



Pengembangan Katalis dan Teknologi Produksi BioBTX dari Tandan Kosong Sawit

Husain Akbar Sumeru^{1*}, Subagjo², Jenny Rizkiana², Haryo Pandu Winoto²,
Carolus Borromeus Rasrendra², Fajriana Shafira Nurrusyda¹

¹Departement Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran,
Jln. Raya Bandung Sumedang KM.21, Hegarmanah, Kec. Jatinangor, Kab. Sumedang, 453631

²Program Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung,

Jalan Ganesha 10 Bandung, 40132

*Alamat email penulis koresponden: husain.akbar@unpad.ac.id

Abstrak

Produksi BioBTX (Benzena, Toluena dan Xilena) dari Tandan Kosong Sawit menjadi suatu alternatif menarik dalam produksi bahan kimia berbasis biomassa. Pengaruh katalis dan sumber hidrogen dalam produksi BioBTX telah dipelajari dengan menggunakan reaktor hidrotermal. Dalam penelitian ini digunakan katalis bimetal Nikel-Molibdenum dengan penyangga H-Al- β sebagai asam Brønsted dan Sn- β sebagai asam Lewis dimana asam format dalam etanol (FA-EtOH) dan isopropil alkohol (IPA) digunakan sebagai agen transfer hidrogen. Percobaan dilakukan pada temperatur 300°C selama 1 jam untuk setiap percobaan sumber hidrogen dan katalis. Temperatur reaksi divariasikan pada 225°C, 255°C dan 300°C dengan variasi waktu reaksi 1 dan 2 jam. Berdasarkan hasil percobaan, sistem FA-EtOH memiliki keunggulan dibandingkan sistem IPA yaitu selektifitas eterifikasi pelarut yang lebih rendah baik pada katalis NiMo/H-Al- β dan NiMo/Sn- β . Dari segi katalis, katalis NiMo/H-Al- β memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan NiMo/Sn- β baik pada sistem FA-EtOH maupun sistem IPA. Konversi NiMo/H-Al- β tertinggi didapatkan pada sistem IPA sebesar 51,08% dan pada sistem FA-EtOH sebesar 48,66%. Namun pada sistem IPA reaksi cenderung ke arah alkilasi-C cincin aromatik sehingga secara sebaran produk sistem FA-EtOH lebih baik. Adapun pengujian pengaruh temperatur yang dilakukan menggunakan sistem FA-EtOH dengan katalis NiMo/H-Al- β menunjukkan penurunan konversi guaiacol dari 48,66% pada 300°C menjadi 24,64% pada 255°C. Adapun pada suhu 225°C, tidak terjadi reaksi pada guaiacol. Toluena terdeteksi pada kondisi operasi 255°C selama 2 jam pada sistem FA-EtOH berkatalis NiMo/H-Al- β .

Kata kunci: BioBTX, Tandan Kosong Sawit, Donor Hidrogen, Katalis, Sn- β

PENDAHULUAN

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan limbah dari produksi *Crude Palm Oil* (CPO) yang jumlahnya setara dengan CPO yang dihasilkan (Wargadalam et al. 2015). Secara komposisi, TKKS memiliki kandungan selulosa 59,7%, hemiselulosa 22,1% dan lignin 18,1% (Abdullah, Sulaiman & Gerhauser 2011) (Geert, Van Goethem & Schutte 2010). Pembuangan TKKS yang umum dilakukan adalah melalui pembakaran atau pembuangan di lokasi perkebunan agar dapat terurai secara alami. Meskipun demikian, praktik ini menghasilkan emisi gas rumah kaca sehingga saat ini mulai dikembangkan

teknologi untuk pemanfaatan TKKS salah satunya adalah dengan mengekstraksi lignin yang terkandung didalamnya (Karunakaran, Abd-Talib & Yong 2020).

Lignin merupakan senyawa polimer alami yang memiliki struktur cincin aromatik bercabang pada setiap monomernya (Chen 2014). Adapun cincin aromatik ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku alternatif untuk produksi Benzena, Toluena dan Xilena (BTX) yang merupakan *Building Block Chemicals* (Brenes et al. 2022). Proses pemanfaatan lignin sebagai bahan baku BTX secara garis besar memiliki 2 jalur utama, yaitu jalur 1 tahap dan jalur 2 tahap. Pendekatan 1 tahap dilakukan melalui perengkahan katalitik. Pendekatan 2 tahap dilakukan melalui tahap depolimerisasi kemudian tahap hidroleoksisenasi (HDO). Pendekatan 1 tahap memiliki kendala yaitu perolehan BTX yang rendah dan cenderung banyak menghasilkan gas dan kokas (Cheng & Brewer 2017). Pendekatan 2 tahap memiliki perolehan BTX yang lebih tinggi namun memiliki tahap yang lebih panjang.

