

Konversi Termal Kayu Akasia (*Acacia Mangium*) menjadi *Bio-oil* dengan Teknologi Pirolisis Menggunakan Katalis Mo/NZA

Adilla Meliagustin, Saiful Bahri, Amun Amri

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Binawidya Jl. HR Subrantas Km. 12,5 Pekanbaru 28293
Adillaneliagustin@yahoo.co.id

ABSTRACT

Availability of petroleum fuels are increasingly limited. Limitations of petroleum fuels will not be balanced with the needs of the community will fuel increased day by day. To overcome these problems needed alternative energy sources that can be updated is one of the bio-oil. Bio-oil is produced from biomass with the pyrolysis process, in the absence of oxygen. The purpose of this research was the synthesis of bio-oil from akasia wood, determine the effect of the impregnation percentage of Mo metal and ratio of catalyst Mo/NZA on the yield of bio-oil and determine the physical and chemical characteristics of bio-oil. Pyrolysis using 50 grams acacia wood, 500 ml silinap and Mo/NZA catalyst with variations of the impregnation percentage of Mo metal 0%, 1%, 3% and 6%, and the variations ratio of catalyst Mo/NZA 3%, 6% and 9% of the biomass with a stirring speed of 300 rpm and a temperature of 320°C for 120 minutes. In this research, the highest yield on the variation of the impregnation percentage of metal 3% and the ratio of catalyst 9% of the biomass amounted to 76,084%. Characteristics of bio-oil obtained were density 0,827 gr/ml, viscosity 2,032 cSt, acid number 88,677 mg NaOH /gr sample, and the flash point 43 °C. The results of GC-MS analysis, the dominant chemical components in the bio-oil were Cyclohexane (13,477%), 2,4-Hexadiene (2,610%), 6-Tridecene (1,920%), Propane (1,684%) and 4-Nonene (0,619 %).

Keyword: Bio-oil, pyrolysis, catalyst Mo/NZA, akasia wood

1. Pendahuluan

Ketersediaan bahan bakar minyak bumi yang semakin hari semakin terbatas sudah merupakan isu global dunia khususnya Indonesia. Cadangan minyak bumi Indonesia pada saat ini hanya mencapai 700-800 ribu barel per hari. Keterbatasan akan bahan bakar minyak bumi tidak diimbangi dengan kebutuhan masyarakat akan bahan bakar yang semakin hari semakin meningkat. Kebutuhan bahan bakar minyak bumi Indonesia mencapai 1,3 juta barel per hari. Ini artinya, untuk memenuhi kekurangannya kita harus impor. Namun yang mengkhawatirkan adalah dengan cadangan minyak bumi kita yang semakin menurun itu, minyak bumi kita akan habis dalam waktu 12 tahun saja. Dengan perhitungan, jika sampai hari ini tetap tak ada sumber minyak bumi baru yang ditemukan [BPH Migas, 2012].

Selain itu, masalah lain yang juga mengkhawatirkan saat ini adalah polusi udara dan efek rumah kaca yang sebagian besar diakibatkan oleh emisi gas buang dari penggunaan bahan bakar minyak bumi. Ini mendorong kita untuk berupaya agar tidak bergantung sepenuhnya dengan minyak bumi, dengan mencari bahan bakar alternatif yang bersifat terbarukan, mudah didapat, mudah diolah dan ramah lingkungan. Salah satunya ialah dengan memproduksi *bio-oil* dari biomassa yang diproses melalui teknologi pirolisis.

Biomasa merupakan produk reaksi fotosintetik dari karbon dioksida dengan air, yang terdiri atas karbon, oksigen dan hidrogen, yang terdapat dalam bentuk polimerik makroskopik kompleks [Ningrum, 2011]. Biomassa berupa kayu sering digunakan pada proses pirolisis karena kekonsistenan pembakarannya dibandingkan

dengan bahan baku yang lain [Mohan *et al.*, 2006].

Salah satu kayu potensial tersebut ialah Akasia (*Acacia Mangium*). Akasia adalah tanaman yang distribusinya luas, karena tumbuhan akasia dapat hidup pada iklim tropis, subtropis dan berbagai jenis tanah. Akasia dapat tumbuh baik pada tanah yang memiliki pH 4,2. Tumbuh pada ketinggian antara 30-130 m diatas permukaan laut, dengan curah hujan bervariasi antara 1.000 mm-4.500 mm setiap tahun.

