

REAKTOR *MICROWAVE* EFEKTIF DALAM PENGHAPUSAN TAR MODEL BIOMASSA DENGAN PENGGUNAAN KATALIS DAN PENAMBAHAN AIR

Aris Warsita^{1,2}

ABSTRAK

Penghapusan tar efektif dengan perlakuan katalis dan penambahan air pada reaktor *microwave*, sehingga didapatkan energi intensif dan efektif dipromosikan untuk menghapuskan tar dari gasifikasi biomassa. Toluena dan naftalena digunakan dalam percobaan ini sebagai senyawa tar model biomassa gasifikasi dengan perlakuan katalis pada suhu pemanasan dari 700°C-900°C untuk dolomit dan nikel, sedangkan 500° -700°C pada Y-zeolit, ruthenium dan rhodium dengan waktu tinggal (0-0,24) detik. Karakteristik penambahan air merupakan teknik baru dan akan dijelaskan dalam makalah ini. Pada pembelajaran ini menjelaskan bahwa toluena jauh lebih mudah untuk dihapus dari pada naftalena, sedangkan rhodium mempunyai unjuk kerja paling tinggi dibandingkan dolomite, Y-zeolite, nikel, dan ruthenium. Jelaga tidak ditemukan penghapusan tar model ini dan benar-benar bersih selama penghapusan katalis. Pengaruh dari pemanasan ini tidak hanya penghapusan tar, tetapi terjadinya reaksi radikal yang dihasilkan oleh *microwave* sehingga didapatkan konversi tar menjadi gas-gas berguna. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan berbagai katalis dengan tar model toluena dan naftalena bersifat asam dengan luas permukaan yang besar, sehingga mempunyai berpotensi bisa digunakan pada suhu reaksi lebih rendah dari 500°C.

Kata Kunci: Penghapusan, Tar, Katalis, *Microwave*, Air

PENDAHULUAN

Sekarang ini permintaan energi dunia meningkat dan ada isu bahwa efek pembakaran bahan bakar fosil yang berdampak pada terjadinya pemanasan global serta diprediksi bahwa bahan bakar minyak akan segera habis. Oleh karena itu pemanfaatan energi terbarukan sudah merupakan kebutuhan mendesak. Sebagai salah satu sumber

¹ School of Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia

² Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari Caturtunggal, Depok, Sleman, 55281 Yogyakarta, Indonesia

energi terbarukan adalah kotoran hewan yang mengandung energi dan juga energi biomassa berasal dari tanaman. Gasifikasi merupakan metode konversi kimia untuk mengubah kandungan energi biomassa menjadi bahan bakar lebih praktis dan bersih untuk produksi gas sintesis (syngas), serta banyak lagi potensi bahan bakar ini **(Hu and Lu 2009; Grieco, Gervasio et al. 2013)**. Bahan bakar cair dengan Fischer-Tropsch, produksi kimia, dan pembangkit listrik (turbin, mesin gas atau sel bahan bakar) serta gas gas di turbin, mesin gas, dan sel bahan bakar karena sangat sulit dihapus dan mudah kental pada permukaan saluran pada suhu rendah **(Świerczyński, Libs et al. 2007; Mastellone and Zaccariello 2013)**. Oleh karena itu dalam pemanfaatan selanjutnya tar harus dihapuskan dengan mengkonversikan tar menjadi gas-gas berguna disesuaikan dengan mesin penggunaannya.

Penghapusan katalis adalah salah satu teknik dengan metode perubahan tar ke menjadi gas H_2 , CH_4 , CO_2 dan CO dalam kandungan gas. Penghapusan tar dengan katalis dilakukan pada suhu di kisaran $(500-900)^\circ C$ bisa dengan berbagai katalis seperti katalis femali, CO , katalis berbasis Ni , dolomit, olivin dan Y -zeolit yang telah banyak dipelajari. Y -zeolit menunjukkan aktivitas katalis yang baik untuk penghacur tar dan menghasilkan sejumlah kecil pembentukan kokas pada katalis **(Chang, Chang et al. ; Dou, Gao et al. 2003)**. **(Dou, Gao et al. 2003)** Mendapatkan hasil bahwa Y -zeolit mampu menghapuskan hampir 100% dengan menggunakan 1-methylnaphthalene sebagai tar model. Katalis Y -zeolit baik digunakan untuk oksidasi parsial dan dalam hidrokarbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ikatan logam transisi meningkat dengan peningkatan aktivitas Y -zeolit untuk konversi hidrokarbon dan peningkatan tingkat keasaman Y -zeolit (oleh ikatan hidrolisis), serta penyerapan unsur oksigen **(Ribeiro, Santos et al. 2010)**. Penambahan tembaga di Y -zeolit ($CuNaHY$ Y -zeolit) digunakan sebagai oksidasi toluena dan berguna pada penghapusan kokas yang terbentuk dalam proses reaksi **(Ribeiro, Santos et al. 2010)**. Teknologi penghapusan tar dapat dibagi menjadi dua kelompok : penghapusan di dalam gasifier (metode utama) dan penghapusan setelah gasifier (metode sekunder). Pemanasan, katalis, mekanik pemisahan menggunakan siklon, filter, dan scrubber adalah metode sekunder penghapusan tar. Penghapusan dalam gasifier mendapatkan perhatian lebih karena dapat menghilangkan aktifitas metode sekunder dan metode ini telah terbukti efektif. Pendekatan yang berbeda telah dilakukan: (a) pilihan parameter operasi, (b)