Pada pendekatan 2 tahap, diperlukan depolimerisasi dan hidroleoksisenasi secara simultan dan menghindari hidrogenasi yang berlebihan pada cincin aromatik (Bengoechea et al. 2016). Adapun target proses depolimerisasi lignin ialah pemotongan ikatan C-O-C dan ikatan C-C antar monomer lignin (Wang et al. 2016). Senyawa fenolik hasil depolimerisasi lignin lalu di hidroleoksisenasi (HDO) untuk menghasilkan BTX (Olcese et al. 2013)Jurnal A). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh katalis, sumber hidrogen dan kondisi operasi terhadap proses depolimerisasi dan hidroleoksisenasi lignin serta perolehan BTX.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Kuantifikasi proses depolimerisasi dan HDO lignin dilakukan menggunakan senyawa model guaiacol (*technical grade*). Percobaan depolimerisasi dan HDO dilakukan dengan 2 sistem yaitu sistem Asam Format (Bratachem, *technical grade*)-Etanol (Merck, *analytical grade*) dan sistem Isopropil Alkohol (Merck, *analytical grade*). Sintesis katalis bimetal Nikel dan Molibdenum dilakukan dengan 2 penyangga berbeda yaitu H-Al- β dan Sn- β melalui proses impregnasi basah dengan pelarut NH_4OH 17% (Merck, *analytical grade*). Loading katalis pada penelitian ini ialah 5% NiO dan 10% MoO_3 .

H-Al- β disintesis dari Na-Al- β (Meiqi Industry) melalui proses ion exchange menggunakan NH_4NO_3 . Sn- β disintesis melalui tahap dealuminasi H-Al- β menggunakan HNO_3 65% (Merck, *analytical grade*) kemudian di impregnasi dengan $\text{SnCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (Merck, *analytical grade*). Proses ion exchange dan dealuminasi dilakukan pada temperatur 80°C masing-masing selama 2 dan 24 jam. Proses impregnasi Sn dilakukan pada reaktor hidrotermal pada temperatur 140°C selama 12 jam.

Karakterisasi Katalis

Karakterisasi katalis yang dilakukan ialah XRD, H_2 -TPR (Qualcom) dan NH_3 -TPD (Qualcom). Karakterisasi XRD dilakukan untuk memastikan Sn- β yang dihasilkan tidak merusak struktur Kristal zeolite beta. H_2 -TPR dilakukan menggunakan gas Hidrogen

(Sangkuriang Gas, Ultra High Purity) untuk mengetahui temperatur aktif dari katalis NiMo yang telah disintesis. NH₃-TPD dilakukan menggunakan gas ammonia (Sangkuriang Gas, Ultra High Purity) untuk mengetahui keasaman katalis yang telah disintesis.

Uji Aktifitas Katalis

Uji aktifitas katalis dilakukan menggunakan reaktor hidrotermal dengan magnetic stirrer sebagai pengaduk. Guaiacol (4 g) dicampurkan dengan pelarutnya (16 g) kemudian diaduk hingga homogen. Larutan umpan ini kemudian dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal setelah katalis (0.4 g) dimasukkan terlebih dahulu. Sebelum proses pemanasan dilakukan, reaktor di-purging dengan nitrogen dan di uji bocor pada 60 bar selama 30 menit. Setelah dipastikan tidak ada kebocoran, reaktor diturunkan tekanannya ke 20 bar. Proses pemanasan reaktor dilakukan dengan laju pemanasan 5°C/menit hingga 300°C. Setelah temperatur tercapai, temperatur dipertahankan selama 1 jam. Setelah 1 jam usai, reaktor langsung didinginkan secara mendadak menggunakan air mengalir. Variasi uji aktifitas katalis dilakukan pada temperatur 225°C, 255°C dan 300°C dan selama 1-2 jam.