Untuk menghasilkan *bio-oil* dengan bahan baku biomassa dilakukanlah proses konversi yaitu pirolisis. Pirolisis adalah dekomposisi bahan organik secara termokimia pada temperatur tinggi tanpa menggunakan oksigen. Pirolisis menyebabkan perubahan pada komposisi, baik fisik maupun kimiawi, dan bersifat *irreversible*.

Selain itu, untuk mempercepat terjadinya reaksi pada proses pirolisis, maka diperlukan adanya katalis. Katalis merupakan bahan yang digunakan dalam proses yang berfungsi untuk mempercepat terjadinya reaksi. Zeolit merupakan katalis yang cukup efektif digunakan pada proses *cracking*, *isomerization* dan *hydrocarbon alkylation*. Salah satu sifat penting katalis adalah tingkat keasamannya. Keasaman zeolit dapat ditingkatkan dengan cara pengembanan logam-logam transisi yang memiliki orbital d belum terisi penuh. Pengembanan logam Mo ke dalam zeolit tidak merusak kristalinitas zeolit [Trisunaryanti *et al.*, 2005].

2. Bahan dan Metodologi

Bahan dan Peralatan

Bahan-bahan yang diperlukan adalah kayu akasia, zeolit alam, HCl 6 N, NH₄Cl 1 N, AgNO₃, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O, aquades, gas N₂, O₂, dan H₂, NaOH 0,1 N, asam oksalat 0,2 N, indikator PP dan silinap.

Peralatan yang digunakan adalah lumpang porcelain, *crusher*, pengayak 100 dan 200 mesh, reaktor alas datar ukuran 1 L, , satu set motor pengaduk, kontrol suhu, oven, *heating mantel*, timbangan analitik, tabung dan regulator gas N₂, O₂ dan H₂, reaktor pirolisis, pengaduk listrik, *tube furnace*, *condenser*,

thermocouple thermometer (Barnant), piknometer, *viskometer* Ostwald, gelas piala, buret, erlenmeyer, kertas saring, pipet tetes, gelas ukur, corong dan GC-MS (kromatografi gas-spektrometer massa).

Metode Penelitian

Pembuatan Katalis Mo/NZA

Tahap pertama zeolit alam digerus dalam lumpang porcelain untuk memperkecil ukuran partikel, kemudian diayak dengan ukuran -100+200 mesh dengan ketentuan ukuran partikel yang diambil merupakan partikel-partikel yang lolos pada pengayak 100 mesh dan tertahan pada pengayak 200 mesh.

Tahap berikutnya aktivasi zeolit dengan perlakuan HCl dan NH₄Cl. Zeolit alam sebanyak 100 gram direfluks dalam larutan HCl 6 N sebanyak 500 ml selama 30 menit pada suhu 50°C sambil diaduk dengan motor pengaduk pada reaktor alas datar volume 1 liter, kemudian disaring dan dicuci berulang kali sampai tidak ada ion Cl⁻ yang terdeteksi oleh larutan AgNO₃ (terbentuknya endapan putih), *cake* dikeringkan pada suhu 110°C selama 3 jam dalam oven. Sampel tersebut kemudian direndam kembali dalam 500 ml larutan NH₄Cl 1 N pada temperatur 90°C sambil diaduk pada reaktor alas datar selama 3 jam per hari yang dilakukan sampai satu minggu. Sampel tersebut kemudian disaring, dicuci, dan dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 110°C. Pada tahap ini didapat sampel yang dinamakan NZA (zeolit alam aktif).

Tahap selanjutnya dilakukan pengembanan (*impregnasi*) logam Mo dengan cara sampel NZA dicampur dengan 100 ml (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O dan direfluks pada suhu 60°C selama 6 jam sambil diaduk pada reaktor alas datar ukuran 1 L. Kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C, sehingga didapat sampel Mo/NZA.

Setelah itu dilakukan kalsinasi, oksidasi, dan reduksi dengan cara sampel katalis dimasukkan ke dalam *tube* yang sebelumnya telah diisi dengan *porcelain bed* sebagai *heat*

carry dan penyeimbang unggun katalis, diantara *porcelain bed* dengan unggun katalis diselipkan *glass woll*. Tube ditempatkan dalam *tube furnace* secara vertikal, dikalsinasi pada suhu 500°C selama 6 jam sambil dialirkan gas nitrogen sebesar ± 400 ml/menit, dilanjutkan dengan oksidasi pada suhu 400°C menggunakan gas oksigen sebesar ± 400 ml/menit selama 2 jam dan reduksi pada suhu 400°C menggunakan gas hidrogen sebesar ± 400 ml/menit selama 2 jam.