penggunaan bed dengan penambahan bahan katalis, dan (c) modifikasi gasifier ini termasuk dalam metode perawatan utama (**Bridgwater, 1994**).

Sutton, Kelleher et al. (2001) mendapatkan hasil dari percobaan yang mereka lakukan bahwa aktivitas katalis dengan komposisi utama Ni pada proses gasifikasi konversi tar, ini terjadi pada suhu 550°C didalam reactor dengan menggunakan kuarsa. Pengoperasian sebuah reaktor dengan aliran penghubung bed tetap pada kedua ujung depan menggunakan katalis Ni dengan mempertahankan suhu 800°C. Katalis dapat juga dibuat dengan tanpa kandungan Ni diantaranya: Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, SiO₂, dan MOR1 sebagai bahan katalis pengahapus tar. Katalis dengan perlakuan kalsinasi kandungan 5wt% Ni dan ditambahkan dengan dua katalis untuk mempercepat reaksi Ni dan Al dengan perbandingan mol 3:17 dan 1: 3 Ni: Al. Laju aliran gas diukur untuk memastikan semua katalis aktif dan tidak terjadi pengendapan. **Sutton, Kelleher et al. (2002)** melakukan percobaan dengan membandingkan aktivitas katalis pengendapan dengan perbandingan 03:17 Ni/Al dengan 1% berat Ru/Al₂O₃ dan 1% berat Pt/ZrO₂ untuk kering (CO₂) reformasi CH₄ dan C₃H₈ pada suhu 450°C - 800°C. **Asadullah, Miyazawa et al. (2003)** mengembangkan katalis dengan komponen utama Rh untuk mendapatkan penghapusan tar pada gasifikasi dengan suhu rendah pada selulosa dan biomassa. Laporan pertama **Asadullah, Miyazawa et al. (2004)**, katalis dengan Rh, Ru, Pt, Pd, dan Ni telah digunakan dalam reaktor fluidized bed untuk mengubah menjadi gas selulosa pada 550°C. Kandungan logam pada katalis adalah 1.2×10^{-4} mol/g lapis. Konversi karbon untuk gas berkisar antara 80% -100%, dengan Rh katalis/CeO₂ dapat dilakukan dengan baik. **Asadullah, Miyazawa et al. (2004)** pada penelitian selanjutnya, pengaruh katalis Rh dengan berbagai campuran antara lain: CeO₂, ZrO₂, Al₂O₃, MgO, dan SiO₂ ini digunakan pada gasifikasi suhu rendah selulosa. Konversi karbon untuk gas berkisar antara 68%-100% dengan Rh/CeO₂ katalis ini menunjukkan unjuk kerja yang baik. Modofikasi katalis Rh selanjutnya dengan penambahan SiO₂ dalam kandungannya dan menghasilkan Rh katalis/CeO₂/SiO₂ dengan 35% berat SiO₂ (**Asadullah, Miyazawa et al., 2004**).

Metode sekunder dan primer pada proses perubahan uap katalis adalah teknik yang sangat menarik dalam penghapusan tar (**Milne TA, 1998**). Dolomit dengan perlakuan kalsinasi yang paling banyak digunakan sebagai katalis non logam untuk konversi tar (**Rapagná, Provendier et al. 2002; Taralas and Kontominas 2006; Perez-Martinez D 2006**) namun mempunyai ketahanan gesekan rendah dan mudah terbawa membuat

mereka tidak layak untuk digunakan dalam reaktor fluidized bed. Solusi efektif untuk tar reforming diusulkan (Corella, 1999) bahwa penempatan bed tetap dengan dolomit perlakuan kalsinasi untuk mengurangi kandungan tar, diikuti kondisi bed tetap Ni katalis reformasi reaktor beroperasi pada suhu 800°C. Olivine mineral lain alami yang telah menunjukkan aktivitas dalam konversi tar dengan perlakuan kalsinasi seperti dolomit (Rapagná, Provendier et al. 2002; Devi, Ptasinski et al. 2005). Keuntungan olivine mineral dibandingkan dengan dolomit adalah mempunyai ketahanan gesekan tinggi sehingga memungkinkan penggunaan langsung sebagai katalis utama dalam fluidized bed gasifiers. Dari pembahasan di atas jelaslah bahwa pengembangan katalis yang efektif dan stabil untuk penghapusan tar adalah sangat penting untuk teknik pengembangan NH₃ dalam pembersihan dalam kondisi panas. Hal ini terjadi pada reaksi reformasi penghapusan uap kering tar dan terbentuknya amonik pada reaksi endotermik dan membutuhkan energi aktivasi tinggi bila tidak digunakan katalis yang sesuai. Dengan ulasan ini akan berfokus pada perkembangan terakhir dan aplikasi katalis untuk menghilangkan tar pada kondisi gas panas dan amonia dari gasifikasi biomassa.

