

**KARAKTERISASI *BIO-OIL* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT
DENGAN PENAMBAHAN KATALIS Ni/NZA MENGGUNAKAN
METODE *FREE FALL PYROLYSIS*
(*Characterization of Palm Fruit Empty Bunches Bio-oil with the Addition of
Ni/NZA Catalyst Using Free Fall Pyrolysis Method*)**

Santiyo Wibowo, Lisna Efiyanti, & Gustan Pari

Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan,
Jl. Gunung Batu No. 5 Bogor 16610, Jawa Barat, Indonesia
Telp. (0251) 8633378; Fax. (0251) 8633413
E-mail : santiyowibowo1973@yahoo.com

Diterima 24 Januari 2017, Direvisi 21 Februari 2017, Disetujui 10 April 2017

ABSTRACT

Biomass resource mainly from forest industries waste such as oil palm empty fruit bunches (TKKS) is abundantly available. Currently, the utilization of TKKS as pyrolysis products is still limited to charcoal product, activated charcoal and charcoal briquettes. On the other hand, research on bio-oil manufacturing from biomass using fast pyrolysis method may increase hydrocarbons and calorific values, however the amount of catalyst used is higher than the biomass. This paper observes data and information on the characteristics of bio-oil made from oil palm empty fruit bunches through the addition of Ni/NZA as a catalyst. The optimal results (yield 30.27%, pH 2.94, specific gravity 1.068, viscosity 44 cSt and calorific value 29.38 MJ/kg with flame in medium category) were obtained with the addition of 6% catalyst. The bio-oil produced was dominated by acetic acid, phenol and benzene or toluene, and there were also alkene hydrocarbons compound, for instance hexadecene and aromatic hydrocarbons naphthalene.

Keywords: Bio-oil, lignocellulose, oil palm empty fruit bunches, catalyst, hydrocarbons

ABSTRAK

Sumber daya biomassa terutama dari limbah industri kehutanan seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS) tersedia melimpah. Saat ini pemanfaatan TKKS sebagai produk pirolisis masih terbatas pada produk arang, arang aktif, dan briket arang. Di sisi lain penelitian pembuatan *bio-oil* dari biomassa menggunakan metode pirolisis cepat menghasilkan produk yang mengandung hidrokarbon dan nilai kalor yang meningkat, akan tetapi jumlah katalis yang digunakan lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa. Tulisan ini mempelajari data dan informasi karakteristik *bio-oil* dari tandan kosong kelapa sawit melalui penambahan katalis Ni/NZA. Hasil penelitian menunjukkan penambahan 6% katalis menghasilkan *bio-oil* yang optimal, yaitu rendemen sebesar 30,27%, pH 2,94, berat jenis 1,068, viskositas 44 cSt, nilai kalor 29,38 MJ/kg, dan daya nyala dengan kategori sedang. *Bio-oil* yang dihasilkan didominasi oleh asam terutama asam asetat, fenol, benzene, atau toluene, serta terdapat senyawa golongan hidrokarbon alkena seperti *hexadecene* dan hidrokarbon aromatik *naphthalene*.

Kata kunci: *Bio-oil*, lignoselulosa, tandan kosong kelapa sawit, katalis, hidrokarbon

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Permasalahan pemakaian 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. Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 memuat rencana pengelolaan energi hingga tahun 2025 dimana Indonesia memberikan porsi 17% untuk energi baru terbarukan (EBT) (Peraturan Presiden, 2006). Salah satu cabang dari EBT itu adalah bioenergi (National Geographic Indonesia, 2014). Bioenergi merupakan bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar minyak bumi seperti bensin dan solar. Salah satu bioenergi yang berpotensi dikembangkan adalah *bio-oil*. *Bio-oil* atau dikenal juga sebagai *pyrolysis oil* adalah bahan bakar sejenis solar yang memiliki berat jenis dan viskositas yang tinggi serta pH rendah sehingga pemakaiannya masih terbatas sebagai bahan bakar *boiler* atau dibakar langsung untuk keperluan pengeringan dan belum dapat digunakan secara langsung pada bahan bakar transportasi. Untuk dapat digunakan pada mesin, *bio-oil* harus diolah lebih lanjut melalui proses perengkahan.

Bio-oil dapat diproduksi dari biomassa menggunakan teknologi pirolisis yaitu pirolisis lambat dan pirolisis cepat. Pirolisis lambat berlangsung pada suhu lebih rendah dan waktu tinggal biomassa dalam reaktor cukup lama yaitu lebih dari 5 jam. Produk utamanya adalah arang dan dihasilkan destilat yang mengandung *bio-oil*. Pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) berlangsung pada suhu 450 – 800°C dan waktu tinggal biomassa di dalam reaktor sangat cepat sekitar 1 – 10 detik, produk utama adalah *bio-oil*, arang dan gas (Wibowo & Hendra, 2014). Menurut Brown dan Holmgren (2013) terdapat beberapa teknologi pembuatan *bio-oil* dengan teknik *fast pyrolysis* yaitu *bubbling fluidized bed*, *circulating fluidized beds/transport reactor*, *rotating cone pyrolyzer*, *ablative pyrolysis*, *vacuum pyrolysis*, *auger reactor*, dan *free fall reactor*.

Penelitian pembuatan *bio-oil* dengan penambahan katalis telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan menggunakan bahan baku berbeda dan atau alat/teknik pirolisis yang

berbeda. Zhang, Xiao, Huang, Xiao, dan Xu (2009) menggunakan limbah tongkol jagung dengan teknik pirolisis cepat yaitu *fluidized bed reactor*. Jackson, Compton, dan Boateng (2009) mengaplikasikan katalis heterogen untuk pirolisis lignin. Demikian juga French dan Czernik (2010) yang mengaplikasikan katalis heterogen ZSM-5 untuk pirolisis biomassa. Meskipun keduanya menghasilkan *bio-oil* yang mengandung hidrokarbon dan nilai kalor yang meningkat, akan tetapi jumlah katalis yang digunakan lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa. Zhang et al. (2009) menggunakan perbandingan biomassa dan katalis HZSM 1:5 artinya jumlah katalis lima kali lipat dibandingkan biomassa, demikian juga French dan Czernik (2010) menggunakan perbandingan biomassa dan katalis 10:50 dan 10:100. Meskipun sampel biomassa yang digunakan dalam penelitian tersebut kecil hanya 10 mg berbanding 50 mg katalis, akan sangat tidak efektif bila kapasitas penelitian diperbesar, karena jumlah katalis yang digunakan lebih besar dari biomassa serta mengingat harga katalis yang cukup mahal.

Rahmah, Sahan, dan Bahri (2014) menggunakan 50 g biomassa dengan katalis zeolit alam sebanyak 1,2 g dan 3 g atau 2, 4 dan 6% dari berat biomassa. Hasil terbaik diperoleh dengan penambahan 2 g atau 4% katalis. Sementara Rizky, Bahri, dan Yusnimar (2014) menggunakan 50 g biomassa dengan katalis Co-Mo/NZA sebanyak 1,5%, 2% dan 2,5% dari berat biomassa pada pirolisis lambat. Hasil terbaik diperoleh dengan penambahan katalis 2,5%. Jumlah katalis yang diujicobakan pada penelitian tersebut tidak besar karena fungsi katalis adalah untuk mempercepat reaksi.

Sumberdaya biomassa sangat besar terutama dari sektor pertanian dan kehutanan, seperti limbah pemanenan dan limbah industri kehutanan, misalnya serbuk gergaji atau tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Pemanfaatan TKKS sebagai produk pirolisis masih terbatas pada produk arang, arang aktif dan briket arang (Putra, Hakim, Yuriandala, & Anggraini, 2013). Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data dan informasi karakteristik *bio-oil* dari tandan kosong kelapa sawit menggunakan teknik pirolisis cepat melalui penambahan katalis Ni/NZA.

II. BAHAN DAN METODE

A. Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dari Malingping, Banten. Bahan kimia yang digunakan antara lain zeolit alam, metanol, etanol, air suling, asam fluorida (HF), asam klorida (HCl), amonium klorida (NH_4Cl), natrium sulfat (Na_2SO_4) anhidrat, dan kristal $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

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

B. Metode

1. Persiapan bahan

Bahan baku diambil dari lokasi di Malingping, Banten, dan dikeringkan pada suhu 60 – 80°C, dihaluskan dan disaring lolos 40 mesh dan tertahan 60 mesh. Selanjutnya dilakukan analisis kadar untuk penetapan kadar lignin sesuai SNI 14-0492-1989 (Standar Nasional Indonesia, 1989b), kadar holoselulosa SNI 01-1303-1989 (Standar Nasional Indonesia, 1989a), kadar alpha selulosa SNI 0444:2009 (Standar Nasional Indonesia, 2009), dan kelarutan dalam alkohol benzena SNI 14-1032-1989 (Standar Nasional Indonesia, 1989c).