Pembuatan Bio-oil

Tahap pertama biomassa berupa kayu akasia dipotong kecil-kecil lalu dijemur sampai kering dibawah terik matahari, kemudian dihaluskan menggunakan *crusher*. Biomassa kemudian diayak untuk memperoleh ukuran yang lolos ayakan - 100+200 mesh.

Biomassa sebanyak 50 gram beserta 500 ml silinap dan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 0% sebanyak 3% b/b biomassa, dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Proses pirolisis berlangsung pada suhu 320°C tanpa kehadiran oksigen dengan mengalirkan gas nitrogen 80 ml/menit dan diaduk dengan pengaduk listrik pada kecepatan pengadukan 300 rpm selama 2 jam. Kemudian terbentuk gas, gas yang terbentuk ini akan di kondensasi menggunakan kondensor sehingga dihasilkan *bio-oil*, selanjutnya produk *bio-oil* tersebut ditampung dalam *beaker glass*. Diulangi untuk variasi persentase pengembunan logam 1%; 3%; 6% dan variasi rasio katalis sebesar 6%; 9% b/b terhadap biomassa.

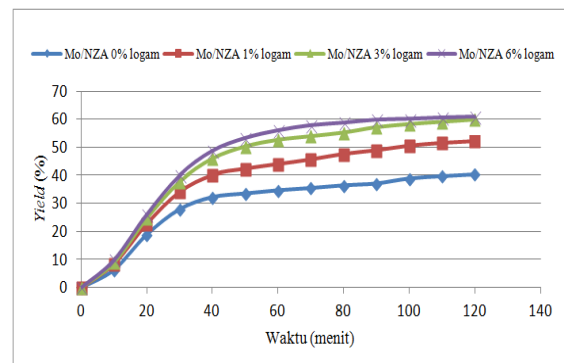
3. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Persentase Pengembunan Logam Mo pada Yield Bio-oil

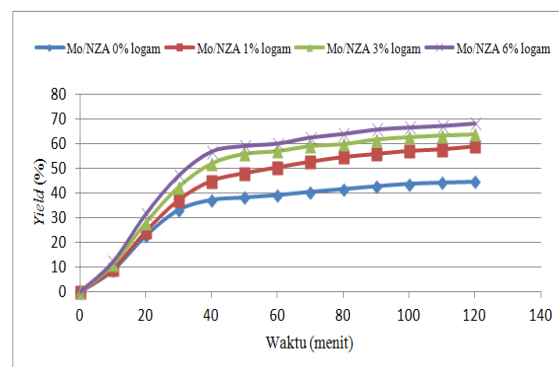
Untuk menentukan pengaruh persentase logam yang diembankan terhadap NZA digunakan variasi persentase logam yaitu 0%, 1%, 3% dan 6% dan variasi rasio katalis 3%, 6%, dan 9% terhadap biomassa.

Pengaruh variasi persentase pengembunan logam Mo/NZA dengan variasi rasio katalis

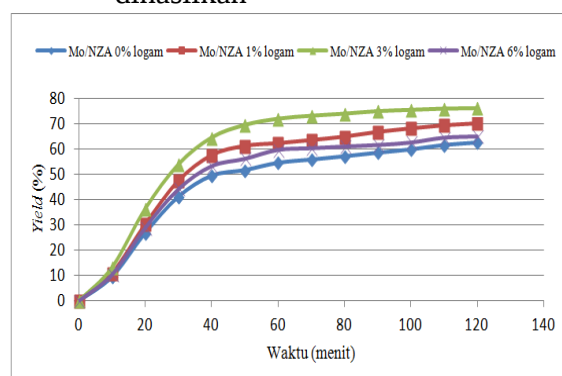
3%, 6% dan 9% terhadap biomassa pada *yield bio-oil* yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 1, 2 dan 3 dibawah ini.