Perlakuan kalsinasi dolomit dihasilkan aktivitas konversi tar yang lebih baik dalam proses gasifikasi biomassa (Aznar, 1997). Kegiatan ini tergantung pada di mana dolomit alam didapatkan (Yu, Brage et al. 2009; Gusta 2009). Penggunaan Y-zeolit untuk konversi biomassa tar juga telah dilaporkan tetapi terbatas. Dalam banyak literatur biomassa senyawa tar model dipublikasikan dengan gas produser seperti benzena, toluena, naftalena, dan 1-Methylnaphthalene (Radwan, Kyotani et al. 2000; Buchireddy, Bricka et al. 2010; Anis, Zainal et al. 2013). Y-zeolit alami dikalsinasi untuk menghilangkan tar dari gasifikasi biomassa telah diaplikasikan dalam percobaan (Chiang, Chen et al. 2012; Mun, Kim et al. 2013). Pada Tabel 1. Karakteristik senyawa tar model yang umum disajikan.

Microwave iradiasi adalah metode pemanasan alternatif telah berhasil diterapkan untuk biomassa pirolisis (Bu, Lei et al. 2012; Wang, Hisada et al. 2012). Dibandingkan dengan proses pemanasan konvensional di mana panas dipindahkan dari permukaan ke inti dari materi melalui konduksi didorong oleh gradien suhu, *oven microwave* menginduksi panas pada tingkat molekuler dengan konversi langsung dari energy elektromagnetik menjadi panas (Farag, Kouisni et al. 2014) dan akan memberikan hasil pemanasan dalam seragam untuk bahan partikel. Kelebihan lainnya respon sesaat *microwave* cepat start-up

dan shutdown. Selain itu dalam proses operasinya mudah dan bila disesuaikan tersedia teknologi industri skala besar. Pemanasan *microwave* adalah teknologi siap digunakan dan dikembangkan biaya rendah (Anis, Zainal et al. 2013). Meskipun banyak keuntungan dari pemanasan *microwave* atas metode pemanasan tradisional dan beberapa kemajuan yang dibuat dalam biomassa pirolisis, belum ada penelitian yang telah melakukan dalam proses gasifikasi biomassa menggunakan teknologi *microwave*. Dengan tujuan untuk mendapatkan kondisi yang optimal dan kinerja teknis diusulkan *microwave* pemanasan tar proses pengolahan katalisator didapat suhu yang cepat di dalam reaktor, berbagai parameter termasuk bahan susceptor ukuran partikel, tinggi tempat bed, laju alir gas dan daya listrik diuji. Selanjutnya dalam penghapusan tar dengan katalis serta penambahan air, lima katalis akan dipergunakan (dolomite, Y-zeolit, nikel, ruthenium, dan rhodium), berbagai variasi suhu, persentase campuran air-tar, waktu tinggal, dan menggunakan senyawa tar model antaranya: toluena dan naftalena.

Tabel 1 : Karakteristik Senyawa Tar Model Yang Umum
(Milne TA 1998.; Taralas and Kontominas 2004)

Senyawa	Karakteristik
Denzene	Struktur aromatik stabil tar terbentuk dengan proses suhu tinggi
Toluena	Toluene Struktur aromatik yang stabil jelas dalam tar terbentuk dengan proses suhu tinggi. Dengan deaktivasi katalis toluena karena chaming bisa kurang memutuskan dan konversi hidrokarbon gas jauh lebih tinggi dibandingkan dengan real tar
Phencl	Senyawa tarutama dari proses pada suhu yang lebih rendah dari 800 °C
Naftalena	Senyawa tunggal utama di tar. Reaktivitas termal mengikuti urutan toluena > naftalena > benzene

