

Hidrogenasi Pirolisis Cangkang Sawit Menjadi *Bio-Oil* dengan Katalis HZSM-5

Asi Lamtiur, Sunarno dan Syaiful Bahri

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293
asicbryant52@gmail.com

ABSTRACT

Crude oil is a non renewable fossil fuel resources countinously declining on the other hand its demand for fuel keep increasing so the next few years is expected to experience a shortage of fuel. So it is needed an alternative energy as substitution for crude oil. One alternative way is to convert biomass into bio-oil. Palm shell biomass is one that can be processed into bio-oil through pyrolysis with hydrogenation process using a catalyst HZSM-5. It is expected to produce a bio-oil that approached the quality of the fuel. In this study, biomass, silinap 500 ml, and HZSM-5 catalyst is introduced into the slurry reactor, then flowed gas N₂ and H₂. at a temperature of 200⁰C. Variables measured in the study, i.e. biomass size -40 +60 mesh, biomass weight 50 g, stirring speed 300 rpm and flow rate of N₂ gas and H₂ gas were 80 ml / min. This study is aimed to determine the effect of temperature on the quality of the bio-oil produced. The Optimum yield of bio-oil obtained at 320 °C temperature conditions and the ratio of HZSM-5 catalyst and biomass 2% w/w, i.e. 53.664%. Characterization of bio-oil physical properties have given such as calorific value 43.412 MJ / kg; density of 1.042 g / ml; viscosity of 1.3 cSt; flash point of 40 ° C and 56.62 g NaOH / g sample respectively. GC-MS analysis of the results showed various components comprised of the bio-oil, among of them were acetic acid 43.92%, phenol 23.44%, methyl alcohol 14.63%, furancarboxaldehyde 4.65%, and propanoic acid 2.21% respectively.

Keywords : Biomass, Bio oil, HZSM- 5, Pyrolysis, Hydrogenation

1. Pendahuluan

Bahan bakar yang digunakan selama ini berasal dari minyak mentah yang diambil dari perut bumi, sedangkan minyak bumi merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui, sehingga untuk beberapa tahun ke depan diperkirakan masyarakat akan mengalami kekurangan bahan bakar. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan bahan bakar perlu dilakukan pengembangan berbagai energi alternatif yang dapat diperbaharui, yaitu dengan mengkonversikan biomassa menjadi *bio-oil*.

Industri kelapa sawit mempunyai potensi kontribusi yang sangat besar. Di Indonesia, luas perkebunan sawit di daerah Riau terluas dibandingkan daerah lainnya. Luas areal kelapa sawit di Riau hingga 2012 mencapai 2.1 juta Ha, dengan produksi kelapa sawit sebesar 7 juta ton pertahunnya[BPSPR, 2012].

Masalah yang ditimbulkan pada industri kelapa sawit salah satunya adalah limbah. Pada industri minyak sawit setiap harinya dihasilkan limbah yang terdiri dari limbah padat berupa tandan kosong sawit, serabut, dan cangkang sawit, sedangkan limbah cair berupa *sludge oil*. Limbah cangkang sawit yang dihasilkan sebanyak 6.5% per ton tandan buah segar. Hal ini menunjukkan bahwa, di provinsi Riau akan menghasilkan 1246 ton/hari limbah cangkang sawit. Limbah cangkang sawit yang dihasilkan akan bernilai ekonomis tinggi jika diolah lebih lanjut menjadi *bio-oil*.

Pirolisis adalah pemanasan biomassa atau bahan baku lainnya dengan keadaan tanpa oksigen pada waktu tertentu. Untuk melakukan pirolisis diperlukan bahan baku biomassa. Biomassa yang digunakan dalam penelitian ini merupakan limbah padat sawit yakni cangkang

sawit. Pentingnya penelitian ini dikarenakan *bio-oil* merupakan salah satu sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui dan ramah lingkungan. *Bio-oil* dapat digunakan untuk berbagai keperluan industri antara lain sebagai *combustion fuel* dan *power generation* untuk memproduksi bahan kimia serta dapat dicampur dengan minyak diesel sebagai bahan bakar mesin diesel.

Kebutuhan masyarakat terhadap bahan bakar minyak semakin meningkat, namun produksi minyak bumi sebagai pemasok utama bahan bakar semakin menipis, sehingga *bio-oil* dapat digunakan sebagai salah satu bahan bakar alternatif pengganti minyak bumi.