Gambar 1. Pengaruh persentase pengembunan logam pada rasio katalis 3% terhadap biomassa pada *yield bio-oil* yang dihasilkan



Gambar 2. Pengaruh variasi persentase pengembunan logam Mo/NZA dengan rasio katalis 6% terhadap biomassa pada *yield bio-oil* yang dihasilkan



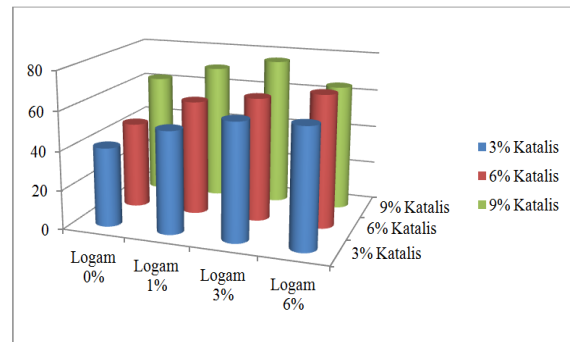
Gambar 3. Pengaruh variasi persentase pengembunan logam Mo/NZA dengan rasio katalis 9% terhadap biomassa pada *yield bio-oil* yang dihasilkan

Dari Gambar 1 dan 2 dapat dilihat bahwa pengembangan logam Mo mempengaruhi perolehan *yield* yang didapat pada proses pirolisis. Hal ini dapat dilihat dari *yield bio-oil* yang diperoleh, pada penggunaan Mo/NZA dengan persentase pengembangan logam 0% sampai 6% terjadi peningkatan *yield bio-oil*, dimana *yield bio-oil* pada persentase pengembangan logam 6% untuk variasi rasio katalis 3% dan 6% terhadap biomassa yakni 60,8% dan 68,04%.

Akan tetapi, dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada variasi rasio katalis 9% terhadap biomassa terjadi penurunan *yield bio-oil* dengan semakin meningkatnya persentase logam yang diimbangkan pada NZA. *Yield bio-oil* pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembangan logam 6% lebih rendah dibandingkan dengan pengembangan logam 3% yakni 64,8%. Setyawan dan Handoko [2002] menyampaikan bahwa semakin banyak logam terimpregnasi secara merata pada permukaan padatan diharapkan luas permukaan spesifik dari padatan akan semakin luas, tetapi kenyataannya tidak selalu demikian. Peningkatan konsentrasi logam yang diimpregnasikan dapat menyebabkan menurunnya aktivitas suatu katalis. Semakin tinggi konsentrasi Mo yang diimpregnasi, Mo yang terimpregnasi semakin besar (banyak), akan tetapi mengakibatkan luas permukaan spesifik menurun. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa pada konsentrasi Mo yang tinggi logam Mo yang terimpregnasi terakumulasi pada satu tempat dan menutup mulut pori dan saluran pori, sehingga jumlah Mo yang relatif banyak tidak meningkatkan LPS dari suatu padatan (terjadi sintering) [Setyawan dan Handoko, 2002].

Pengaruh Rasio Katalis Mo/NZA terhadap Biomassa pada *Yield Bio-oil*

Untuk mengetahui pengaruh dari rasio katalis Mo/NZA terhadap biomassa pada *yield bio-oil*, telah dilakukan proses pirolisis dengan variasi rasio katalis sebesar 3%, 6% dan 9% terhadap biomassa.



Gambar 4. Pengaruh rasio katalis Mo/NZA terhadap biomassa pada *yield bio-oil* pirolisis kayu akasia pada 120 menit

Dari Gambar 4 terlihat *yield bio-oil* yang diperoleh pada penggunaan katalis Mo/NZA 3% sampai 6% berat terhadap biomassa terus mengalami kenaikan. *Yield bio-oil* pada persentase pengembangan logam 0%, 1%, 3% dan 6% dengan rasio katalis 3% terhadap biomassa berturut-turut adalah 40,50%, 52,35%, 59,92% dan 60,80%. Sedangkan *yield bio-oil* pada persentase pengembangan logam 0%, 1%, 3% dan 6% dengan rasio katalis 6% terhadap biomassa berturut-turut adalah 44,49%, 59,05%, 63,50% dan 68,04%.

Pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan variasi persentase pengembangan logam 6%, *yield bio-oil* yang dihasilkan pada variasi rasio katalis 9% lebih rendah dibandingkan dengan rasio katalis 6% terhadap biomassa. Penurunan *yield bio-oil* ini kemungkinan disebabkan karena banyaknya produk gas *non condensable* yang terbentuk, dimana pada saat proses perengkahan lebih banyak menghasilkan fraksi-fraksi hidrokarbon ringan yang tidak dapat dikondensasi. Jenis hidrokarbon tersebut memiliki titik didih lebih rendah daripada temperatur lingkungan sehingga dengan penambahan konsentrasi katalis yang relatif tinggi telah menurunkan jumlah *yield bio-oil*.

Karakterisasi *Bio-oil*

Bio-oil yang sudah diperoleh selanjutnya dikarakterisasi dengan melakukan perhitungan *yield bio-oil*, analisa fisika berupa penentuan densitas, viskositas dan titik nyala. Serta analisa kimia berupa penentuan angka asam dan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*).

Hasil karakteristik *bio-oil* dari pirolisis kayu akasia (*Acacia Mangium*) dapat dilihat pada Tabel 1. Nilai densitas *bio-oil* pada penelitian ini berkisar 0,760 – 0,827 gr/ml. Dimana nilai densitas terendah terletak pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 6% dan rasio katalis Mo/NZA 3% terhadap biomassa sebesar 0,760 gr/ml, sedangkan nilai densitas tertinggi terletak pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 3% dan rasio katalis Mo/NZA 9% terhadap biomassa sebesar 0,827 gr/ml. Nilai densitas dari *bio-oil* dipengaruhi oleh berat molekul (BM) komponen-komponen yang terkandung di dalamnya. Semakin tinggi BM yang dikandungnya, maka semakin tinggi pula densitasnya. Hal ini dapat menyebabkan bertambahnya biaya transportasi pada pendistribusinya. Selain itu, keadaan ini juga menimbulkan resiko terhadap terjadinya kebocoran pada pipa serta bertambahnya biaya perpompaaan karena *pressure drop* yang tinggi [Mohan *et al*, 2006].

Tabel 1. Karakteristik *bio-oil* kayu akasia

Logam (%)	Katalis (%)	Yield	Densitas (gr/ml)	Viskositas (cSt)	Angka Keasaman (mg NaOH/gr sampel)	Titik Nyala (°C)
0	3	40,50	0,810	2,967	87,995	42
	6	44,49	0,809	2,530	96,761	41
	9	62,32	0,795	3,118	91,728	41
1	3	52,35	0,818	2,776	70,009	42
	6	59,05	0,777	2,266	91,202	42
	9	70,16	0,766	2,832	98,966	42
3	3	59,92	0,799	2,555	70,127	43
	6	63,50	0,784	2,309	93,540	42
	9	76,08	0,827	2,416	88,677	43
6	3	60,80	0,760	2,097	77,521	46
	6	68,04	0,810	2,011	79,856	44
	9	64,80	0,800	2,014	98,365	45

Viskositas yang tinggi pada *bio-oil* menyebabkannya sulit untuk mengalir dengan baik selama proses distribusi dan penyimpanannya. Nilai viskositas pada penelitian ini berkisar 2,011 – 3,118 cSt. Nilai viskositas tertinggi terletak pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 0% dan rasio katalis 9% terhadap biomassa sebesar 3,118 cSt.

Keasaman yang tinggi dari bahan bakar cair dapat menyebabkan korosi pada bahan-bahan yang biasanya dipakai sebagai tempat

penyimpanannya, yakni yang terbuat dari *carbon steel* ataupun *stainless steel*. Oleh karena itu, semakin rendah angka keasaman berarti semakin baik kualitas *bio-oil*-nya. Dari Tabel 1 terlihat bahwa angka keasaman *bio-oil* dari kayu akasia tertinggi terdapat pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 1% dan rasio katalis 9% terhadap biomassa sebesar 98,966 mg NaOH/gr sampel. Semakin tinggi angka keasaman *bio-oil* menunjukkan semakin banyaknya asam-asam organik yang terkandung di dalamnya.

Dari analisa titik nyala terlihat bahwa *bio-oil* pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 6% dan rasio katalis 3% terhadap biomassa memiliki titik nyala paling tinggi dibandingkan yang lainnya, yakni 46°C. Semakin rendah titik nyala berarti semakin mudah *bio-oil* tersebut untuk terbakar. Pada umumnya, nilai titik nyala yang sering diperoleh pada *bio-oil* ialah 64°C. Namun, titik nyala yang terlalu rendah juga dapat mempersulit penanganannya [Mohan *et al*, 2006].