METODE PENELITIAN

Bahan

Sebagai senyawa tar model yang merupakan unsur tar biomassa (Simell, Hepola et al. 1997) digunakan toluena dan naftalena (kelas komersial). Naftalena (C₁₀H₈) adalah poli-aromatik ringan hidrokarbon (LPAH) bersenyawa ring dua merupakan kelas 4 tar, sementara toluena (C₇H₈) adalah hidrokarbon aromatik ringan (LAH) dengan senyawa ring satu yang merupakan kelas 3 tar. Klasifikasikan tar masuk dalam kelas 3 dan 4 tar (Milne TA 1998) adalah tar biomassa yang dihasilkan oleh bed fluidized dan gasifiers downdraft. Nitrogen dimurnikan (99.999%) sebagai gas pembawa tar model menguap dan menjaga tetap tidak berubah digunakan selama proses penghapusan. Dalam penelitian ini

dilakukan lima bahan katalis: dolomite, Y-zeolit, nikel, ruthenium, dan rhodium digunakan untuk menghilangkan senyawa tar. Y-zeolit adalah katalis komersial sementara Dolomit adalah mineral alami, sedangkan Nikel, Rutenium dan Rhodium adalah katalis sintetis. Sebagai bahan susceptor empat ukuran partikel silikon karbida diuji dalam penelitian ini (SiC): F10, F12, F14 dan F16. Seperti pada Tabel 2. spesifikasi sifat fisik dari SiC sesuai dengan FEPA-Standard 42-GB-1984 R 1993 dan 42-GB-1986 R 1993 yang disebut SiC sebagai bahan susceptor *microwave* yang dapat menyerap dan mengubah energi gelombang mikro ke kalor secara konduksi dengan dielektrik tinggi dan waktu relaksasi sesuai dengan perubahan arah gelombang *microwave* (Thostenson 1999). SiC mempunyai sifat yang sangat bagus dan juga efek terhadap katalitis dalam dekomposisi tar (Simell, Hepola et al. 1997).

Tabel 2. Spesifikasi Silikon Karbida (SiC).

Grit designation (FEPA standard)	Bulk density (g/cm ³)	Grain size distribution		
		(μm)	(%)	Mean(μm)
F10	1.48	3350	0	2085
		2360	19	
		2000	52	
		1700	78	
		1400	81	
		<1400	0	
F12	1.53	2800	0	1765
		2000	8	
		1700	48	
		1400	87	
		1180	91	
		<1180	1	
F14	1.55	2360	0	1470
		1700	11	
		1400	64	
		1180	85	
		1000	89	
		<1000	0	
F16	1.56	2000	0	1230
		1400	17	
		1180	48	
		1000	78	
		850	83	
		<850	0	

Kalsinasi Katalis

Tar terbentuk selama pirolisis adalah salah satu isu utama, pirolisis katalitik atau gasifikasi sangat menjanjikan berpotensi dalam pengurangan tar (Lv, Chang et al. 2003).

Penggunaan katalis dalam gasifikasi biomassa telah menarik banyak perhatian. Dalam penelitian ini, lima jenis katalis dolomit, y-zeolit, nikel, ruthenium dan rhodium dikalsinasi dan digunakan untuk penghapusan senyawa tar model. Perlakuan kalsinasi pada dolomit telah lebih efektif, lebih murah, dan berlimpah dari pada zeolit yang sudah terbukti secara signifikan dapat mengurangi kadar tar dari gas produk dari gasifier. Namun kalsinasi dolomit secara signifikan aktif bila dilakukan pada suhu di atas 500°C.

Proses pembuatan dolomit alam itu digiling dan diayak partikel dengan ukuran 0.2-0.5 mm, selanjutnya dikalsinasi dalam oven meredam pada 950°C selama 3 jam. Perlakuan kalsinasi dolomit, zeolit, nikel, ruthenium dan rhodium digunakan sebagai katalis dalam penelitian ini ditampilkan dalam table 3. Dolomit, Y-zeolit, nikel, ruthenium dan rhodium digunakan untuk menyelidiki pengaruh katalis pada perlakuan penghapusan senyawa tar model. Katalis yang dikalsinasi di bawah aliran udara selama 1 jam pada 900°C untuk dolomit dan nikel sedangkan pada 550°C selama 2 jam untuk Y-zeolit, ruthenium dan rhodium. Dolomit memiliki ukuran partikel 600 µm dengan bulk density 1.33 g cm⁻³. Hal ini terutama terdiri dari 34.69 wt.% CaO, 15.06 wt.% MgO dan 2.34 wt.% SiO₂. Y-zeolit adalah katalis komersial bubuk (CBV720) dengan bulk density 0.26 g cm⁻³ dan SiO₂ / Al₂O₃ dari 30. Nikel adalah komersial 257.553 Aldrich adalah 99.98% campuran logam, ketebalan 0.5 mm, bp 2733°C, mp 1453°C dan kepadatan 8.9 g/ml pada 25°C. Ruthenium secara komersial 246047-72-3 dengan C₄₆H₆₅Cl₂N₂PRu, dan 848.97 g/mol. Rhodium adalah komersial 33409-86-3 dengan C₁₇H₁₈NORh, dan berat molekul 355.24 kgm⁻³.