Sukiran [2008] Melakukan pirolisis tandan kosong kelapa sawit diperoleh *yield* terbesar 42.28% pada suhu 500°C, kecepatan pemanasan 100°C/min, ukuran partikel 91-106 µm, nilai kalor yang diperoleh adalah : 19.92 MJ/kg, pH : 3.1 dan densitas 0.88 gr/cm² serta total acid 68.63 (mg KOH/g). Widiyanto [2012] melakukan *pyrolysis* cangkang sawit dengan menggunakan katalis Ni/ZSM-5 dengan *yield* tertinggi didapat 58.7% pada suhu 310°C dan katalis Ni/ZSM-5 sebanyak 3% berat katalis. Hasil karakterisasi *Bio oil* secara fisika diperoleh densitas 0.981 gr/ml, viskositas 12.98 cSt, angka keasaman 80.3 gr NaOH/gr sampel, dan titik nyala 52°C.

Pada penelitian sukiran[2008] hasil nilai kalor menunjukkan belum mendekati nilai kalor *diesel oil*, sedangkan menurut Dinamotive[2006] nilai kalor diesel 44 MJ/Kg. Kekurangan lainnya dari penelitian diatas sebagai substitusi bahan bakar fosil, jika dibandingkan dengan minyak diesel maka densitas, titik nyala, dan viskositasnya perlu diperbaiki agar mendekati *properties diesel oil*. Berdasarkan Dinamotive [2006] *Diesel oil* memiliki densitas 0.84 kg/L(25°C), viskositas 6 cSt, dan titik nyala 35-60°C.

Untuk mendekati nilai kalor diperlukan modifikasi dari pirolisis biasa yaitu meningkatkan rasio H/C dari *Bio-oil*. Penambahan H₂ dapat menyebabkan penghilangan oksigen dengan *internal dehydration* dan *decarboxylation* selama awal proses pirolisis [Zhang et al., 1999]. Penghilangan oksigen meningkatkan nilai

kalor dan menuntun produk agar mendekati *properties* hidrokarbon. Hal ini dapat menghasilkan produk dengan rasio H/C yang lebih tinggi dan sejalan dengan meningkatnya nilai kalor produk [Goudriaan et al., 2000].

2. Metode Penelitian

Persiapan Biomassa

Pada tahap ini, biomassa dari cangkang kelapa sawit dicuci, dijemur, dikeringkan dalam oven untuk menghilangkan kadar airnya sampai beratnya konstan, kemudian dilakukan pengecilan ukuran dengan *mill grinder* dan diayak (*screening*) untuk memperoleh ukuran cangkang sawit yang lolos ayakan -40+60 mesh.

Sintesis HZSM-5

Sintesis ZSM-5 mengacu pada prosedur yang telah dilakukan oleh [Misdian, 2009] dengan kondisi suhu yaitu 175 °C, Rasio Si/Al 30 selama 18 jam. Terlebih dahulu akan dilakukan pembuatan silika terpresipitasi dan natrium aluminat. Pembuatan silika terpresipitasi menggunakan bahan baku abu sawit. Abu sawit yang berasal dari pabrik pengolahan sawit dikonversi menjadi silika terpresipitasi dengan cara yang telah dilakukan oleh Junaidi [2012].

Sumber alumina berupa natrium aluminat merupakan campuran Al(OH)₃ dan NaOH. Natrium aluminat dibuat dengan cara melarutkan 109,5 gr NaOH dalam 1000 ml akuades, ke dalam larutan tersebut dimasukkpn sebanyak 76 gr Al(OH)₃ sambil diaduk. Setelah semua Al(OH)₃ larut kemudian didiamkan hingga terbentuk endapan. Endapan kemudian disaring dan dipanaskan dalam oven sampai kadar airnya konstan [Zahrina dkk, 2006].