Perhitungan konversi guaiacol dilakukan dengan menggunakan bantuan GC-MS untuk mengetahui konsentrasi guaiacol dengan internal standar n-nonadecana. Data area GC-MS dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui response factor dari guaiacol menggunakan persamaan (1)

$$RF = \frac{A_x C_{is}}{A_{is} C_x} \quad (1)$$

Di mana, RF merupakan response factor, A merupakan area, C merupakan konsentrasi atau fraksi, tika bawah x merupakan jenis sampel dan tika bawah is merupakan senyawa internal standar. Setelah diketahui RF dari guaiacol, konversi guaiacol dihitung menggunakan persamaan (2)

$$X_G = \frac{m_{G,in} - m_{G,out}}{m_{G,in}} \times 100\% \quad (2)$$

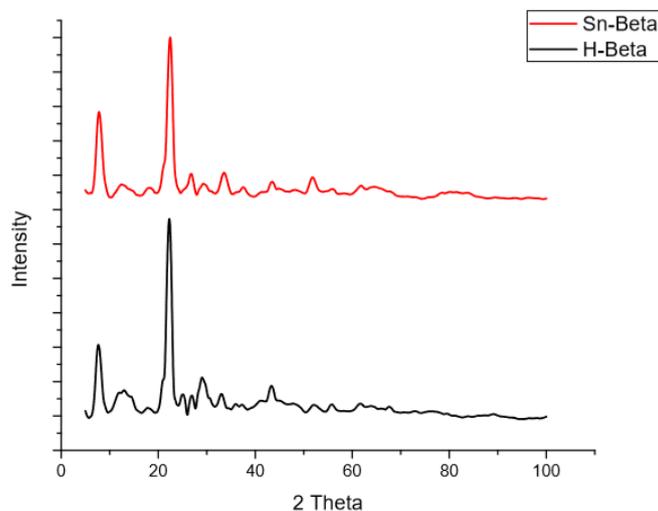
Di mana massa guaiacol masuk dan keluar pada penelitian ini dihitung menggunakan persamaan (3)

$$m_G = \frac{A_x C_{is}}{A_{is} RF} \times \frac{1}{0.15} \times m_{cairan} \quad (3)$$

Di mana m-cairan merupakan massa total umpan atau produk yang dianalisis. Adapun senyawa lain yang terdeteksi pada GC-MS dihitung massa relatifnya untuk mengetahui kecenderungan senyawa yang terbentuk dibandingkan pada pengujian menggunakan katalis ataupun sistem yang berbeda. Massa relatif masing-masing senyawa dihitung dengan menggunakan persamaan (3) namun diasumsikan RF-nya bernilai 1. Penggunaan asumsi ini memiliki konsekuensi yaitu perbandingan antar senyawa menjadi tidak valid karena setiap senyawa memiliki RF yang berbeda.

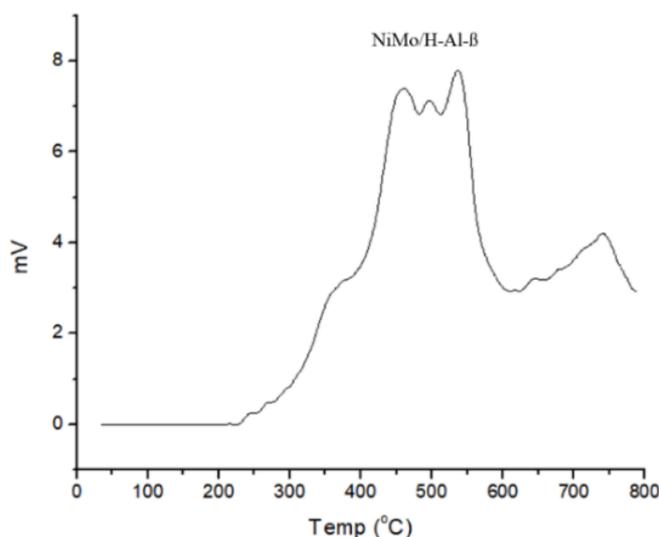
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan katalis dan produksi BTX yang berasal dari Tandan Kosong Sawit. Hasil karakterisasi XRD Sn- β yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan struktur Kristal zeolite masih bertahan. Hal ini ditunjukkan dengan konsistensi posisi puncak karakter zeolite- β (Gambar 1) yaitu pada 2θ 7,74 dan 22,11 (Treacy & Higgins 2001).



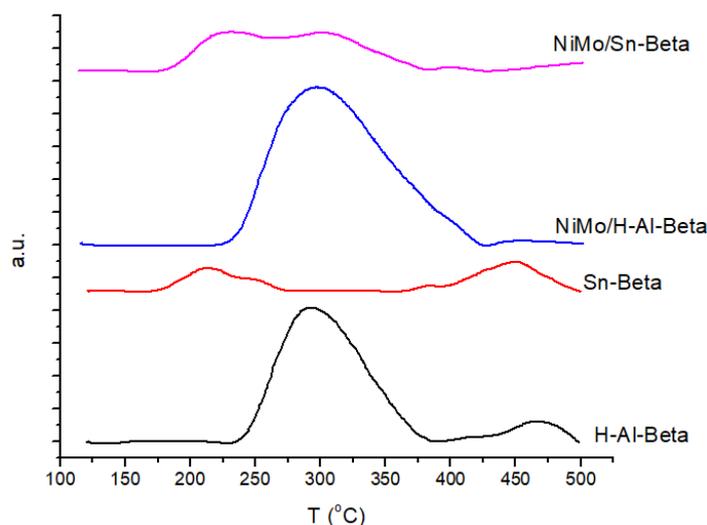
Gambar 1. Perbandingan pola difraksi pada H-Al- β dan Sn- β

Sementara itu, hasil analisis H₂-TPR (Gambar 2) terlihat bahwa katalis NiMo/H-Al- β mulai aktif pada temperatur 230°C.