Peralatan Penelitian

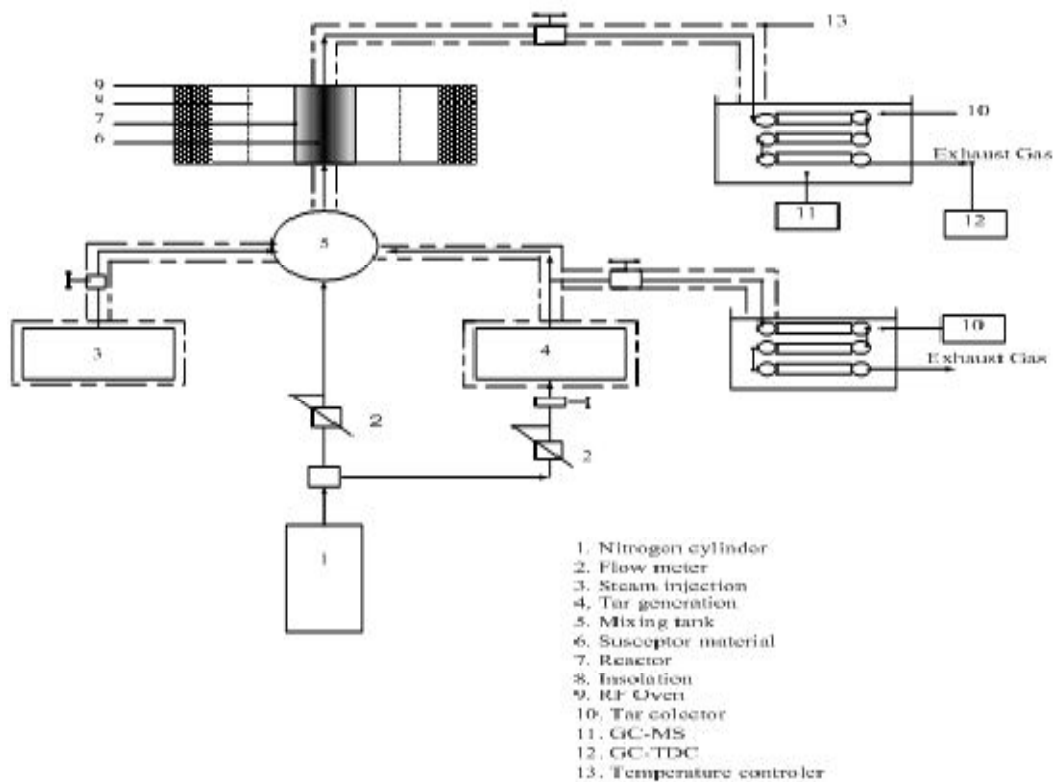
Peralatan utama eksperimental terdiri dari *oven microwave* dimodifikasi, reaktor, tar generator, pencampuran, tar kolektor, dan sistem pengukuran. Sebuah diagram skematik dari peralatan eksperimen disajikan pada gambar 1. Sebuah *microwave oven* domestik dimodifikasi (Panasonic, NN-SM330 M) dengan daya output maksimum 700 W dan frekuensi 2450 MHz, yang dilengkapi dengan daya variabel disesuaikan dengan waktu digunakan dalam percobaan. Sebuah reaktor (25,4 mm id dan 160 mm panjang) secara vertikal dipasang di ruang *microwave* terbuat dari bahan keramik (alumina) tahan terhadap suhu hingga 1600°C. Bahan isolasi (selimut asbes) melindungi reaktor untuk mencegah suhu yang berlebihan di dalam ruang *microwave*. Sebuah thermocouple K-type

digunakan untuk memonitor suhu dalam ruang *microwave* . Dalam reaktor dan bahan isolasi transparan untuk iradiasi *microwave* . Reaktor berisi materi susceptor (SiC) dan detektor suhu K-type thermocouple) di pusat reaktor. Bahan susceptor didukung pada tumpuan stainless steel. Sistem ini dirancang sedemikian rupa sehingga bahan susceptor dalam reaktor dapat dengan mudah dilakuan bokar-pasang dalam perbaikan.

Tabel 3. Karakteristik Katalis

Y-zeolite	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	30
Na ₂ O (wt.%)	0.03%
Unit cell size (Å)	24.28
Surface area (m ² /g)	780
Pore size (µm)	7.4
Calcination 550 °C for	2 h
Dolomite	
Composition (wt.%)	34.69% CaO, 15.06% MgO, 2.34% SiO ₂ , 1.07% Al ₂ O ₃ , 0.61% Fe ₂ O ₃
Particle size (µm)	600
Calcination 900 °C for	1 h
Nickel	
Calcination 900 °C for	1 h
Ruthenium	
Calcination 550 °C for	2 h
Rhodium	
Calcination 550 °C for	2 h

