ₁ B ₄ 1,092 ijk	A ₂ B ₁ 1,089 cdefg	A ₂ B ₂ 1,087 abcd	A ₂ B ₃ 1,088 cde	A ₂ B ₄ 1,088 cdef	A ₃ B ₁ 1,086 a	A ₃ B ₂ 1,086 ab	A ₃ B ₃ 1,087 abc	A ₃ B ₄ 1,089 cdefgh	

Keterangan (Remarks) : 1). Huruf yang sama tidak berbeda nyata (Mean value with the same letter are not significantly different) 2). Perlakuan (treatment) A₁ = kayu mahoni (Mahogany wood), A₂ = kulit mahoni (Mahogany bark), A₃ = Sludge kertas (Paper sludge), B₁ = Suhu (Temperature) 400°C, B₂ = Suhu (Temperature) 450°C, B₃ = Suhu (Temperature) 500°C, B₄ = Suhu (Temperature) 550°C