Gambar 2. Profil karakterisasi H₂-TPR NiMo/H-Al- β

Berdasarkan hasil karakterisasi NH₃-TPD (Gambar 3) terlihat penyangga Sn- β memiliki jumlah keasaman yang rendah namun memiliki situs asam kuat yang lebih tinggi dibandingkan H-Al- β . Adapun penambahan sisi aktif nikel molibdenum menyebabkan penurunan jumlah asam kuat dan meningkatkan jumlah asam lemah.



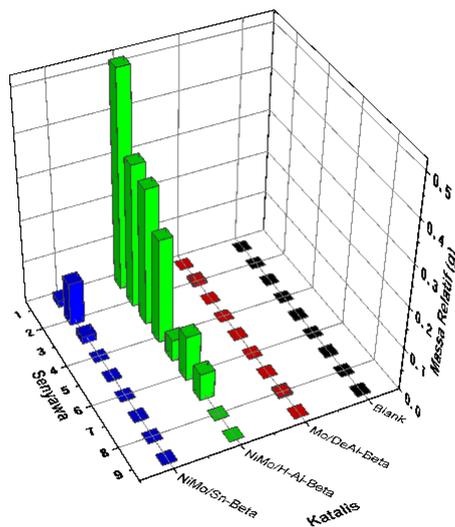
Gambar 3. Kurva karakteristik NH₃-TPD

Tabel 1. Konversi Guaiacol

	FA-EtOH	IPA
Blank	16,32	10,33
Mo/DeAl-β	17,27	-
Mo/Sn-β	-	24,56
NiMo/H-Al-β	48,66	51,08
NiMo/Sn-β	17,30	40,70

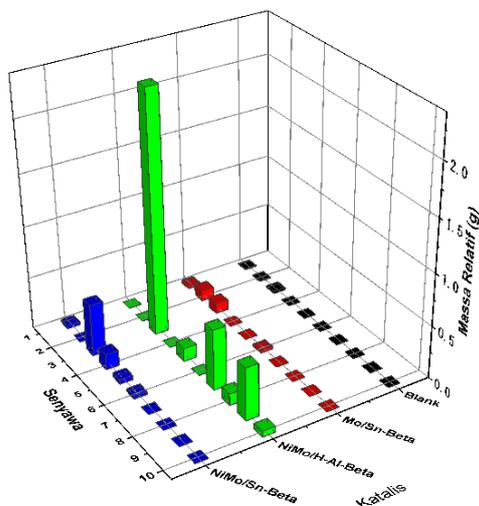
Sebaran produk pada masing-masing pelarut memiliki senyawa yang berbeda namun memiliki kecenderungan reaksi yang sama. Sebaran produk pada sistem asam format-etanol (Gambar 4) didominasi oleh reaksi alkilasi pada gugus-O, demetoksilasi lalu alkilasi pada cincin aromatik. Adapun pada sistem isopropil alkohol (Gambar 5) didominasi oleh alkilasi pada cincin aromatik, alkilasi pada gugus-O lalu demetoksilasi. Pengaruh penyangga dalam proses depolimerisasi sangatlah dominan. Hal ini sejalan dengan beberapa penelitian lainnya (Zakzeski et al. 2010). Hal ini terlihat pada kedua sistem dimana konversi guaiacol menurun pada penyangga Sn-β. Adapun penyangga H-Al-β menunjukkan aktifitas katalis yang baik dan membantu sisi aktif katalis. Berdasarkan hasil ini menunjukkan bahwa katalis NiMo dan H-Al-β memiliki efek sinergi dalam proses depolimerisasi.

Massa relatif pada sistem asam format-etanol (Tabel 2) dan sistem isopropil alkohol (Tabel 3) menunjukkan perbedaan yang signifikan. Pada sistem asam format-etanol penyangga H-Al-β bersinergi dengan katalis NiMo pada reaksi demetoksilasi-hidroksilasi membentuk katekol sedangkan pada sistem isopropil alkohol, penyangga H-Al-β bersinergi dengan katalis NiMo pada reaksi alkilasi cincin aromatik. Hal ini terlihat pada sistem isopropil alkohol dengan katalis berpenyangga H-Al-β tidak membentuk produk katekol maupun turunannya.