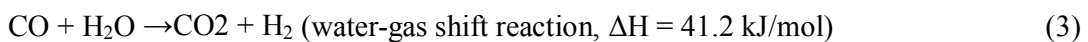
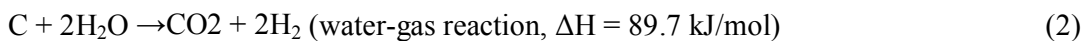
Pembangkit tar (100 mm id, 120 mm tinggi) dengan tabung pencampuran (50 mm id, mm tinggi 100) terbuat dari stainless steel. Pembangkit tar dirancang untuk menguapkan toluene-air dan naftalena-air dimana pencampuran digunakan untuk memastikan homogenitas tar dalam kondisi gas. Pembangkit tar dipanaskan oleh kompor gas untuk mempercepat penguapan tar pada suhu 250°C. Kamar pencampuran dipanaskan oleh pemanas induksi untuk memastikan suhu selama uap tar mengalir dalam sistem perpipaan dengan memasang isolasi menggunakan asbes. Model keseimbangan mikro analisis TB-413 dengan akurasi 0.001g digunakan untuk menentukan massa toluena atau naftalena menguap sebelum penghapusan panas-katalis dan tidak terjadi pengentalan semala proses.



Gambar 1 : Skema Dari Peralatan Eksperimen Untuk Model Tar Konversi.

Penambahan Air

Proses terjadinya gas pada gasifikasi udara-uap dengan reaksi mempunyai peran utama menghasilkan H_2 adalah air-gas dan reaksi pergeseran air-gas (Persamaan (1) - (4)) (Lv, Chang et al 2003.). Reaksi perubah uap metana (Persamaan (4)) berpengaruh terbentuknya terhadap H_2 .



Persamaan (1 – 4) memberikan penjelasan bahwa reaksi dari senyawa-senyawa pada kondisi panas siap beraksi dan bila ditambah dengan senyawa air, maka akan didapatkan senyawa baru. Pemanasan yang terjadi didalam reaktor membuat terjadinya

reaksi penghapusan tar sekaligus konversi gas bermanfaat H₂, CO, CO₂, dan CH₄. H₂ merupakan hasil reaksi yang didapatkan dari C, CO, dan CO₂ dengan adanya penambahan air pada suhu tertentu didalam reaktor pemanas *microwave*, sedangkan dihasilkannya CO, CO₂, dan CH₄ dapat dijelas persamaan reaksi (7 – 17). Pengaruh penambahan air didalam reaktor pemanas merupakan salah satu penentu terbentuknya H₂, disamping kondisi panas dalam reaktor tersebut. Pengaruh penambahan panas merupakan factor penting terjadinya peningkatan H₂, namun juga terjadi sebaliknya (Lu, Guo et al. 2007; Skoulou, Kantarelis et al. 2009). CH₄ mempunyai sifat hampir sama dengan H₂ dengan perlakuan penambahan air semakin tinggi harga yang didapat, namun hal ini harus didukung juga dengan kenaikan suhu (Lu, Guo et al. 2007).

CO terbentuk dengan proses reaksi dekomposisi tar, reaksi perubah air gas, dan juga reaksi reformasi uap, sedangkan terbentuknya CO₂ adalah pada reaksi dekomposisi tar, reaksi perubahan air-gas, dan juga reaksi reformasi uap. Pada terbentuknya dua senyawa CO dan CO₂ terhadap perlakuan panas adalah nilai CO akan bertambah bila perlakuan panas dinaikan suhunya sedangkan berbeda dengan CO₂ akan berkurang bila perlakuan suhu dinaikan (Kruse 2008).

Analisis Data

H₂, CO, CO₂, CH₄ dan N₂ terdeteksi di setiap analisa gas, sedangkan hidrokarbon C₂-C₃ tidak terdeteksi. Untuk setiap tes perubahan penguapan nilai rata-rata dari H₂, CO, CO₂, dan CH₄ di dapatkan 85% total gas pada nilai pengukuran. Hal ini diketahui bahwa laju aliran nitrogen selalu tetap selama pengujian pada perubahan uap dengan demikian isi N₂ rata-rata dapat ditentukan dengan menghitung hasil dari H₂, CO, CO₂ dan CH₄ setiap kali percobaan. Berdasarkan produk gas, konversi toluena (XC₇H₈) dapat dihitung menurut persamaan (5), yang didefinisikan dalam hal karbon dalam produk gas (CO, CO₂, CH₄) dibagi dengan karbon dalam toluena tersebut.