2. Pembuatan katalis

Katalis yang digunakan adalah zeolit alam dengan impregnasi nikel. Proses pembuatan katalis tersebut menggunakan modifikasi prosedur yang telah dilakukan oleh Tadeus, Silalahi, Sayekti, dan Sianipar (2013) dan Irvantino (2013). Zeolit alam dihaluskan dengan ukuran 100 mesh, lalu dicuci dengan aquades dan dikeringkan, selanjutnya direfluks dalam larutan HCl 6 N selama 30 menit pada temperatur 50°C sambil diaduk, kemudian dicuci berulang kali sampai tidak terdeteksi ion Cl dengan cara air cucian ditetesi AgNO_3 apabila setelah ditetesi tidak terbentuk endapan putih maka zeolit alam sudah bebas dari ion Cl dan siap dikeringkan. Zeolit direndam dalam larutan NH_4Cl pada temperatur 90°C sambil diaduk selama 3 jam perhari selama 1 minggu. Zeolit direndam dalam larutan logam

$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan direfluks selama 6 jam pada suhu 60°C, selanjutnya dikalsinasi pada suhu 500°C.

3. Pembuatan *bio-oil*

Penelitian pembuatan *bio-oil* menggunakan alat *free fall reactor* pada suhu reaksi 550°C dengan bahan baku TKKS. Pada bahan baku ditambahkan katalis zeolit alam aktif atau disebut juga NZA (*Natural Zeolite Activated*) dengan pengembang nikel (Ni/NZA) dan katalis masing-masing 0%, 2%, 4%, 6% dan 8% dari sampel tandan kosong sawit.

4. Pengujian *bio-oil*

Pengujian dilakukan terhadap sifat fisiko-kimia yaitu: rendemen (*bio-oil*, arang, dan gas), pH (pH meter), viskositas (*viscometer Brookfield*), berat jenis (metode piknometer), nilai kalor (*bomb calorimetry*), daya nyala (kemampuan bakar dengan skor cepat: 0 – 2 detik, sedang: 3 – 5 detik, lambat > 6-10 detik, tidak menyala > 11) (Wibowo & Hendra, 2015) dan analisis komponen kimia menggunakan GCMS Shimadzu QP 2010 Ultra. Kondisi alat memakai suhu kolom 60°C dengan jenis kolom RTX 5MS dengan gas pembawa helium, suhu detektor 300°C, suhu *injector* 280°C, kecepatan kenaikan suhu 10°C per menit dan waktu analisa 35 menit. Sampel disaring dengan kertas saring, kemudian sampel langsung diinjeksikan ke dalam GC sejumlah 0,2 μL sehingga terkromatografi dengan komponen yang terpisah. Adapun sampel yang diinjeksikan ke dalam GC adalah satu sampel untuk tiap perlakuan katalis. Kuantifikasi komponen menggunakan metode perbandingan kurva relatif. Pendeteksian berlangsung di dalam MS (*Mass Spectrometry*) dengan mekanisme penembakan senyawa oleh elektron menjadi molekul terionisasi dan pencatatan pola fragmentasi yang terbentuk dibandingkan dengan pola fragmentasi senyawa standar yang ada di dalam perangkat GCMS yang diindikasikan dengan persentase *Similarity Index* (SI), mengacu pada *library Wiley 7*. Senyawa standar SI tertinggi (dapat mencapai 99%) akan terbaca pada kolom hasil bersamaan dengan grafik (BPPT, 2014).

5. Analisis Data

Perlakuan penelitian menggunakan variabel tetap: massa biomassa tandan kosong kelapa sawit, ukuran partikel biomassa 40 mesh, ukuran katalis Ni-Zeolit 100 mesh, dan temperatur

pirolisis 550°C. Penelitian merupakan percobaan yang disusun dalam rancangan acak lengkap dengan faktor tunggal persentase berat katalis 0, 2, 4, 6, dan 8% dari berat biomassa dengan masing-masing 3 kali ulangan. Perangkat lunak yang digunakan dalam pengujian statistik adalah SPSS 18.

Model rancangan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + \epsilon_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

- Y_{ij} = Pengamatan taraf ke-ij
- μ = nilai rata-rata umum
- A_i = Pengaruh berat katalis pada taraf ke-i
- ϵ_{ij} = Komponen random error

Data yang diperoleh dianalisa menggunakan sidik ragam (Anova) yaitu rendemen *bio-oil*, pH, berat jenis, viskositas dan nilai kalor, dan dilanjutkan dengan uji Duncan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Proksimat Tandan Kosong Kelapa Sawit

Hasil analisis kimia tandan kosong kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tandan kosong kelapa sawit mempunyai kadar holoselulosa sebesar 75,19%. Hasil ini lebih besar dari holoselulosa TKKS hasil penelitian Indrawan et al. (2015) sebesar 71,99% terdiri atas alpha selulosa 56,24% dan hemiselulosa 15,75%. Holoselulosa merupakan karbohidrat dalam kayu yang terdiri atas selulosa,

hemiselulosa, dan pektin setelah lignin dihilangkan dari kayu.

Kadar ekstraktif tandan kosong kelapa sawit yang larut dalam alkohol benzena adalah 6,12%. Zat ekstraktif terdiri dari berbagai jenis komponen senyawa organik seperti minyak atsiri, terpenoid, steroid, lemak, lilin, *phenol* (stilben, lignan, tanin terhidrolisis, tanin kondensasi, flavonoid) (Sjostrom, 1998). Kadar lignin dalam tandan kosong kelapa sawit adalah 16,14%. Kadar lignin ini masih sesuai dengan hasil penelitian Simatupang, Nata, dan Herlina (2012) yang mengisolasi lignin dari TKKS sebesar 6,85 - 16,42. Kadar lignin TKKS tersebut di bawah rentang kadar lignin kayu pada umumnya yang berkisar antara 20 - 25%. Lignin merupakan zat organik polimer yang penting dan banyak terdapat dalam tumbuhan tingkat tinggi. Kadar lignin dalam bahan baku berpengaruh terhadap rendemen *bio-oil* yang dihasilkan, dimana semakin tinggi kadar lignin rendemen *bio-oil* akan semakin besar. Sedangkan holoselulosa berkontribusi pada komponen asam yang terbentuk dalam *bio-oil* seperti asam asetat, asam *formic* dan asam propanoat (Fahmi, Bridgwater, Donnison, Yates, & Jones, 2008).

B. Karakterisasi *Bio-oil*

1. Hasil GCMS (*Gas Chromatography Mass Spectrometry*).

Hasil pengujian GCMS menunjukkan bahwa komponen kimia *bio-oil* serbuk TKKS pada suhu 550°C tanpa katalis terdeteksi 25 komponen (Lampiran 2), yang didominasi oleh golongan

Tabel 1. Sifat fisiko kimia tandan kosong kelapa sawit
Table 1. Physical and chemical properties of palm empty fruit bunches

Parameter (Parameters)	Kadar (Content, %)
Kadar Air (<i>Moisture content</i>)	8,84
Kadar ekstraktif (<i>Extractive content</i>)	6,12
Kadar holoselulosa (<i>Holocellulose content</i>)	75,19
Kadar alpha selulosa (<i>Alpha cellulose content</i>)	56,16
Kadar hemiselulosa (<i>Hemicellulose content</i>)	19,03
Kadar Lignin (<i>Lignin content</i>)	16,14

phenol, asam palmitat dan asam stearat. Belum terlihat adanya senyawa hidrokarbon. Terdapat senyawa *hexane* yang cukup tinggi pada hampir di semua GCMS, yang merupakan pelarut sampel. Sedangkan untuk penggunaan katalis Ni/NZA 2% (Lampiran 2), terdeteksi 68 komponen kimia (dari 69 senyawa kimia terdapat satu senyawa yang sama) dan didominasi oleh golongan phenol, golongan benzene atau acetone, dan 2-*furancarboxaldehyde*, teridentifikasi juga adanya senyawa hidrokarbon alkena yaitu 1-*hexadecene* ($C^{16}H^{32}$). Pada katalis Ni/NZA 4% (Lampiran 2) teridentifikasi 69 komponen kimia (dari 80 senyawa kimia terdapat 11 senyawa yang sama) yang didominasi oleh golongan phenol, benzene, asam asetat, dan golongan hidrokarbon alkena 1-*hexadecene* ($C^{16}H^{32}$) dan hidrokarbon aromatik *naphthalene* ($C^{12}H^{12}$).