1	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> Guethol	6	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 4-Ethyl catechol
2	<chem>Oc1ccc(O)cc1</chem> Catechol	7	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 4-Ethyl-6-Methyl guaiacol
3	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 4-ethyl guaiacol	8	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 3-Methyl guaiacol
4	<chem>CCOC1=CC=C(OC)C=C1</chem> 1-Ethoxy-4-Methoxy Benzene	9	<chem>Cc1ccccc1</chem> Toluene
5	<chem>CCOC1=CC=C(OC)C=C1</chem> 1,2-Diethoxy Benzene	10	

Gambar 4. Sebaran produk pada sistem asam format-etanol



1	<chem>Oc1ccc(O)cc1</chem> Catechol	6	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 2-Propoxy Phenol
2	<chem>CC(=O)Oc1ccc(O)cc1</chem> 4-Methoxy, Acetate Benzene	7	<chem>CC(=O)c1c(C)c(C)c(OC)c1</chem> 4,6-Dimethoxy-2,3-Dimethyl Acetophenone
3	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 4-Ethyl-6-Methyl guaiacol	8	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 4-tert-Butylcatechol, dimethyl ether
4	<chem>CCOC1=CC=C(OC)C=C1</chem> 4-Methoxy Phenyl Propyl Ether	9	<chem>Cc1c(C)c(C)c(OC)c1</chem> 1,4-Dimethoxy-2,3,5,6-Tetramethyl Benzene
5	<chem>CCOC1=CC=C(OC)C=C1</chem> 4-Ethyl 1,2-Dimethoxy Benzene	10	<chem>CCOC1=CC=C(O)C=C1</chem> 4-ethyl guaiacol

Gambar 5. Sebaran produk pada sistem isopropil alkohol

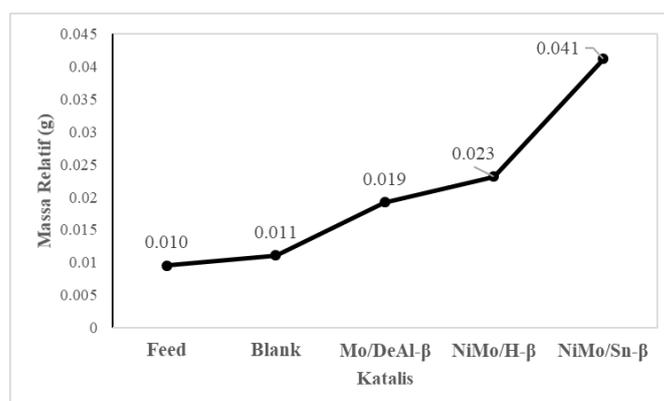
Pada penyangga Sn-β terlihat sistem isopropil alkohol lebih aktif dibandingkan sistem asam format-etanol. Hal ini dikarenakan pada penyangga Sn-β katalis juga sibuk berinteraksi dengan pelarutnya. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya jumlah produk hasil reaksi eterifikasi pada pelarut. Senyawa produk reaksi eterifikasi pelarut pada sistem asam format-etanol ialah 1,1-Dietoksi etana (Gambar 6) dan pada sistem isopropil alkohol ialah diisopropil eter dan isomernya (Gambar 7). Dari perbandingan ini terlihat bahwa sistem asam format-etanol lebih baik dibandingkan sistem isopropil alkohol dengan menggunakan katalis NiMo/H-Al-β.