Kandungan hidrogen H₂ dihitung sesuai dengan persamaan (6), dan isi gas lainnya dihitung dengan cara yang sama:

$$X_C = \frac{[CO]_p + [CO_2]_p + [CH_4]_p}{7[C_7H_8]_{inlet}} \quad (5)$$

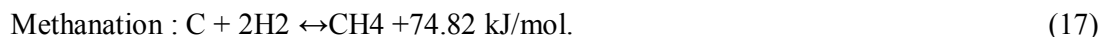
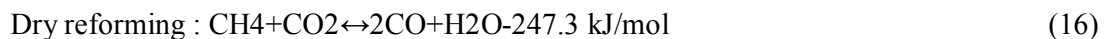
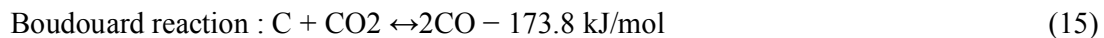
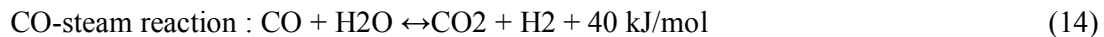
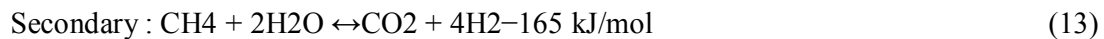
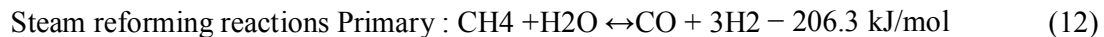
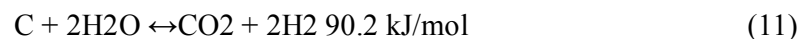
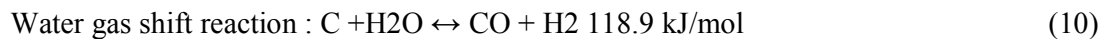
Perhitungan hidrogen dinyatakan dengan potensi stoikiometri yang sesuai dengan konversi total toluena menjadi H₂ menurut reaksi (6):

$$H_2 = \frac{[H_2]_p}{18[C_7H_8]_{\text{inlet}}} \quad (6)$$

H₂, CO, CO₂ dan CH₄ mempunyai jumlah gas dapat ditentukan dengan persamaan 5 dan 6 sedangkan, sedangkan proses-proses reaksinya dapat ditentukan dengan persamaan (7-17). Setelah mendapatkan nilai dari harga-harga gas kita akan dapatkan harga HHV hasil konversi tar menjadi gas-gas bermanfaat.

Selanjutnya pada persamaan berikut dapat digunakan untuk menentukan penghapusan tar pada perlakuan panas dan analisis gas hidrogen (Virginie, Courson et al. 2010; Virginie, Adánez et al. 2012). (Skoulou, Swiderski et al. 2009) Suhu tinggi menyebabkan peningkatan produksi H₂ karena terjadi reaksi penghapusan tar (Reaksi 7) serta beberapa reaksi steam reforming.

Tar thermal decomposition:



Sebagian besar reaksi uap terjadi dengan endotermik dan sebagai pendukung dihasilkannya H₂ pada suhu tinggi dengan waktu tinggal (Reaksi (10), (11), (12), (13), (14)). Perilaku tersebut menunjukkan bahwa produksi CO mudah didapatkan dengan proses reaksi (8), (10), (12), dan (16). Khusus CH₄ pada suhu tinggi akan terjadi perubahan reaksi uap metana dengan menghasilkan karbon dioksida dan monoksida. Kecenderungan akan dihasilkan penurunan CH₄ adalah terlihatnya pada suhu yang diikuti terjadi reaksi endotermik, ini pada persamaan (12), (13), (16) dan (17).

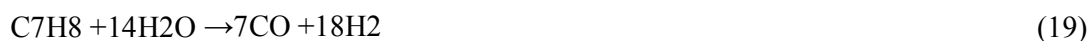
Analisa Tar Dan Produksi Gas

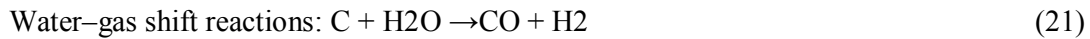
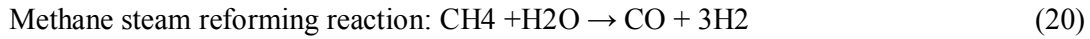
Analisis gas dilakukan dengan menggunakan perangkat kromatografi gas (GC) CP 4900 dengan detektor konduktivitas termal (TCD). Dua kolom yang digunakan adalah pora plot Q dan 5 Å ayakan molekul dengan helium sebagai gas pembawa. Suhu dari kedua injektor dan detektor yang ditetapkan pada 110°C. Suhu pora plot Q dan 5 kolom saringan molekul Å disimpan pada suhu 80°C dan 150°C. Komponen produk cair yang ditentukan dengan menggunakan kromatografi gas 7890-5975C Agilent/ spektrometer massa (GC/MS) dengan HP-5 MS kolom kapiler. Helium digunakan sebagai gas pembawa pada laju alir 1,2 mL/menit. Ukuran injeksi adalah 1 µl dengan rasio split 1:10. Suhu oven awal adalah 40°C diadakan selama 3 menit dan kemudian meningkat menjadi 290°C pada tingkat 5°C/menit, dan diadakan di 290°C selama 5 menit, sedangkan injektor dan detektor dipertahankan pada suhu konstan 250°C dan 230°C. Senyawa diidentifikasi dengan membandingkan spektrum massa yang diperoleh dari Institut Nasional Standar dan Teknologi (NIST) perpustakaan data massa spektral.