Komponen kimia *bio-oil* menggunakan katalis Ni/NZA 6% (Lampiran 2) teridentifikasi sebanyak 74 (dari 78 senyawa kimia terdapat 4 senyawa yang sama) komponen yang didominasi oleh golongan metanol, phenol, benzene, *naphthalene*, dan asam asetat. Pada penggunaan katalis Ni/NZA 8% (Lampiran 2) teridentifikasi 59 komponen (dari 64 senyawa kimia terdapat 5 senyawa yang sama) yang didominasi oleh phenol, 1-Acetoxy-2-propanol dan asam asetat, teridentifikasi juga senyawa hidrokarbon 1-hexadecene ($C^{16}H^{32}$) dan hidrokarbon aromatik *naphthalene* ($C^{12}H^{12}$).

Dari hasil GCMS *bio-oil* dengan proses *free fall reactor* menggunakan katalis Ni/NZA dapat dilihat bahwa adanya penambahan katalis pada bahan baku menghasilkan komponen senyawa kimia yang lebih banyak dibandingkan tanpa menggunakan katalis. Komponen terbanyak diperoleh pada penambahan Ni/NZA 4%, dan kembali menurun pada penambahan katalis 6% dan 8% per berat sampel. Akan tetapi penambahan katalis hanya menghasilkan hidrokarbon dari golongan alkena. Sedangkan hidrokarbon alkana yang merupakan senyawa di dalam bahan bakar solar dan bensin, tidak terdeteksi. Hal ini diduga oleh waktu kontak bahan baku dan katalis dengan panas, sangat cepat terjadi, sehingga terbentuknya hidrokarbon alkana tidak terjadi.

Dari hasil analisis GCMS dapat dilihat bahwa penambahan katalis secara langsung pada bahan baku dapat mempengaruhi komponen kimia *bio-*

oil yang dihasilkan. Adanya katalis tersebut menghasilkan komponen kimia yang lebih banyak jika dibandingkan tanpa penambahan katalis. Jumlah komponen kimia terbanyak diperoleh dari penambahan katalis Ni/NZA 6% b/b yaitu 74 komponen kimia. Pada penambahan katalis Ni/NZA 8% b/b, komponen kimia yang terbentuk kembali turun menjadi 59 komponen. Hal ini diduga pada penambahan jumlah katalis menjadi 8% Ni/NZA menyebabkan serbuk katalis lebih banyak menempel pada serbuk sampel sehingga sampel menjadi lebih berat dan lebih cepat sampai di wadah penampung arang sehingga kontak sampel dengan panas reaktor tidak maksimal. Hal ini ditunjukkan oleh konsentrasi phenol pada sampel berkatalis 8% sebesar 28 (Lampiran 2).

Bio-oil serbuk tandan kosong kelapa sawit didominasi oleh phenol dan asam asetat. Hasil ini tidak berbeda dengan *bio-oil* dari batang gandum barley, *bio-oil* kayu sengon, dan limbah kayu mahoni juga didominasi oleh phenol dan asam organik terutama asetat dengan jumlah yang berbeda karena perbedaan bahan baku (Mullen, Boateng, Hicks, Goldberg, & Moreau, 2010; Wibowo, 2013; Wibowo & Hendra, 2015). Terdapat komponen hidrokarbon alkena di dalam *bio-oil* pirolisis, tetapi komponen hidrokarbon alkana belum terbentuk, selain itu terdapat komponen yang termasuk bahan bakar mudah terbakar yaitu acetone, benzene, dan toluene.

2. Rendemen

Hasil rendemen produk dari pirolisis serbuk tandan kosong kelapa sawit pada konsentrasi katalis Ni/NZA 2, 4, 6 dan 8% b/b dengan temperatur 550°C menggunakan *free fall pyrolysis* dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Dari hasil penelitian diperoleh cairan *bio-oil* berkisar antara 20,39 – 30,27%. Rendemen terbesar diperoleh dari serbuk tandan kosong kelapa sawit pada perlakuan penambahan 6% katalis yaitu sebesar 30,27% dan yang terkecil dihasilkan dari sampel pada penambahan 0% katalis yaitu 20,39% (Tabel 2). Bila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan serbuk kayu mahoni pada suhu 550°C (tanpa adanya penambahan katalis) diperoleh rendemen *bio-oil* sebesar 25% (Wibowo, 2016), maka hasil penelitian ini lebih rendah (20,39%). Menurut Ellens (2009) rendemen *bio-oil*

tergantung dari proses yang dilakukan dan karakteristik bahan baku. Berdasarkan analisis pada Tabel 1 diketahui tandan kosong sawit mempunyai kadar lignin 16,14%, sedangkan kayu mahoni mempunyai kandungan lignin lebih besar yaitu 26,9% (Martawijaya, Kartasujana, Mandang, Prawira, & Kadir, 1989). Menurut Fahmi et al. (2008), kadar lignin berpengaruh terhadap rendemen *bio-oil* yang dihasilkan, semakin tinggi kadar lignin rendemen *bio-oil* akan semakin besar.

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa penambahan katalis berpengaruh nyata terhadap rendemen *bio-oil* (Lampiran 1). Hasil uji Duncan menunjukkan perlakuan katalis 2, 4 dan 8% tidak berbeda nyata, sedangkan perlakuan 6% menghasilkan rendemen tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Pada penelitian ini perlakuan katalis 6% merupakan kondisi yang optimal terjadinya *cracking* sampel tandan kosong sawit menjadi senyawa dalam bentuk asap, arang dan gas. Asap dan gas yang melalui kondensor akan terkondensasi menjadi cairan *bio-oil*, sedangkan asap dan gas yang tidak terkondensasi akan terbuang ke udara. Pada perlakuan 8% katalis, rendemen kembali turun, hal ini diduga

disebabkan oleh banyaknya serbuk sampel yang tertutupi oleh katalis sehingga kontak sampel terhadap panas reaktor tidak maksimal. Adanya penambahan katalis secara langsung pada bahan baku terbukti dapat meningkatkan jumlah rendemen *bio-oil* tandan kosong kelapa sawit dibandingkan kontrol atau tanpa penambahan katalis. Hal ini sesuai dengan Sukarjo (1997) bahwa katalis memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat atau memungkinkan reaksi pada suhu lebih rendah akibat perubahan yang dipicunya terhadap pereaksi. Katalis menyediakan suatu jalur pilihan dengan energi aktivasi yang lebih rendah. Katalis mengurangi energi yang dibutuhkan untuk berlangsungnya reaksi.

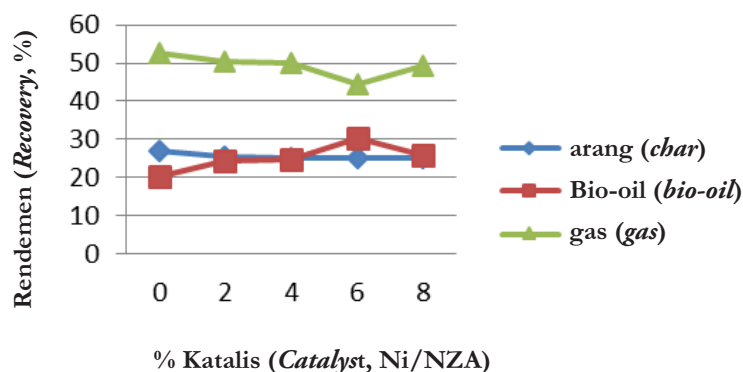
Lestari (2010) berpendapat bahwa dengan impregnasi logam transisi seperti nikel (Ni) yang terdistribusi pada zeolit akan semakin meningkatkan daya katalitiknya. Hal ini menunjukkan bahwa pengembanan logam nikel ke dalam zeolit alam dengan kadar tertentu sangat berguna dalam meningkatkan rendemen *bio-oil*, karena situs-situs aktif pada katalis tersebut berperan sebagai fasilitator di dalam reaksi pirolisis. Sehingga, semakin banyak situs aktif

Tabel 2. Rendemen produk free fall pirolisis tandan kosong kelapa sawit

Table 2. Free fall pyrolysis product recovery made from oil palm empty fruit bunches

Produk (Products)	Persentase katalis (Percentage of catalyst)	Rendemen (Recovery,%)
Arang (<i>Charcoal</i>)	0	26,95± 3,01
	2	25,32± 1,88
	4	25,21± 3,61
	6	25,17± 1,91
	8	25,04± 2,95
<i>Bio-oil (Bio-oil)</i>	0	20,39±6,72 a*
	2	24,25± 9,71 b
	4	24,66± 7,16 bc
	6	30,27± 4,68 e
	8	25,72± 5,27 bcd
Gas (<i>Gas</i>)	0	52,66± 9,02
	2	50,43± 9,52
	4	50,13± 10,68
	6	44,56± 6,17
	8	49,24± 8,16

* Keterangan: angka yang diikuti huruf yang sama, tidak berbeda nyata
(Remarks : numbers followed by the same letter were not significantly different)



Gambar 1. Rendemen arang, bio-oil dan gas produk pirolisis serbuk tandan kosong kelapa sawit suhu 550°C dengan penambahan katalis

Figure 1. Charcoal, bio-oil and gas recovery from pyrolysis of oil palm empty bunches powder at temperature of 550°C with catalyst addition

yang dimiliki oleh suatu katalis, maka rendemen *bio-oil* yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Selain itu untuk meningkatkan rendemen *bio-oil* dapat dilakukan dengan penambahan peralatan pendukung pada *free fall reactor* seperti pada penelitian Li, Xu, Liu, Yang, dan Lu (2004); Zhang, Xu, Zhao, dan Liu (2007) yang dapat menghasilkan rendemen mencapai 50 - 73% karena adanya penambahan alat *Electrostatic Precipitator* (ESP) dan *cooled ice box* atau *dry ice cooled condenser* untuk unit kondenser pendingin.