Sintesis ZSM-5 akan dilakukan dengan cara melarutkan natrium aluminat dengan jumlah tertentu dicampur dengan aquades (suspensi 1). Abu sawit yang telah dikonversi menjadi silika terpresipitasi dengan jumlah tertentu (sesuai nisbah molar SiO₂/Al₂O₃) dicampur dengan aquades (suspensi 2). Suspensi 1 dicampur dengan suspensi 2 (suspensi 3). Selanjutnya ke dalam suspensi 3 ditambahkan NaOH dengan jumlah tertentu

sehingga diperoleh nisbah $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 7,4. Dilakukan pengadukan selama 30 menit. Setelah itu dimasukkan dalam reaktor *autoclave* pada temperatur 175°C dan waktu selama 18 jam. Padatan yang terbentuk dicuci dengan aquades. Padatan dikeringkan dalam oven pada temperatur 110°C selama 6 jam.

Pembuatan HZSM-5 dilakukan dengan cara yang sama seperti yang dilakukan Rizqan [2011]. Pembentukan HZSM-5 dilakukan dengan cara ZSM-5 dilakukan pertukaran ion dengan NH_4NO_3 dengan konsentrasi 0,5M . Pertukaran ion ZSM-5 dengan NH_4NO_3 dilakukan pada suhu 80°C , kecepatan pengaduk 100 rpm selama 12 jam. Untuk basis 10 gr ZSM-5 dilarutkan dengan 300 ml NH_4NO_3 . HZSM-5 yang terbentuk disaring, dicuci dan dikeringkan pada suhu 90°C selama 24 jam. Kemudian HZSM-5 dikalsinasi pada suhu 500°C selama 5 jam.

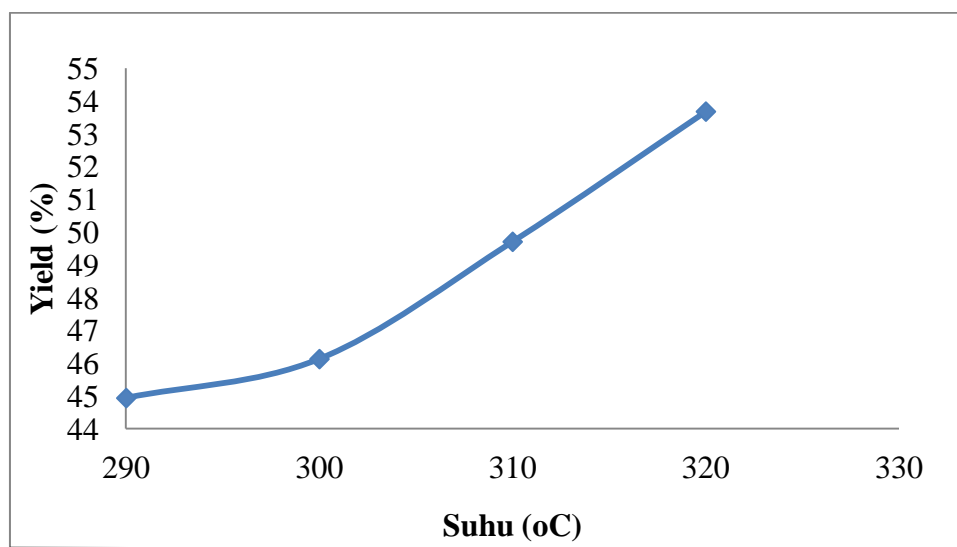
Pembuatan Bio-oil

Cangkang sawit yang telah dihaluskan sebanyak 50 gram beserta 500 ml *thermo oil* (silinap) dengan katalis 2 % dipirolisis pada variasi suhu 290°C , 300°C , 310°C , 320°C tanpa kehadiran oksigen dengan mengalirkan gas nitrogen 80 ml/menit, 5 menit setelah variabel suhu tercapai, N_2 dihentikan dan reaktor dialiri H_2 dengan kecepatan 80 ml/menit. Diaduk dengan pengaduk listrik (*Heidolph*) pada kecepatan pengadukan 300 rpm selama waktu tertentu hingga tidak ada *bio oil* yang menetes lagi, dan aliran air dengan menggunakan kondensor. *Bio oil* yang dihasilkan ditampung dalam gelas piala.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Suhu terhadap Yield Bio-oil yang Dihasilkan

Pada pengaruh suhu terhadap yield bio-oil yang di hasilkan dengan katalis HZSM-5 2 % dapat di lihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Pengaruh Suhu terhadap *Yield Bio-oil* yang dihasilkan

Hasil gambar 3.1 dapat dilihat hasil optimum yield bio-oil pada variasi temperature 320°C cukup tinggi dibandingkan dengan temperature 290°C , 300°C dan 310°C berturut-turut 44.928%, 46.116%, 49.694% dan 53.664 % . Hal ini disebabkan temperatur

3.2 Pengaruh Temperatur Hidrogenasi Pirolisis terhadap Kualitas Bio-oil

reaksi sangat mempengaruhi hasil *bio-oil*. Semakin tinggi suhu semakin tinggi juga *yield bio-oil* yang di hasilkan. Karena dari semakin tinggi suhu semakin banyak kandungan dari biomassa terdekomposisi menjadi *bio-oil*.