Tabel 2. Massa relatif produk pada sistem asam format-etanol

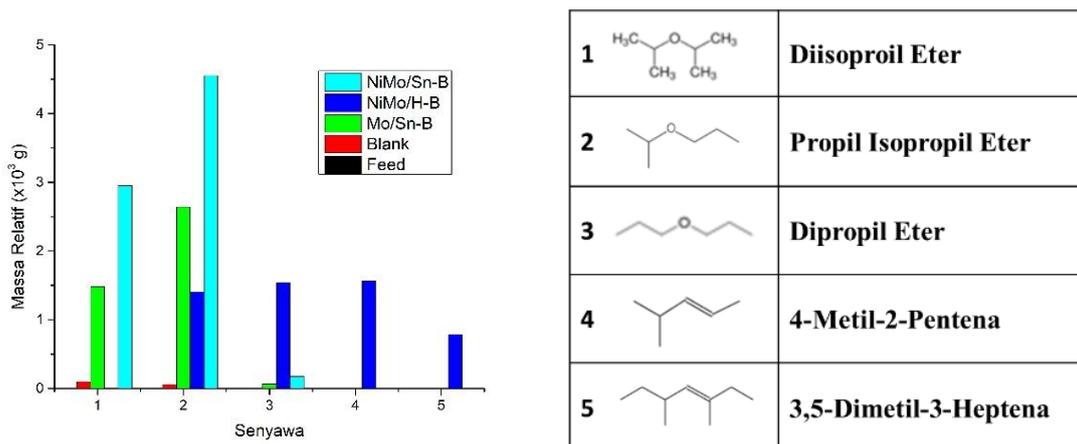
Senyawa	Umpan	Blank	Mo/Deal-β	NiMo/H-Al-β	NiMo/Sn-β
Guaiacol	3.2806	2.8722	2.6477	1.6477	2.6553
1 Guethol				0.5166	0.0159
2 Katekol			0.0071	0.3396	0.1023
3 4-Etil-Guaiacol				0.3237	0.0162
4 1-Etoksi-4-Metoksi Benzena				0.2475	
5 1,2-Dietoksi Benzena				0.0507	
6 4-Etil Katekol				0.1066	
7 4-Etil-6-Metil Guaiacol				0.0637	
8 3-Metil Guaiacol			0.0035		
9 Toluena					

Tabel 3. Massa relatif produk pada sistem isopropil alkohol

Senyawa	Umpan	Blank	Mo/Sn-β	NiMo/H-Al-β	NiMo/Sn-β
Guaiacol	3.2014	2.8876	2.4072	1.5630	1.8972
1 Katekol		0.0089	0.02730		0.0301
2 4-Metoksi-Benzen asetat		0.0074	0.1036		
3 4-Etil-6-Metil Guaiacol		0.0210	0.0996	2.3219	0.4986
4 4-Metoksi Fenil Propil Eter					0.1482
5 4-Etil-1,2-Dimetoksi Benzena				0.1278	0.0437
6 2-Propoksi Fenol			0.0246		0.0311
7 4,6-Dimetoksi-2,3-Dimetil Asetofenon				0.5846	
8 4-tert-Butilkatekol, dimetil eter				0.1112	
9 4-Etil-Guaiacol				0.5092	
10 1,4-Dimetoksi-2,3,5,6-Tetrametil Benzena				0.0569	



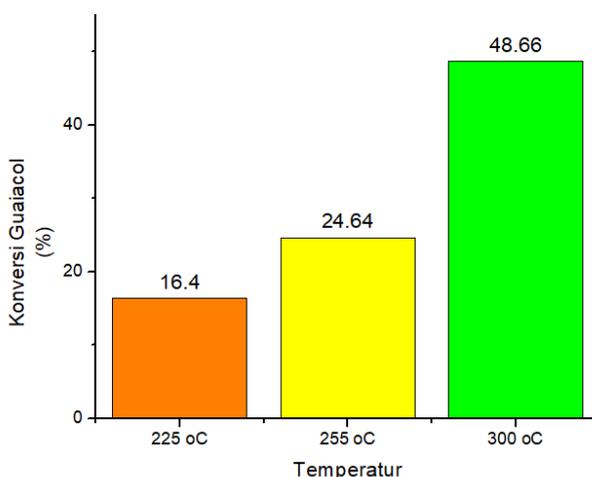
Gambar 6. Massa relatif 1,1-Dietoksi etana (sistem asam format-etanol)



Gambar 7. Massa relatif produk eterifikasi dan HDO pelarut (sistem isopropil alkohol)

Pada sistem isopropil alkohol terdeteksi produk hidrokarbon isoalkena yang merupakan hasil reaksi hidroleksigenasi dari produk eterifikasi pelarut. Hal ini mengindikasikan bahwa katalis dapat melakukan hidroleksigenasi (HDO) namun proses HDO pada guaiacol terhambat oleh pelarutnya.