Rendemen arang berkisar antara 25,04 - 26,95%, dengan rendemen terbesar berasal dari sampel tanpa penambahan katalis dan terkecil pada penambahan katalis 8%. Rendemen gas berkisar antara 44,56 - 52,66%, dengan rendemen terbesar berasal dari sampel tanpa penambahan katalis dan terkecil pada penambahan katalis 6%.

Rendemen gas yang dihasilkan masih memungkinkan untuk diperkecil dengan cara menangkap asap/gas yang keluar menggunakan alat ESP menjadi bentuk cairan. Gas yang terbentuk dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif melalui tahapan proses penyaringan dan pemurnian gas agar dapat terbakar sempurna.

Sebagai hasil samping pengolahan *bio-oil*, arang masih dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi seperti arang briket atau karbon pellet selain itu berpotensi digunakan untuk arang aktif, arang kompos dan produk nano karbon (Susanti, Wahyuningtyas, & Ardhana, 2015; Lempang, Syafii, & Pari, 2012; Komarayati, Gusmailina, & Pari, 2013; Pari et al., 2013). Beberapa produk sudah dimanfaatkan masyarakat dan mempunyai nilai ekonomi. Sementara itu hasil samping gas dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif

Tabel 3. Karakteristik *bio-oil* tandan kosong kelapa sawit

Table 3. Characteristics of *bio-oil* made from oil palm empty fruit bunches

Persentase Katalis (Percentage of catalyst)	Parameter (Parameters)				
	pH (pH)	Berat jenis (Specific gravity)	Viskositas (Viscosity, cst)	Nilai kalor (Calor value, MJ/kg)	Daya nyala (Flame power)
0	2,49 a* ± 0,025	1,095 e ± 0,0001	18,6 a ± 0,58	17,26 a ± 0,320	lambat (Slow)
2	2,65 b ± 0,006	1,082 d ± 0,0001	28 b ± 1	26,88 c ± 0,023	sedang (Medium)
4	2,86 c ± 0,01	1,075 c ± 0,0004	46,3 e ± 0,58	27,89 cd ± 0,015	sedang (Medium)
6	2,94 d ± 0,01	1,068 b ± 0,0001	44 d ± 0	29,38 e ± 0,011	sedang (Medium)
8	2,93 d ± 0,031	1,067 a ± 0,0001	36,7 c ± 1,53	24,81 b ± 0,013	sedang (Medium)

untuk memasak, tetapi masih memerlukan tahapan proses penyaringan dan pemurnian gas agar dapat terbakar sempurna.

3. pH *bio-oil*

Tabel 3 menunjukkan *bio-oil* tandan sawit mempunyai kadar pH antara 2,49 - 2,94. pH terendah diperoleh pada perlakuan tanpa katalis yaitu sebesar 2,49 dan pH tertinggi diperoleh pada sampel dengan perlakuan penambahan katalis 6% yaitu sebesar 2,94. Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa penambahan katalis berpengaruh nyata terhadap pH *bio-oil* (Lampiran 1). Hasil uji Duncan, perlakuan katalis 6% dan 8% tidak berbeda nyata tetapi berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Terdapat kecenderungan penambahan katalis pada bahan baku meningkatkan pH *bio-oil*. Keasaman yang tinggi disebabkan adanya asam asetat dan asam lainnya akibat proses pirolisis yang memecah selulosa dan lignin serta zat ekstraktif yang bersifat asam (Lampiran 2). Sehingga secara umum keasaman *bio-oil* cukup tinggi antara 2,5 - 3 (Easterly, 2002; Ellens, 2009).

4. Berat jenis

Hasil pengujian berat jenis *bio-oil* yang diperoleh dari sampel serbuk tandan kosong kelapa sawit berkisar antara 1,067-1,095 (Tabel 3). Berdasarkan sidik ragam menunjukkan bahwa penambahan katalis berpengaruh nyata terhadap penurunan berat jenis *bio-oil* dibandingkan dengan kontrol (Lampiran 1). Pada kontrol tanpa katalis, teridentifikasi senyawa *phenol* sejumlah 51,95% dengan berat jenis 1,07 dan pada perlakuan sampel dengan katalis 2, 4, 6, dan 8% senyawa *phenol* masing-masing menjadi 41,29%, 32,15%, 29,08%, dan 39,36% (Lampiran 2). Berat jenis senyawa *phenol* di atas 1, berkontribusi terhadap berat jenis *bio-oil* yang dihasilkan. Pada katalis 8% meskipun jumlah konsentrasi *phenol* lebih besar dari 4% dan 6% tetapi terdapat juga senyawa benzene (5,19%) dengan berat jenis 0,878, sehingga berat jenis *bio-oil*-nya tidak jauh berbeda dengan katalis 6%. Hasil ini masih lebih tinggi dari penelitian Zhang et al. (2009) yang menghasilkan berat jenis *bio-oil* tongkol jagung dengan penambahan katalis HZSM-5 sebesar 0,95. Secara umum berat jenis *bio-oil* adalah tinggi bahkan mencapai 1,2 (Sensoz, 2003), dengan penambahan katalis dimungkinkan senyawa

dengan berat molekul tinggi dapat terpecah menjadi senyawa dengan berat molekul yang rendah.

Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin dibutuhkan densitas bahan bakar yang rendah karena berat jenis bahan bakar akan berpengaruh terhadap penyalan bahan bakar dimana semakin tinggi berat jenis maka bahan bakar akan semakin sulit terbakar karena nilai kalornya semakin rendah (Wiratmaja, 2010). Selain itu bahan bakar yang banyak mengandung senyawa karbon dengan berat molekul tinggi akan menyulitkan proses penguapan dalam ruang bakar mesin, dan cenderung menjadi jelajah yang tidak terbakar sempurna (Otomotif, 2008).

5. Viskositas

Viskositas adalah ukuran kekentalan suatu fluida yang menunjukkan besar kecilnya gesekan di dalam fluida. Makin besar viskositas suatu fluida, maka semakin sulit fluida mengalir dan semakin sulit suatu benda bergerak di dalam fluida tersebut. Hasil uji viskositas berkisar antara 18,6 - 46,3 cSt (Tabel 3). Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa penambahan katalis berpengaruh nyata terhadap viskositas *bio-oil* (Lampiran 1). Hasil uji Duncan menunjukkan bahwa perlakuan penambahan katalis berpengaruh nyata terhadap viskositas *bio-oil* yang dihasilkan. Viskositas terendah ada pada perlakuan tanpa katalis yaitu 18,6 cst diikuti dengan penambahan katalis 2% yaitu 28 cst, hal ini disebabkan pada sampel tersebut kandungan airnya/asap cairnya lebih besar jika dibandingkan dengan sampel dengan penambahan katalis 4%, 6%, dan 8%. Tingginya kekentalan *bio-oil* disebabkan senyawa-senyawa dengan berat molekul tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil analisis GCMS (Lampiran 2), dapat dilihat bahwa 0% katalis diperoleh hanya 21 senyawa dengan BM di atas 100, sementara pada penambahan 2, 4, 6, dan 8% diperoleh berurutan 49, 65, 64, dan 51 senyawa dengan BM di atas 100. Pada perlakuan tanpa katalis dihasilkan senyawa berberat molekul tinggi yang lebih rendah dibandingkan dengan penambahan katalis. Pada penambahan katalis 6% dan 8% terjadi penurunan kekentalan, hal ini diduga katalis memecah kembali senyawa dengan berat molekul tinggi menjadi senyawa hidrokarbon alkena yang mempunyai berat molekul rendah. Untuk dapat menjadi bahan bakar mesin diperlukan viskositas

yang rendah, sehingga bahan bakar mudah mengalir. Menurut Komariah, Juliani, dan Dimiyati (2013) viskositas bahan bakar sangat penting karena berpengaruh pada atomisasi bahan bakar ketika diinjeksikan ke dalam ruang bakar. Untuk memperoleh pembakaran sempurna dibutuhkan butiran bahan bakar yang kecil. Bahan bakar dengan viskositas tinggi akan menghasilkan butiran yang lebih besar di dalam ruang bakar sehingga pembakaran menjadi tidak sempurna.