Pengaruh temperatur hidrogenasi pada katalis HZSM-5 2 % b/b dari biomassa didapatkan data hasil analisa pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Temperatur Pirolisis terhadap Kualitas *Bio-Oil* yang dihasilkan pada Katalis HZSM-5 2% dari Biomassa

T (°C)	Densitas (gr/ml)	Viskositas (Cst)	Angka Keasaman (gr NaOH/gr)	Nilai Kalor (Mj/kg)	Titik Nyala (°C)	Yield
290	1.046	1.1	21.947	-	-	44.928
300	1.034	1.2	29.628	-	-	46.116
310	1.044	1.2	40.821	-	-	49.694
320	1.04	1.3	56.622	43.412	40	53.664

Parameter yang menjadi sifat karakteristik *bio-oil* adalah densitas, viskositas, angka keasaman, nilai kalor dan titik nyala. Pada table 4.1 menunjukkan bahwa nilai uji fisika berdasarkan *yield bio-oil* optimum sebesar 53,664 % yang diperoleh pada suhu 320 °C dengan persen katalis sebanyak 2% yaitu densitas 1,042 gr/ml, viskositas 1,3 cSt, angka keasaman 56,622 gr NaOH/gr sampel, nilai kalor 43,412 MJ/Kg, dan titik nyala 40 °C.

Nilai densitas terendah terletak pada 2% katalis HZSM-5 pada suhu 320 °C yaitu sebesar 1.04 gr/ml, sedangkan nilai densitas tertinggi terletak pada suhu 290°C sebesar 1.046. Walaupun perubahan densitas tidak terlalu jauh menurun tetapi dengan penggunaan densitas yang rendah pada *bio-oil* dapat digunakan sebagai bahan bakar karena lebih ringan. Pada suhu 320 °C diperoleh viskositas yang rendah yaitu sebesar 1,3 cSt. Viskositas *bio-oil* yang diperoleh pada penelitian ini lebih kecil dari penelitian sebelumnya. Viskositas akan menurun jika kandungan air dan senyawa-senyawa oksigenat berkurang dalam *bio-oil* [Smallwood, 2008].

Pengujian angka keasaman *bio-oil* pada penelitian ini berkisar 21,947 –56,662gr NaOH/gr sampel dari suhu 290 – 320 °C. Dapat dilihat bahwa angka keasaman pada *bio-oil* yang dihasilkan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena hemiselulosa dan ligniselulosa pada cangkang sebagian besar tergradasi sebagai asam asetat di tambah lagi kadar lignin yang besar sehingga memungkinkan tergradasi sebagai asam asetat. Selain itu sifat yang terlalu asam ini tidak baik dalam hal penyimpanan dan pengaplikasian

bio-oil. Dengan sifat yang terlalu asam dapat berdampak terhadap sifat korosif bagi tempat penyimpanan dan alat-alat yang terbuat dari logam. Untuk pengaplikasian *bio-oil* sebagai pengganti atau aditif dalam bahan bakar, diperlukan pemurnian atau penyingkiran komponen asam yang berlebihan dalam *bio-oil*.

Nilai kalor merupakan ukuran panas atau energi yang dihasilkan., dan diukur sebagai nilai kalor kotor (*gross calorific value*) atau nilai kalor netto (*nett calorific value*). Nilai kalor yang terbesar diperoleh pada penelitian ini yaitu sebesar 43,412 MJ/kg, dimana nilai kalor ini masuk kedalam kategori nilai kalor dari *diesel oil* yaitu sebesar 44,8 MJ/kg. Penggunaan gas hidrogen mengakibatkan peningkatan yang sangat signifikan dari nilai kalor *bio-oil* yang dihasilkan dan menurunkan viskositas dari *bio-oil* yang dihasilkan [Ahmad, 2010]. Semakin besar nilai kalor, maka kualitas bahan bakar semakin baik karena rasio H/C yang dimiliki semakin besar, sedangkan kadar airnya semakin rendah [Goundarian dkk, 2000]. Titik nyala dari *bio-oil* yang dihasilkan yaitu sebesar 40°C pada suhu 320 °C. Dengan titik nyala yang terlalu rendah, dikhawatirkan dapat menyebabkan *bio-oil* mudah terbakar pada suhu lingkungan.