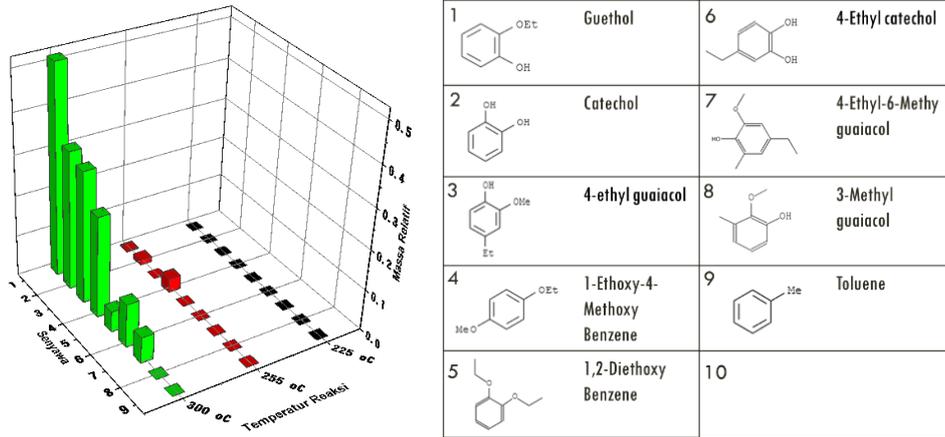
Pengaruh temperatur pada sistem asam format-etanol dengan katalis NiMo/H-Al- β terlihat pada konversi guaiacol (Gambar 8) dan sebaran produknya (Gambar 9). Pada temperatur 225°C tidak terlihat produk dari guaiacol namun jumlah guaiacol berkurang. Hal ini dimungkinkan karena masalah evakuasi produk. Produk pada temperatur 225°C tidak terdeteksi dikarenakan pada temperatur tersebut katalis masih belum aktif sesuai dengan hasil dari H₂-TPR (Gambar 2).



Gambar 8. Pengaruh temperatur terhadap konversi guaiacol

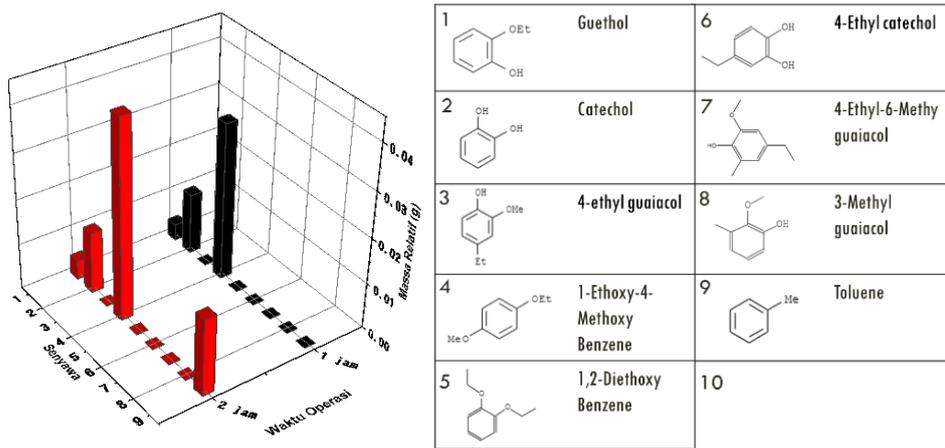
Pada temperatur 255°C reaksi depolimerisasi tetap dapat berlangsung namun jumlahnya menurun. Hal ini terlihat masih adanya produk katekol. Pada temperatur ini pula reaksi alkilasi cincin aromatik terhambat. Hal ini terbukti dengan tidak adanya produk hasil alkilasi cincin aromatik pada temperatur 255°C. Hal ini mengindikasikan

interaksi dengan cincin aromatik terhalangi namun interaksi dengan gugus yang mengandung atom O tetap ada walau menurun.



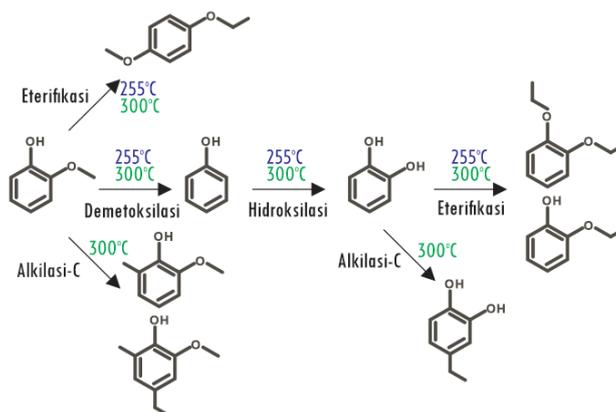
Gambar 9. Pengaruh temperatur terhadap sebaran produk

Pengaruh waktu reaksi pada sistem asam format-etanol pada temperatur 255°C dengan katalis NiMo/H-Al-β terlihat pada terdeteksinya produk toluena (Gambar 10). Hal ini menjadi mengindikasikan bahwa waktu untuk menghasilkan produk BTX perlu dilakukan dengan waktu yang lebih panjang. Selain itu hal ini membuktikan bahwa sistem ini bisa memproduksi BTX.