6. Nilai kalor

Nilai kalor pembakaran menunjukkan energi kalor yang dikandung dalam tiap satuan massa bahan bakar. Tabel 3 menunjukkan nilai kalor *bio-oil* dari tandan kosong kelapa sawit yang diukur dengan alat *calorimeter bomb* yaitu antara 17,13–29,16 MJ/kg. Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa penambahan katalis berpengaruh nyata pada nilai kalor. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan nilai kalor katalis 2% tidak berbeda nyata dengan katalis 4% tetapi berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Nilai kalor optimum diperoleh pada penambahan katalis 6% dan terendah pada katalis 0%. Pada penambahan katalis 6% merupakan kondisi optimum terpecahnya tandan kosong sawit menjadi *bio-oil* dan terbentuknya senyawa yang mudah terbakar (Tabel 2). Nilai kalor 29,16 MJ/kg ini lebih tinggi jika dibandingkan *bio-oil* rumput gelagah dengan proses *free fall reactor* menghasilkan nilai kalor 25,29 MJ/kg (Wibowo & Hendra, 2014), tetapi masih lebih rendah jika dibandingkan penelitian Zhang et al. (2009) yang menghasilkan *bio-oil* dari tongkol jagung yang ditambahkan katalis HZMS-5 dengan nilai kalor sebesar 34,6 MJ/kg. Hal ini disebabkan oleh perbedaan bahan baku, alat pirolisis yang digunakan dan perbandingan katalis yang digunakan. Pada penelitian Zhang et al. (2009), alat yang digunakan adalah *fluidized bed reactor* dan menggunakan perbandingan katalis HZSM-5 dengan biomassa sebesar 5:1, artinya katalis yang digunakan 5 kali lebih besar dibandingkan biomassa tongkol jagung.

7. Daya nyala

Pengujian daya nyala dilakukan untuk mengetahui kemampuan *bio-oil* untuk menyala bila

diberi sumber api. Daya nyala *bio-oil* tandan kosong kelapa sawit menggunakan *free fall pyrolysis* dapat dilihat pada Tabel 3. Sampel tanpa katalis menyala setelah 7 detik atau mempunyai kategori lambat sedangkan tandan kosong kelapa sawit yang ditambahkan katalis semuanya menyala setelah 3–5 detik atau berdaya nyala sedang. Penambahan katalis dapat meningkatkan daya nyala *bio-oil*, meskipun hanya dalam kategori sedang dan belum menyamai bahan bakar solar. Lambatnya sampel tanpa katalis diduga disebabkan masih dominannya senyawa *phenol* dan asam di dalam *bio-oil* hasil pirolisis *free fall reactor*. Hasil GCMS (Lampiran 2) dapat dilihat sampel tanpa katalis mempunyai konsentrasi *phenol* sebesar 50,47%, sementara senyawa turunan *phenol* pada katalis 2, 4, 6, dan 8% berurutan sebesar 37,68; 32,15; 24,08 dan 39,36%. Kemampuan menyala *bio-oil* disebabkan oleh adanya bahan yang mudah terbakar seperti *benzene*, hidrokarbon alkena dan metanol dengan konsentrasi yang berbeda. *Bio-oil* atau *pyrolysis oil* tidak sama dengan bahan bakar minyak pada umumnya yang mempunyai kemampuan daya nyala yang cepat terbakar. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan air (cuka kayu) yang terdapat di dalam sampel *bio-oil* tersebut (Senoz, 2003). Daya nyala *bio-oil* dapat diperbaiki dengan penambahan senyawa yang bersifat polar seperti etanol, sehingga dapat memperbaiki atomisasi dan nilai kalor *bio-oil* (Stamatov, Honnery, & Soria, 2006).

IV. KESIMPULAN

Penambahan 6% katalis Ni/NZA terhadap sampel tandan kosong sawit memberikan hasil optimal yaitu rendemen *bio-oil* 30,27%, pH 2,94, berat jenis 1,068, viskositas 44 cSt, nilai kalor 29,38 MJ/kg, dan kemampuan menyala pada 3 detik (kategori sedang). Pembuatan *bio-oil* dari tandan kosong kelapa sawit diperoleh sifat fisiko kimia *bio-oil* yang didominasi oleh asam asetat, *phenol* dan *benzene* serta *toluene* serta terdapat beberapa senyawa golongan hidrokarbon alkena seperti *hexadecene* dan hidrokarbon aromatik *naphthalen*.

DAFTAR PUSTAKA

- BPPT. (2014). GC MS. Diakses dari <http://btbrd.bppt.go.id/index.php/gcms>, pada 6 Juli 2015.
- Brown, R., & Holmgren, J. (2013). Fast pyrolysis and bio-oil upgrading Iowa. Diakses dari <https://www.researchgate.net/publication/204979128>, pada 7 Desember 2016.
- Easterly, J. L. (2002). Assessment of bio-oil as a replacement for heating Oil. CONEG Policy Research Center, Inc. USA. Diakses dari https://dcache.mtholyoke.edu/courses/tmillett/course/geog_304B/pub34.pdf, pada 6 Desember 2016.
- Ellens, C. J. (2009). *Design, optimization and evaluation of a free-fall biomass fast pyrolysis reactor and its products*. (Thesis) Iowa State University, Amerika Serikat.
- Fahmi, R., Bridgwater, A. V., Donnison, I., Yates, N., & Jones, J. M. (2008). The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability on pyrolysis oil yields, quality and stability. *Fuel*, 87, 1230-1240. doi: 10.1016/j.fuel.2007.07.026.
- French, R., & Czernik, S. (2010). Catalytic pyrolysis of biomass for biofuels production. *Fuel Processing Technology*, 91(1), 25-32. doi: 10.1016/j.fuproc.2009.08.011.
- Indrawan, D. A., Roliandi, H., Tampubolon, R., Pari, G., Santoso, A., & Iqbal, M. (2015). Penyempurnaan sifat papan serat berkerapatan tinggi dari campuran rumput gelagah, tandan kosong kelapa sawit, dan bambu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 33(3), 193-214.
- Irvantino, B. (2013). *Preparasi katalis ni/zeolit alam dengan metode sonokimia untuk perengkahan katalitik polipropilen dan polietilen*. (Skripsi Sarjana). Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Jackson, M. A., Compton, D. L., & Boateng, A. A. (2009). Screening heterogeneous catalysts for the pyrolysis of lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85, 226-230. doi: 10.1016/j.jaap.2008.09.016.
- Ji-lu, Z. (2007). Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk²: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80, 30-35. doi: 10.1016/j.jaap.2006.12.030.
- Komarayati, S., Gusmailina, & Pari, G. (2013). Arang dan cuka kayu: Produk hasil hutan bukan kayu untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan serapan hara karbon. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 31(1), 49-62.
- Komariah, L. N., Juliani, W. D., & Dimiyati, M. F. (2013). Efek pemanasan campuran biodiesel dan minyak solar terhadap konsumsi bahan bakar pada boiler. *Jurnal Teknik Kimia*, 19(4), 53-58.
- Lempang, M., Syafii, W., & Pari, G. (2012). Sifat dan mutu arang aktif tempurung kemiri. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 30(2), 100-113.
- Lestari, D. Y. (2010). Kajian modifikasi dan karakterisasi zeolite alam dari berbagai negara. Dalam Mas Ruri, M., Mulyani, S., & Saputro, A.N.C. (Eds.) *Prosiding seminar nasional Kimia dan Pendidikan Kimia*, 30 Oktober 2010 (pp. 1-7). Universitas Negeri Yogyakarta.
- Li, S., Xu, S., Liu, S., Yang, C., & Lu, Q. (2004). Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas. *Fuel Processing Technology*, 85, 1201-1211. doi: 10.1016/j.fuproc.2003.11.043.
- Martawijaya, I., Kartasujana, Mandang, Y. I., Prawira, S. A., & Kadir, K. (1989). *Atlas kayu Indonesia Jilid I* (Jilid I). Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan, Bogor.
- Mullen, C. A., Boateng, A. A., Hicks, K. B., Goldberg, N. M., & Moreau, R. A. (2010). Analysis and comparison of bio-oil produced by fast pyrolysis from three barley biomass/byproduct streams. *Energy Fuels*, (9), 699-706. doi: 10.1021/ef900912s.
- National Geographic Indonesia. (2014). Pemerintah didorong serius kembangkan bahan bakar non fosil. Diakses dari <http://nationalgeographic.co.id/berita/2014/II/pemerintah-didorong-serius->