Dari Tabel 3 terlihat bahwa viskositas *bio-oil* dari pirolisis kayu akasia dengan menggunakan katalis Mo/NZA ternyata rendah dibandingkan dengan viskositas dari *bio-oil* konvensional. Hal ini berarti *bio-oil* dari kayu akasia lebih mudah dalam hal penyimpanan dan pendistribusiannya. Selain itu, juga terlihat bahwa viskositas *bio-oil* yang dihasilkan berada pada rentang viskositas *diesel oil*.

Tabel 3. Perbandingan karakteristik *bio-oil* kayu akasia dengan *bio-oil* konvensional dan *diesel oil*

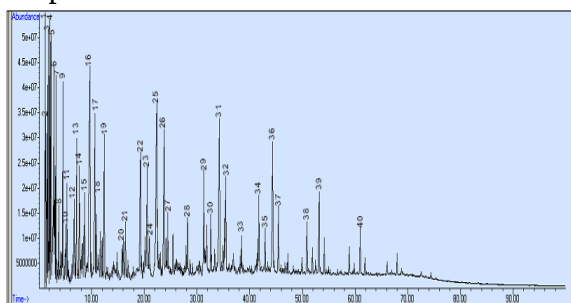
Parameter	Bio-oil dari Kayu Akasia	Conventional Bio-oil*	Diesel Oil**
Densitas (gr/ml)	0,827	1,1-1,4	0,81-0,89
Viskositas, pada 40°C (cSt)	2,416	15-35	1,3-24,0
Titik Nyala (°C)	43,1	40-110	38-55
Angka Asam (mg NaOH/gr sampel)	88,67	102,9	42,6-45,6***

Keterangan: *: Khor, 2009

**: IARC monographs volume 45, 1989

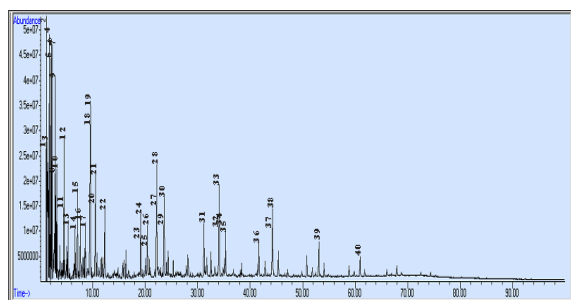
***: Boundy *et al*, 2011

Hasil analisa komponen-komponen kimia *bio-oil* yang dilakukan dengan menggunakan GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) dapat dilihat pada Gambar 5 sampai Gambar 8 berikut ini.



Gambar 5. Kromatogram *bio-oil* pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 0%

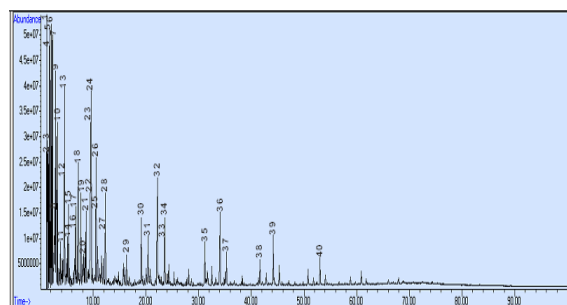
Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 0% dapat mendekomposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin yang terdapat pada kayu akasia menjadi 40 senyawa kimia dengan 5 senyawa kimia yang paling dominan adalah 1-Tricosanol dengan luas area 24,315%, 7-Heptadecene 13,707%, 7-Hexadecyn-1-ol 12,059%, 1-Propane 6,109% serta Behenic alcohol 4,192%.



Gambar 6. Kromatogram *bio-oil* pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 1%

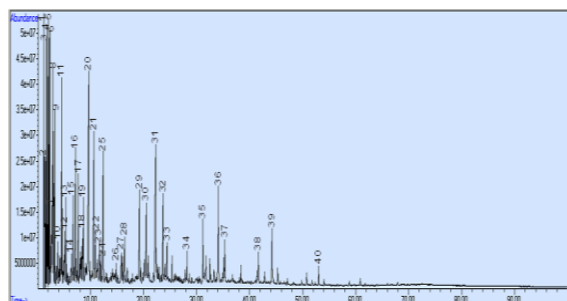
Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 1% dapat mendekomposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin yang terdapat pada kayu akasia menjadi 40 senyawa kimia dengan 5 senyawa kimia yang paling dominan adalah Cyclohexane dengan luas area 18,727%, 1-Tricosanol 13,035%, Pentane 10,005%, 2-

Pentene 5,934% serta 4,6-Dimethyl-5-nitromethylheptan 3,787%.