Gambar 10. Pengaruh waktu terhadap sebaran produk

Mekanisme reaksi yang diajukan berdasarkan hasil penelitian ini disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Mekanisme reaksi yang diajukan berdasarkan penelitian ini

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal yaitu,

1. Pengaruh katalis dan sumber hidrogen pada proses depolimerisasi lignin dan HDO sudah dipelajari. Katalis yang telah disintesis terbukti dapat melakukan depolimerisasi lignin. Hal ini terlihat dengan adanya pemotongan ikatan eter C-O-C pada guaiacol membentuk katekol. Adapun pengaruh sumber hidrogen, asam format memiliki performa yang lebih baik dibandingkan isopropil alkohol. Hal ini terlihat dari konversi guaiacol yang tinggi dan selektifitas eterifikasi pelarut yang lebih rendah pada seluruh sistem katalis
2. Pengaruh sisi aktif logam dan penyangga telah dipelajari. Sisi aktif nikel terbukti meningkatkan aktifitas molibdenum. Dari sisi penyangga, penyangga berbasis asam Brønsted (H-Al-β) memiliki performa yang lebih baik dibandingkan penyangga berbasis asam Lewis (Sn-β) dalam mengkonversi guaiacol pada semua sistem. Hal ini mungkin terjadi karena adanya interaksi Sn dengan sisi aktif katalis (NiMo) yang mengurangi aktifitas sisi aktif. Pengaruh SMSI ini perlu diteliti lebih lanjut. Adapun produk BTX berhasil didapatkan pada proses berkatalis
3. Kondisi operasi memiliki pengaruh dalam menghasilkan produk BTX. BTX dapat diperoleh pada temperatur 255°C selama 2 jam dengan menggunakan katalis NiMo/H-Al-β dan sumber hidrogen asam format. Pada temperatur 255°C laju reaksi alkilasi-C pada cincin aromatik terhambat dan pada waktu reaksi 2 jam terbentuk produk toluena.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Grant Riset Sawit dari Badan Pengelolaan Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS)–Kementerian Keuangan Indonesia tahun 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, N, Sulaiman, F & Gerhauser, H 2011, 'Characterisation of Oil Palm Empty Fruit Bunch for Fuel Application', *Journal of Physical Science*, vol 22(1), pp. 1-24.
- Bengoechea, MO, Gandarias, I, Arias, PL & Barth, T 2016, 'Unraveling the role of formic acid and the type of solvent in the catalytic conversion of lignin: a holistic approach', *ChemSusChem*, vol 10, no. 4, pp. 754-766.
- Brenes, RGR, Alhadeff, EM, Bojorge, N, Trales, LEM & Pazos, GAD 2022, 'BTX production by breaking down lignin: Current status and future prospects', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, pp. 664-681.
- Chen, H 2014, *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice*, Springer, Beijing.
- Cheng, F & Brewer, CE 2017, 'Producing jet fuel from biomass lignin: Potential pathways to alkylbenzenes and cycloalkanes', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 72, pp. 673-722.
- Geert, P, Van Goethem, D & Schutte, F 2010, 'Promising Biofuel Resources: Lignocellulose and Algae', *Nature Education* 3(9), p. 14.
- Karunakaran, V, Abd-Talib, N & Yong, T-LK 2020, 'Lignin from oil palm empty fruit bunches (EFB) under subcritical phenol conditions as a precursor for carbon fiber production', *Materials Today: Proceedings*.
- Olcese, RN, Francois, J, Bettahar, MM, Petitjean, D & Dufour, A 2013, 'Hydrodeoxygenation of Guaiacol, A Surrogate of Lignin Pyrolysis Vapors, Over Iron Based Catalysts: Kinetics and Modeling of the Lignin to Aromatics Integrated Process', *Energy Fuels*, pp. 975-984.
- Treacy, MMJ & Higgins, JB 2001, *Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites*, Elsevier, New York.
- Wang, M, Lu, J, Zhang, X, Li, L, Li, H, Luo, N & Wang, F 2016, 'Two-Step, Catalytic C–C Bond Oxidative Cleavage Process Converts Lignin Models and Extracts to Aromatic Acids', *ACS Catalysis*, pp. 6086-6090.
- Wargadalam, VJ, Sasti, H, Trylucky, DN, Hambali, E, Arfie, T, Nisya, NF, Biladi, DBC, Haryanto, D, Suyono, EA & dkk 2015, *Peta Jalan Litbang Bahan Bakar Nabati: Menuju Mandiri Energi*, IPB Press, Jakarta.
- Zakzeski, J, Bruijninx, PCA, Jongerius, AL & Weckhuysen, BM 2010, 'The Catalytic Valorization of Lignin for the Production of Renewable Chemicals', *Chemical Reviews*, vol 110, no. 6, pp. 3552-3599.