- kembangkan-bahan-bakar-non-fosil, pada Juli 2015
- Onay, O., & Kockar, O. M. (2006). Pyrolysis of rape seed in a free fall reactor for production of bio-oil. *Fuel*, 85, 1921-1923. doi: 10.1016/j.fuel.2006.03.009.
- Otomotif. (2008). Pengaruh berat jenis pada pembakaran. Diakses dari <http://otomotif-inovatif.blogspot.com> pada 28 November 2014
- Pari, G., Santoso, A., Hendra, D., Buchari, Maddu, A., Rachmat, M., ... Darmawan, S. (2013). Karakterisasi struktur nano karbon dari lignoselulosa. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 31(1), 75-91.
- Peraturan Presiden (2006). *Kebijakan energi nasional* (Perpre no 5/2006, tanggal 25 Januari 2006).
- Putra, H. P., Hakim, L., Yuriandala, Y., & Anggraini, D. (2013). Studi kualitas briket dari tandan kosong kelapa sawit dengan perekat limbah nasi. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 5(1), 27-35.
- Rahmah, S., Sahan, Y., & Bahri, S. (2014). Konversi tongkol jagung menjadi *bio-oil* dengan bantuan katalis zeolit alam secara pyrolysis. *Jurnal Online Mahasiswa*, 1(1), 1-9.
- Rizky, M., Bahri, S., & Yusnimar. (2014). Konversi kayu ketapang (*Terminalia catappa* L) menjadi *bio-oil* menggunakan metode pirolisis dengan katalis Co-Mo/NZA. *Jurnal Online Mahasiswa*, 2(1), 1-10.
- Sensoz, S. (2003). Slow pyrolysis of wood barks from *Pinus brutia* Ten. and product compositions. *Bioresourc Technology*, 89, 307-311. doi: 10.1016/S0960-8524(03)00059-2.
- Simatupang, H., Nata, A., & Herlina, N. (2012). Studi isolasi dan rendemen lignin dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 1(1), 20-24.
- Sjostrom, E. (1998). *Kimia kayu. Dasar-dasar dan penggunaan*. Sastrohamidjojo H, (penerjemah) Yogyakarta: Gajah Mada University Press. Terjemahan dari: Wood Chemistry, Fundamentals and Applications. (Kedua). Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Stamatov, V. Ā., Honnery, D., & Soria, J. (2006). Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species. *Renewable Energy*, 31, 2108-2110. doi: 10.1016/j.renene.2005.10.004.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (1989a). (SNI 01-1303-1989) (1989a). *Cara uji kadar holoselulosa kayu* (SNI 01-1303). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) (1989b). SNI 14-0492-1989 (1989b). *Cara uji kadar lignin pulp dan kayu (Metoda Klason)* (SNI 14-0492). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) (1989c). SNI 14-1032-1989 (1989c). *Cara uji kadar sari (ekstrak alkohol benzena dalam pulp dan kayu)* (SNI 14-1032). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2009). SNI 0444: 2009 (2009). *Pulp - cara uji kadar selulosa alfa, beta dan gamma* (SNI 044). Badan Standardisasi Nasional.
- Sudradjat, R., & Hendra, D. (2011). Teknologi pengolahan bahan bakar nabati berbasis selulosa dan hemiselulosa (bio-oil). *Laporan Hasil Penelitian*. Puslitbang Hasil Hutan. Bogor.
- Sukarjo. (1997). *Kimia fisika*. Jakarta: PT Rineka Cipta.
- Susanti, P. D., Wahyuningtyas, R. S., & Ardhana, A. (2015). Pemanfaatan gulma lahan gambut sebagai bahan baku bio-briket. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 33(1), 35-46.
- Tadeus, A., Silalahi, I. H., Sayekti, E., & Sianipar, A. (2013). Karakterisasi katalis zeolit-ni regenerasi dan tanpa regenerasi dalam reaksi perengkahan katalitik. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 2 (1), 24-29.
- Wibowo, S. (2013). Karakteristik bio-oil serbuk gergaji sengon (*Paraserianthes falcataria* L. Nelsen) menggunakan pirolisis lambat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 31(4), 258-270.

- Wibowo, S. (2016). Karakteristik *bio-oil* dari limbah industri hasil hutan menggunakan pirolisis cepat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 34(1), 61–76.
- Wibowo, S., & Hendra, D. (2014). Teknologi pengolahan bahan bakar nabati berbasis selulosa dan hemiselulosa (*bio-oil*). *Laporan Hasil Penelitian*. Pustekolah, Bogor.
- Wibowo, S., & Hendra, D. (2015). Karakteristik *bio-oil* dari rumput gelagah (*Saccharum spontaneum* Linn.) menggunakan pirolisis cepat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 33(4), 347-363.
- Wiratmaja, I. G. (2010). Pengujian karakteristik fisika biogasoline sebagai bahan bakar alternatif pengganti bensin murni. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(2), 145-154.
- Zhang, H., Xiao, R., Huang, H., Xiao, G., & Xu, S. (2009). Bioresource technology comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor. *Bioresource Technology*, 100(3), 1428-1434. doi: 10.1016/j.biortech.2008.08.031.
- Zhang, L., Xu, S., Zhao, W., & Liu, S. (2007). Co-pyrolysis of biomass and coal in a free fall reactor. *Fuel* 86, 353-359. doi: 10.1016/j.fuel.2006.07.004.

Lampiran 1. Analisis ragam dan uji Duncan bio-oil

Appendix 1. Analysis of variance and Duncan test of bio-oil characteristics

No.	Sumber (<i>Source</i>)	Jumlah kuadrat (<i>Sum of squares</i>)	Kuadrat tengah (<i>Mean square</i>)	F-hitung (<i>F-calculated</i>)	sig
1.	Rendemen (<i>Recovery, %</i>) - Perlakuan katalis (<i>Catalyst treatment</i>)	150,574	37,643	20,158	0,000
2.	Kadar pH (<i>pH value</i>), - Perlakuan katalis (<i>Catalyst treatment</i>)	0,472	0,118	328,037	0,000
3.	Bobot jenis (<i>Density</i>) - Perlakuan katalis (<i>Catalyst treatment</i>)	0,002	0,00	7187,976	0,000
4.	Kekentalan (<i>Viscosity</i>) - Perlakuan katalis (<i>Catalyst treatment</i>)	1582,933	395,733	494,667	0,000
5.	Nilai kalor (<i>Calorific value</i>) Perlakuan katalis (<i>Catalyst treatment</i>)	280,113	70,028	776,907	0,000

Keterangan (*Remarks*): * berbeda nyata (*significantly different*)

Uji Duncan (*Duncan test*)

No.	Parameter (<i>Parameters</i>)	Nilai rata-rata untuk uji beda dari setiap perlakuan (<i>Average values for significant test</i>)				
		0%	2%	4%	6%	8%
1.	Rendemen (<i>Recovery</i>) %	20,39 a*	24,25 b	24,66 bc	30,27 e	25,72 bcd
2.	Kadar pH (<i>pH value</i>) %	2,487 a	2,653 b	2,86 c	2,933 d	2,94 d
3.	Bobot jenis (<i>Density</i>)	1,0954 e	1,0815 d	1,0758 c	1,0684 b	1,0673 a
4.	Viscositas (<i>Viscosity</i>)	18,67 a	28 b	46,33 e	44 d	36,67 c
5.	Nilai kalor (<i>Calorific value</i>)	17,26 a	27,56 c	27,89 cd	29,38 e	24,81 b

* Keterangan : angka yang diikuti huruf yang sama, tidak berbeda nyata
(*Remarks : numbers followed by the same letter were was not significantly different*)

Lampiran 2. Komponen kimia bio-oil TKKS
Appendix 2. The chemical components of bio-oil from TKKS