Data hasil perbandingan karakterisasi sifat fisika *bio-oil* pada penelitian ini dan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Perbandingan Spesifikasi *Bio-oil* dengan Peneliti Sebelumnya

Peneliti	Uji Sifat Fisika				
	Densitas	Viskositas cSt	Angka Keasaman	Nilai Kalor (MJ/kg)	Titik Nyala (°C)
Asi, 2013	1,04 gr/ml	1,3	56,62gr NaOH/gr sampel	43,412	40
Widianto, 2011	0,981 gr/ml	12,98	80,3gr NaOH/gr sampel	-	52
Sukiran, 2008	0,88 gr/cm ²	-	68,63 gr KOH/gr sampel	19,92	-

Dari Tabel 3.2 menunjukkan bahwa nilai kalor pada penelitian ini jauh lebih tinggi bila dibandingkan pada penelitian-penelitian sebelumnya yaitu 43,412 MJ/Kg pada katalis 2% b/b dari biomassa dan hampir mendekati nilai kalor solar yaitu sebesar 44,8 MJ/Kg. Viskositas *bio-oil* pada yang dihasilkan 1,3 cSt jauh lebih rendah daripada penelitian widianto yaitu 12,98 cSt, dengan viskositas yang lebih rendah akan lebih memudahkan proses pemindahan *bio-oil* dari suatu tempat ke tempat yang lain. Penggunaan hidrogen mengakibatkan peningkatan yang sangat signifikan dari nilai kalor *bio-oil* yang dihasilkan dan menurunkan viskositas dari *bio-oil* yang dihasilkan [Ahmad, 2010].

Nilai densitas *bio-oil* yang sedikit lebih rendah dari nilai densitas air. Dengan densitas yang kecil, penggunaan *bio-oil* sebagai bahan

bakar akan menguntungkan karena lebih ringan. Titik nyala *bio-oil* pada penelitian ini yaitu 40 °C, nilai titik nyala ini masuk dalam batas standar diesel oil Dynamotive yaitu 35-60 °C. *Bio-oil* tersusun dari banyak senyawa asam, hal ini tentu saja akan mempengaruhi terhadap angka keasaman dan pH dari *bio-oil* tersebut. Angka keasaman *bio oil* pada yang dihasilkan 56,62 gr NaOH/gr sampel pada katalis 2 b/b dari biomassa. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *bio-oil* yang dihasilkan dari proses hidrogenasi *pyrolysis* cangkang sawit menggunakan katalis HZSM-5 perlu penanganan lebih lanjut sebelum di aplikasikan sebagai bahan bakar. Perbandingan sifat fisika *bio-oil* yang dihasilkan dengan bahan bakar dapat dilihat pada table dibandingkan 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Perbandingan Karakterisasi Sifat fisika *Bio-oil* dengan *Diesel-oil*

Uji Karakteristik	Diesel Oil	<i>Bio-oil</i> Hasil Penelitian
Densitas	0,84 Kg/L [Dynamotive, 2006]	1,04 gr/ml
Viskositas	6 cSt [Dynamotive, 2006]	1,3 cSt
Titik nyala	35-60 C [Dynamotive, 2006]	40 °C
Angka Keasaman	-	56,62gr NaOH/gr sampel
Nilai Kalor	42 MJ/Kg [Dynamotive, 2006]	43,412 MJ/kg

Berdasarkan Tabel 3.3, *bio-oil* memiliki sifat fisika yang mendekati solar. Berdasarkan kemiripan sifat fisika tersebut maka *bio-oil* memiliki potensi yang lebih besar untuk menggantikan atau sebagai aditif solar