Gambar 7. Kromatogram *bio-oil* pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 3%

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 3% dapat mendekomposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin yang terdapat pada kayu akasia menjadi 40 senyawa kimia dengan 5 senyawa kimia yang paling dominan adalah Cyclohexane dengan luas area 18,477%, 2,4-Hexadiene 13,610%, 6-Tridecene 9,920%, Propane 8,684% serta 4-Nonene 6,619%.



Gambar 8. Kromatogram *bio-oil* pada penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 6%

Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa penggunaan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembunan logam 6% dapat mendekomposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin yang terdapat pada kayu akasia menjadi 40 senyawa kimia dengan 5 senyawa kimia yang paling dominan adalah 4-Nonene dengan luas area 25,950%, Pentane 14,762%, 6-Tridecene 12,368%, 2-Undecanethiol 7,299% serta 2-Pentene 4,880%.

Dari Gambar 5, 6, 7 dan 8 dapat dilihat bahwa adanya golongan hidrokarbon jenis parafin (alkana), olefin (alkena) dan naftena yang terdapat pada *bio-oil* dari kayu akasia. Dimana, golongan tersebut merupakan golongan utama penyusun minyak bumi [Putra, 2010].

4. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang di dapat dari penelitian ini adalah:

Kayu akasia dapat disintesis menjadi *bio-oil* melalui proses pirolisis. Penggunaan katalis Mo/NZA pada proses pirolisis memberikan pengaruh terhadap *yield* yang dihasilkan. Semakin tinggi rasio katalis Mo/NZA terhadap biomassa, maka semakin besar *yield bio-oil* yang dihasilkan. Akan tetapi, pengembangan logam ke dalam zeolit alam belum tentu dapat meningkatkan *yield bio-oil* yang dihasilkan. *Yield bio-oil* tertinggi diperoleh pada penggunaan katalis dengan menggunakan katalis Mo/NZA dengan persentase pengembangan logam 3% dan rasio katalis 9% terhadap biomassa, yakni 76,084%.

Daftar Pustaka

- Boundy, B., S.W. Diegel, L. Wright, dan S.C. Davis. 2011. Biomass energy Data Book (Edition 4). USA: U.S. Department of Energy.
- BPH Migas. 2012. Pembatasan konsumsi BBM bersubsidi, Media Informasi dan Komunikasi Industri Hilir Migas, Jakarta.
- IARC Monograph (Volume 45). 1989. Occupational Exposures in Petroleum Refining; Crude Oil and Major Petroleum Fuels. France: IARC intern. tech. Rep.
- Khor, K.H., K.H. Lim dan Z.A. Zainal, 2009, Characteristic of Bio-Oil : A By-Product from Slow Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches, University Sains Malaysia.
- Mohan, D., Pittman, C. U., dan Steel, P. H. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Journal Energy & Fuels*, 20, 848-889.
- Ningrum, A. E. 2011. Proses pembuatan bio-oil dari limbah kelapa sawit (tandan, cangkang dan serat) untuk bahan bakar alternatif dengan metode fast pyrolysis. Skripsi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Purwanto, Widodo, A. O. Ningrum, dan R. Muthia. 2011. *Pengembangan Produksi Bio-oil dari limbah sawit dengan metode fast pyrolysis. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Teknologi Oleo dan Petrokimia*. Riau.
- Putra, Z.A. 2010. Kilang Minyak Bumi. Malaysia : Universiti teknologi Petronas.
- Setyawan, D., dan P. Handoko, 2002, Pengaruh Perlakuan Asam, Hidrotermal dan Impregnasi Logam Kromium pada Zeolit Alam dalam Preparasi Katalis, *Jurnal Ilmu Dasar*, 3(2), 103-109.
- Trisunaryanti, W., Triwahyuni, E., dan Sudiono, S. (2005). Preparasi, modifikasi dan karakterisasi katalis Ni-Mo/Zeorit alam dan Mo-Ni/Zeorit alam. *Jurnal TEKNOIN*, Volume 10, No. 4.