Puncak	0%		Kon. (%)	2%		Kon. (%)	4%		Kon. (%)	6%		17,67	8%		8,18
	Nama			Nama			Nama			Nama			Nama		
1	Phenol (CAS) Izal		23,58	5,5'-Diacarboxy-3-(2-chloromethyl)-4-(2-acetoxyethyl)-3,4-dimethylpyrromethane		0,09	Methanol (CAS) Carbinol		5,96	Methanol (CAS) Carbinol		17,67	Methanol (CAS) Carbinol		8,18
2	Phenol, 2-methyl- (CAS) o-Cresol		2,05	Acetaldehyde, hydroxy- (CAS)		0,72	Ethanol, 2-methoxy- (CAS) 2-Methoxyethanol		3,26	Acetic acid		4,29	(S)-Isopropyl lactate		3,95
3	Phenol, 4-methoxy- (CAS) Hqmmme		4,53	acetone-oxime		0,98	Acetic acid		5,51	Acetic acid		0,71	Acetic acid		8,44
4	2-Methoxy-4-methylphenol		2,34	Acetic acid, methyl ester		0,22	(3aR,6aS)-3,3a,6,6a-Tetrahydro-2H-cyclopenta[b]furan-2-ol		0,56	1-Acetoxy-2-propanol		1,35	Benzene		0,29
5	2-Methoxy-4-methylphenol		3,17	Hexane (CAS) n-Hexane		14,17	Benzene		0,58	3-Penten-2-one, (E)- (CAS) TRANS-ETHYLIDENE ACETONE		0,40	1-Acetoxy-2-propanol		3,50
6	Benzo furan, 2,3-dihydro- (CAS) 2,3-Dihydrobenzofuran		1,99	Cyclopentane, methyl-		0,58	Propanoic acid, 3-hydroxy-, methyl ester		2,20	2-Methoxytetrahydrofuran		0,12	3-Penten-2-one, (E)-		0,54
7	Phenol, 4-ethyl-3-methyl-		1,12	2-Butanal		0,39	3-Penten-2-one, (E)-		0,49	1,2-Ethandiol, monoacetate (CAS) 2-Hydroxyethyl acetate		0,11	2-Methoxytetrahydrofuran		0,14
8	2,3-Dimethoxytoluene		3,87	Benzene (CAS) Phene		0,76	Benzene, 2-propoxy- (CAS) ETHER, 2-BUTYL PROPYL		0,10	Benzene, methyl- (CAS) Toluene		1,77	Acetic acid, (acetyloxy)-		0,33
9	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		2,21	3-Penten-2-one, (E)- (CAS) TRANS-ETHYLIDENE ACETONE		1,52	Benzene, methyl- (CAS) Toluene		0,12	Acetic acid, methyl ester		0,26	Benzene, methyl- (CAS)		1,02
10	Phenol, 4-ethenyl-2-methoxy-		3,44	2-Butenal, 2-methyl-, (E)- (CAS) Tiglaldehyde		0,43	Benzene, methyl- (CAS) Toluene		1,37	3-Furaldehyde		0,08	Toluene		0,32
11	Phenol, 2,6-dimethoxy- (CAS) 2,6-Dimethoxyphenol		4,80	2-Methoxytetrahydrofuran		0,20	Pentanoic acid (CAS) Valeric acid		0,25	2-Furancarboxaldehyde (CAS) Furfural		1,70	Valeric acid		0,49
12	1-Pentadecene (CAS) Pentadec-1-ene		3,33	1,2-Epoxy-3-propyl acetate		0,18	Cyclopentanone		0,20	Cyclopentanone, 2-methyl- (CAS) 2-Methylcyclopentanone		0,11	Cyclopentanone		2,51
13	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)- (CAS) Eugenol		0,82	Benzene, methyl- (CAS) Toluene		0,21	3-Furaldehyde		0,11	Ethylbenzene		0,71	2-Furancarboxaldehyde (CAS) Furfural		0,19
14	-		0,65	Butanolic acid (CAS) n-Butyric acid		1,30	2-Furancarboxaldehyde (CAS) Furfural		2,06	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS) o-Xylene		0,61	Methylcyclopentanone		0,17
15	4-Methoxy-3-(methoxymethyl)phenol		1,75	Cyclopentanone		0,59	2-Methylcyclopentanone		0,11	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS) o-Xylene		1,26	5,9-Dodecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E,E)-		0,62
16	Biphenylene (CAS) 1,1'-Biphenylene (CAS) Diphenylene		3,07	Furan, 2,3-dihydro-2,5-dimethyl-		0,52	Ethylbenzene		0,65	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-cyclopentanone		0,80	(CAS) Phenylacetone		0,44
17	-		1,13	3-Furaldehyde		0,10	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS) o-Xylene		0,63	Ethanolone, 1-(2-furanyl)-		0,21	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS) o-Xylene		0,40
18	TRANS-METHYL ISO-EUGENOL		0,45	2-Furan carboxaldehyde (CAS) Furfural		0,21	Syrene		0,70	2(3H)-Furanone, dihydro- (CAS) Butyrolactone		0,50	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS) o-Xylene		0,20
19	Phenol, (1,1-dimethylethyl)-4-methoxy- (CAS) Butylated hydroxyanisole		1,48	Cyclopentanone, 2-methyl- (CAS) Methylcyclopentanone		2,84	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS) o-Xylene		0,29	Isopropylbenzene		0,61	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl-2-cyclopentanone		1,12
20	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)- (CAS) 4-Allyl-2,6-dimethoxyphenol		1,24	5,9-Dodecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E,E)-		0,21	Benzene, ethyl- (CAS) EB		0,71	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl- (CAS) 3-Methyl-2-cyclopentanone		0,44	Ethanolone, 1-(2-furanyl)-		0,24
21	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)- (CAS) 4-Allyl-2,6-dimethoxyphenol		1,63	Benzene, ethyl- (CAS) EB		0,17	Phenol		0,23	Phenol		21,73	2(3H)-Furanone, dihydro- (CAS) Butyrolactone		0,93
22	Hexadecanoic acid, methyl ester (CAS) Methyl palmitate		0,74			0,74	Butyrolactone		0,57	Benzene, ethenylmethyl- (CAS) ar-Methylstyrene		1,43	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-		0,12

Lampiran 2. Lanjutan
Appendix 2. Continued

Puncak	0%		Kon. (%)	2%		Kon. (%)	4%		Kon. (%)	6%		Kon. (%)	8%		Kon. (%)
	Nama			Nama			Nama			Nama			Nama		
23	Hexadecanoic acid (CAS)	Palmitic acid	22,18	Benzene, 1,2-dimethyl- (CAS)	o-Xylene	0,59	Acetophenone	0,62	Benzofuran (CAS)	Coumarone	1,49	Acetophenone	0,46		
24	9-Hexadecenoic acid (CAS)		4,93	Styrene		0,62	Phenol	24,60	-	-	0,12	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	1,07		
25	Octadecanoic acid (CAS)	Stearic acid	3,51	Ethylbenzene		0,38	Benzofuran (CAS)	1,42	Cyclopropane, tetramethylmethylen-		0,17	Phenol	28,78		
26				2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl- (CAS)	2-Methyl-2-cyclopentenone	0,90	-	0,12	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-		1,31	2-Cyclopenten-1-one, 3,4-dimethyl-	0,68		
27				Ethanone, 1-(2-furyl)-		0,29	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (CAS)	0,17	Indane		0,30	Benzofuran (CAS)	1,14		
28				Butyrolactone		0,61	1,3,5-Trimethylbenzene	1,26	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-		0,43	Coumarone	0,21		
29				Benzaldehyde (CAS)	Phenylmethanal	0,77	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl- (CAS)	0,31	1H-Indene, 1-chloro-2,3-dihydro-		1,69	4-Hepten-3-ol, 4-methyl-	0,22		
30				Phenol		29,76	3-Methyl-1,2-cyclopentanedione	0,38	Indane		2,55	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	2,09		
31				2-Cyclopenten-1-one, 3,4-dimethyl-		0,79	Indane	1,38	2-Cyclopenten-1-one, 2,3,4-trimethyl- (CAS)		0,97	Indane	0,34		
32				Benzofuran (CAS)	Coumarone	1,86	Acetic acid, phenyl ester	2,13	2-ENE-1-ONE		1,23	1,65-2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	0,74		
33				-		0,25	Ethanone, 1-phenyl- (CAS)	2,59	Acetophenone		0,37	Indene	1,01		
34				2-Furanmethanol, tetrahydro- (CAS)		0,18	Acetophenone	0,40	3-ETHYLCYCLOPENT-2-EN-1-ONE		4,42	Benzene, 1-ethoxy-2-methyl-	3,68		
35				Tetrahydrofurfuryl alcohol		0,24	3-ETHYLCYCLOPENT-2-EN-1-ONE	4,40	Phenol, 3-methyl-		1,11	2-Cyclopenten-1-one, 2,3,4-trimethyl-	1,40		
36				4-Hepten-3-ol, 4-methyl-		1,48	Phenol, 3-methyl-	1,30	Pheno, 2-methoxy-		0,17	Acetophenone	1,35		
37				2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- (CAS)	Corylon	0,29	Phenol, 2-methoxy-	0,24	Benzoic acid, methyl ester (CAS)		0,27	3-ETHYLCYCLOPENT-2-EN-1-ONE	0,59		
38				Benzene, 1-ethenyl-2-methyl-		0,54	Methyl benzoate	0,31	5-Methylbenzimidazole		0,43	2-EN-1-ONE	5,56		
39				2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-		1,28	5-Methylbenzimidazole	0,48	0,50 Benzofuran, 2-methyl-		0,5	Phenol, 3-methyl-	1,33		
40				Indene		2,12	5-Methylbenzimidazole	0,53	4,7-Methano-1H-inden-1-ol, 3,4,7,7a-tetrahydro-, acetate		0,07	Phenol, 2-methoxy-	0,20		
41				Acetic acid, phenyl ester		1,67	Benzofuran, 2-methyl-	0,56	Benzenecetonitrile (CAS)		0,16	arabinofuranosyluracil	0,21		
42				2-Cyclopenten-1-one, 2,3,4-trimethyl- (CAS)	2,3,4-TRIMETHYLCYCLOPENT-2-ENE-1-ONE	1,99	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	0,10	Benzoic acid, methyl ester (CAS)		1,03	Benzofuran, 2-methyl-	0,27		
43				Ethanone, 1-phenyl- (CAS)	Acetophenone	0,65	Benzeneethanol, alpha, alpha-dimethyl-, acetate	0,21	2-Methylindene		1,23	2-Cyclohexen-1-one, 4,4-dimethyl-	0,47		
44				3-ETHYLCYCLOPENT-2-EN-1-ONE	Phenol, 3-methyl-	3,15	2-Methylindene	1,07	2-Methylindene		0,63	Benzofuran, 2-methyl-	0,41		
									Tetracyclo[5.3.0.0<2,6>.0<3,10>]heca-4,8-diene			2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-			