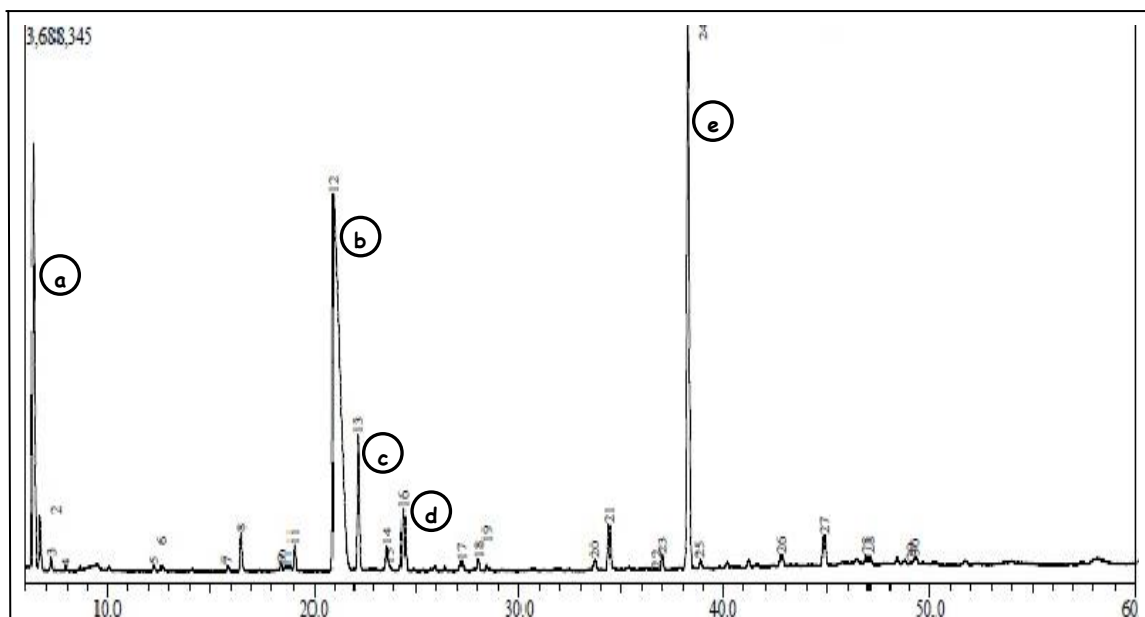
dibandingkan dengan bahan bakar minyak lainnya.

3.3. Karakteristik Sifat Fisika dan Kimia *Bio-oil*

Hasil *bio-oil* dengan pada suhu 320°C HZSM-5 2 % b/b dari biomassa dilakukan

analisa fisika nilai kalor, massa jenis, viskositas, pH, angka keasaman, titik nyala dan analisa kimia berupa kromatografi gas-spektroskopi massa (GC-MS). Analisa GC-

MS menghasilkan kromatogram yang menyatakan jumlah persentasi komponen kimia yang terkandung di dalam *bio-oil*.



Gambar 3.2 Hasil Kromatogram GC *Bio-oil* Cangkang Sawit dengan suhu 320°C dan 2 % katalis HZSM-5 dari biomassa

Dimana dari hasil kromatogram MS :

- a = Methyl alcohol
- b = Acetic Acid
- c = Furancarboxaldehyde
- d = Propanoic Acid
- e = Phenol

Pada Gambar 3.4 memperlihatkan komponen-komponen yang terdapat dalam *bio-oil* yang diperoleh. Berdasarkan hasil analisis GC-MS terlihat terdapat 5 komponen yang dominan dengan puncak-puncak tertinggi. Fenol menjadi komponen dengan puncak tertinggi dengan luas area 23,44 % (e). Komponen lain yang dominan adalah Asam Asetat (c) dan merupakan satu-satunya komponen yang dominan dengan luas area 43,92 %, namun tidak mendukung *bio-oil* menjadi bahan bakar alternatif, komponen lain yang dominan adalah methyl alcohol 14,63 %, furancarboxaldehyde 4,65 %, propanoic acid 2,21 %.

Berdasarkan hasil analisis GC-MS diketahui ada beberapa senyawa yang terkandung di dalam *bio-oil* yang memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif

pengganti minyak bumi seperti senyawa benzene 0,53 % dan senyawa ethanol 1,71 %, dimana senyawa – senyawa ini salah satu penyusun bahan bakar. Metanol sangat baik digunakan sebagai bahan bakar yang dapat mengurangi pencemaran udara karena metanol tidak menghasilkan gas CO, tetapi hanya sedikit CO₂.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Yield bio-oil tertinggi 53,66 % (kondisi optimum) diperoleh melalui proses *pyrolysis* pada suhu 320°C dan katalis HZSM-5 sebanyak 2 % berat biomassa cangkang sawit. Hasil karakterisasi sifat fisika *Bio oil* berupa nilai kalor = 43,412 Mj/kg densitas = 1,04 gr/ml; viskositas = 1,04 cSt; titik nyala = 40 °C; pH = 3,6 dan angka keasaman = 56,62 mg NaOH/gr sampel. Hasil analisa GC-MS menunjukkan komponen dalam *bio-oil* antara lain asam asetat (43,92%), fenol (23,44 %), methyl alkohol (14,63 %), furancarboxaldehyd (4,65%), pronanoic acid (2,21%)

4.2 Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut *pyrolysis* cangkang sawit menggunakan katalis jenis lain dengan pengembangan logam. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai variasi laju alir gas hydrogen guna untuk membandingkan kualitas *bio-oil* yang dihasilkan.

5. DaftarPustaka

- Ahmad, M.M., Nordin, R.F.M., and Azizan, M.T, 2010, Upgrading of Bio-Oil into High-Value Hydrocarbons via Hydrodeoxygenation, *American Journal of Applied Sciences* 7 (6): 746-755
- Badan Pusat Statistik Provinsi Riau, 2012. <http://riau.bps.go.id/publikasi-online/riau-dalam-angka/perkebunan.html-0>, diakses pada 16 Mei 2013.
- DynaMotive (2006). DYNAMOTIVE The Bio Oil Information Book, edisi 13 Maret, Dynamotive Energy System Corporation, Vancouver (BC), Canada.
- Goundarian, F., van de beld, B., Boerefijn, F.R., Bos, G.M., Neber, J.E., van der wal, S., dan Zeevalkink, J.A. (2000). Thermal Efficiency of the HTU process for Biomass Liquifaction. Paper presented at *Progress in Thermochemical Biomass Conversion Conference*, Bridgewater, A.V (Ed). Tyrol. Austria, September 18-21, PP. 1312-1325.
- Jing gan. 2012 . Hidrothermal Conversion of Lignocellulosic Biomass to Bio-oils, Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas
- Junaidi, Wan. 2012. Hidrogenasi Pyrolysis Cangkang Sawit Menjadi Bio-Oil dengan Katalis ZSM-5, Skripsi Sarjana, Universitas Riau.
- Pertamina, 2008. Silinap, www.lubrisindo.tripod.com/index_file/page3558.htm-71k, diakses pada 28 Oktober 2012.
- Rizqan. 2011. Sintesis Katalis HZSM-5 Dari Abu Sawit Untuk Proses *Catalitic Cracking* Tandan Kosong Sawit Menjadi Bio-Oil, Skripsi Sarjana, Universitas Riau, Pekanbaru.
- Smallwod. (2008). Hydroprocessing of Pyrolysis Bio-oil to Fuel and Chemical, Pacific Northwest National Laboratory, US Departemant of Energy
- Sukiran, MAB. (2008). Pyrolysis Of Empty Oil Palm Fruit Bunches Using them Quartz Fluidised- Fixed Bed Reactor, Dissertation, University Of Malaya, Kuala Lumpur
- Vempati R. K. (2002). ZSM-5 Made From Siliceous Ash, US Patent No. 6.368.571 B1.
- Widianto, R., 2012, Pyrolysis Cangkang Sawit menjadi Bio-oil dengan Katalis Ni/ZSM-5, Skripsi Sarjana, Universitas Riau, Pekanbaru.
- Zahrina, I., Saputra, E., Evelyn, Santoso, I. A., dan Ramelo, R. (2006). Sintesis ZSM-5 Tanpa Templat Menggunakan Silika Terpresipitasi Asal Abu Sawit Sebagai Sumber Silika, *Jurnal Natur Indonesia*, Volum 9, No. 2, Lembaga Penelitian Universitas Riau, Pekanbaru.
- Zhang, S. P., Yan, Y., Li, T., dan Ren, Z. Upgrading of Liquid Fuel from the Pyrolysis of Biomass. *Bioresour. Technol.* 2005, 96, 545-550.