Lampiran 2. Lanjutan
Appendix 2. *Continued*

Puncak	0%		2%		Kon. (%)		4%		Kon. (%)		6%		8%		
	Nama		Nama		Nama		Nama		Nama		Nama		Nama		
45			Phenol, 2-methoxy-		3,31		2-Methylindene		0,89		Phenol, 3-ethyl-		2-Methylindene		0,64
46			2,2'-Anhydro-1-arabino-furanosylsucral		0,44		Naphthalene, 1,2-dihydro- (CAS)		0,17		Naphthalene		Phenol, 3-ethyl-		1,92
47			Cinnamaldehyde, (E)-		0,40		Phenol, 2-ethyl-		1,47		Phenol, 2-methoxy-4-methyl-		Naphthalene (CAS) White tar		2,15
48			1H-Indazole, 3-methyl-		0,50		1-Dodecanol (CAS) n-Dodecanol		0,49		2,3-Dimethylbenzofuran		Phenol, 2-methoxy-4-methyl-		0,28
49			Benzofuran, 2-methyl-		0,61		Naphthalene		3,99		2-Ethyl-1-H-indene		Phenol, 2-methoxy-4-		0,20
50			2-Methylindene		1,12		Phenol, 2-methoxy-4-methyl-		0,38		1H-Indene, 1-ethenyl-2,3-dihydro-		1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-		0,82
51			2-Methylindene		0,90		2-Ethyl-1-H-indene		0,13		1H-Indene, 1,3-dimethyl-		Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		1,18
52			Phenol, 3-ethyl- (CAS) m-Ethylphenol		2,17		1H-Indene, 1,3-dimethyl-		0,46		1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro- (CAS) 1-Indanone		Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		0,65
53			Azulene (CAS) Cyclopentacycloheptene		2,87		1H-Indene, 1,3-dimethyl-		0,15		Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		Phenol, 2,6-dimethoxy- (CAS) 2,6-		0,78
54			2-Methoxy-4-methylphenol		0,46		1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro- (CAS) 1-Indanone		0,80		Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		Dimethoxyphenol Benzene, [(1-methylethylidene)cyclopropyl], (R)- (CAS) 1-PHENYL-2-		0,33
55			1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro- (CAS) 1-Indanone		1,01		Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		1,94		1,1'-Biphenyl (CAS) Biphenyl		LOPROPANE		0,32
56			Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		1,38		1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-2-methyl-		0,21		1-Tetradecanol (CAS) Alfol 14		1,1'-Biphenyl (CAS)		0,49
57			Naphthalene, 2-methyl-		0,94		Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methylnaphthalene		1,35		Naphthalene, 1-ethyl-		1-Tetradecanol (CAS) Alfol 14		0,32
58			Phenol, 4-ethenyl-2-methoxy-		0,90		1-(2,4-Dimethylphenyl)ethanol		0,66		Naphthalene, 2,6-dimethyl-		Naphthalene, 1,4-dimethyl- (CAS) 1,4-		0,24
59			1,1'-Biphenyl (CAS) Biphenyl		0,31		1,1'-Biphenyl (CAS) Biphenyl		0,48		Acenaphthylene, 1,2-dihydro- (CAS) Acenaphthene		Dimethylnaphthalene		0,71
60			1-Tetradecanol (CAS) Alfol 14		0,57		1-Tetradecanol (CAS) Alfol 14		0,75		Naphthalene, 1,4-dimethyl- (CAS) 1,4-Dimethylnaphthalene		Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)- (CAS)		0,15
61			Naphthalene, 1-ethyl-		0,38		Naphthalene, 1-ethyl-		0,39		Naphthalene, 1,7-dimethyl- (CAS) 1,7-		1-Hexadecanol (CAS) Cetal		0,21
62			Naphthalene, 1,4-dimethyl- (CAS) 1,4-Dimethylnaphthalene		0,30		Naphthalene, 2,6-dimethyl-		0,26		Naphthalene, 2-ethenyl-		Phenanthrene (CAS)		0,40
63			Naphthalene, 1,7-dimethyl- (CAS) 1,7-Dimethylnaphthalene		0,24		Naphthalene, 1,4-dimethyl- (CAS) 1,4-Dimethylnaphthalene		0,36		1.17 Acenaphthylene		Phenanthren		1,32
64			Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)- (E)- (CAS) (E)-Isoeugenol		1,54		Naphthalene, 1,7-dimethyl- (CAS) 1,7-Dimethylnaphthalene		0,25		Naphthalene, 2-ethyl-		Hexadecanoic acid, methyl ester 1-(+)-Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate		1,32

Lampiran 2. Lanjutan
Appendix 2. Continued

Puncak	0%		Kon. (%)	2%		Kon. (%)	4%		Kon. (%)	6%		Kon. (%)	8%		Kon. (%)		
	Nama			Nama			Nama			Nama			Nama				
65			0,15	1-Hexadecene (CAS) Cetene		0,21	Naphthalene, 2-ethenyl-		0,13	1-Hexadecene (CAS) Cetene		0,13			39,36		
66			0,19	1-Hexadecanol (CAS) Ceral		0,19	Acenaphthylene (CAS) Acenaphthalene		1,06	Acenaphthylene, 1,2-dihydro- (CAS) Acenaphthene		0,71					
67			0,28	Phenanthrene		0,28	Naphthalene, 1,3-dimethyl-		0,38	1,1'-Biphenyl, 4-methyl-		0,17			29,08		
68			0,57	Hexadecanoic acid, methyl ester		0,57	1-Hexadecene (CAS) Cetene		0,22	Dibenzofuran		0,22					
69			0,91	n-Hexadecanoic acid		0,91	Acenaphthylene, 1,2-dihydro- (CAS) Acenaphthene		0,44	9H-Fluorene (CAS) Fluorene		0,19					
70							Dibenzofuran (CAS)		0,23	Dodecane, 1,1'-oxybis- (CAS)		0,20					
71							Dibenzo[<i>b,d</i>]furan		0,10	DIDODECANE ETHER		0,30					
72							9H-Fluorene (CAS) Fluorene		0,25	Fluorene		0,13					
73							1-Hexadecanol (CAS) Ceral		0,24	9H-Fluorene (CAS) Fluorene		0,13					
74							Fluorene		0,24	Phenanthrene (CAS)		0,96					
74							9H-Fluorene (CAS) Fluorene		0,13	Phenanthren		0,38					
75							Phenanthrene (CAS) Phenanthren		0,66	Anthracene (CAS) Anthracin		0,49					
76							Phenanthrene (CAS) Phenanthren		0,23	Hexadecanoic acid, methyl ester		1,62					
77							Hexadecanoic acid, methyl ester		0,43	l-(+)-Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate		0,14					
78							l-(+)-Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate		7,45	Fluoranthene (CAS) 1,2-BENZACENAPHTHENE		0,28					
79							2-Phenyl-naphthalene		0,92	Pyrene (CAS) .beta.-Pyrene							
80							Pyrene (CAS) .beta.-Pyrene		0,19								
Total Phenol/turunan phenol													51,95	41,29	32,15	29,08	39,36