HASIL DAN PEMBAHASAN

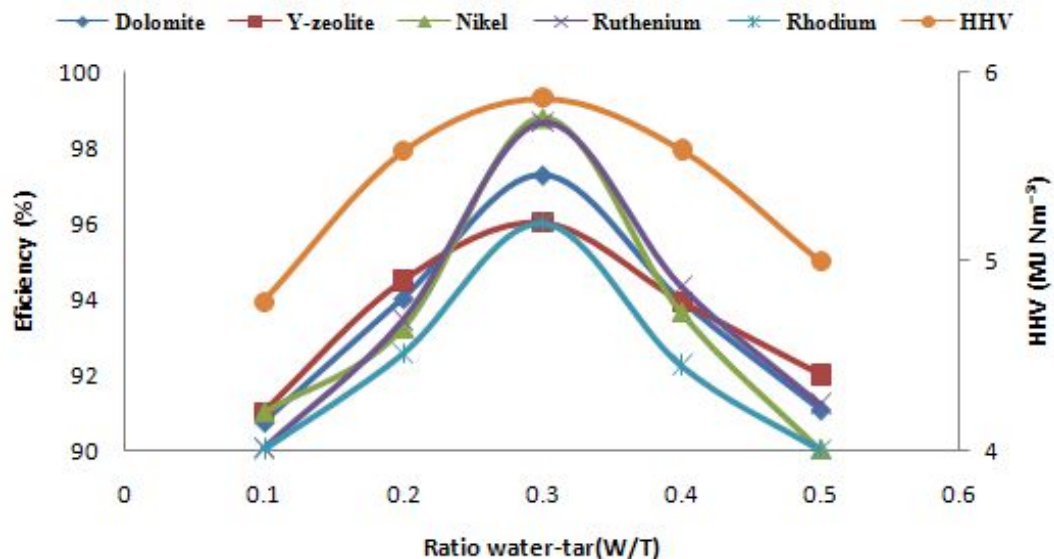
Pengaruh Penghapusan Tar Katalis Dengan Penambahan Air

Reaksi penambahan air ditunjukkan pada persamaan (18-22). Reaksi ini dianggap sebagai reaksi kesetimbangan dengan berbagai variabel tergantung pada konsentrasi gas, suhu, dan tekanan. Namun dalam kenyataannya tidak akan tercapai didalam reaktor *microwave*. Penghapusan tar ditentukan dengan perlakuan panas - katalis (dolomit, Y-zeolit, nikel, ruthenium dan rhodium) ditambah air dalam penelitian ini. Kebutuhan energi secara signifikan lebih rendah untuk menghilangkan tar dengan reaktor *microwave*, selanjutnya dengan penambahan air didapatkan penghapusan tar cukup tinggi mulai suhu terendah sesuai literatur. Didapatkan peningkatan jumlah gas H₂ dan CH₄ sedangkan terjadi penurunan nilai dari CO dan CO₂ gas produk yang ini mengarah ke asumsi bahwa terjadi peningkatan eksotermik reaksi pergeseran air-gas. Reaksi utama yang berkaitan dengan uap ditunjukkan pada persamaan (18) - (22), menggunakan toluena sebagai senyawa tar model. Tar steam reforming reactions:





Pergeseran gas air (WGS) reaksi (Persamaan 21) meningkatkan konsentrasi H_2 dengan mengorbankan CO , tapi menghasilkan lebih CO_2 juga. Oleh karena itu didapatkan nilai kalor yang lebih tinggi (HHV) dari produk gas bila dibandingkan dengan tanpa menggunakan uap. Pada gambar 2 menunjukkan bahwa penghapusan tar dengan perbandingan tar-air (W/T); 0.3 untuk berbagai katalis yang digunakan serta nilai pemanasan panas (HHV). Nilai yang dihasilkan optimal bahwa terdapat unsur-unsur kimia yang stoikiometri dengan perbandingan air dan tar. Perbandingan kurang dari (W/T): 0.3 ion-ion air yang terdapat dalam campuran tar kurang sehingga terjadi pasangan reaksi berkurang dan dihasilkan penghapusan rendah, begitu sebaliknya dengan perbandingan berlebih air, maka tidak cukup waktu bisa terjadinya penghapusan tar. Penghapusan tar dengan menggunakan katalis optimum diperoleh: 97% dolomit, 97% Y-zeolit, 97% nikel, 95% ruthenium dan 97% rodium, didapatkan peningkatan nilai pemanasan panas (HHV) masing-masing (5.71, 4.79, 5.86, 5.86, dan 5, 60) MJ Nm^{-3} .



Gambar 2. Pengaruh Penghapusan Tar dengan Penambahan Air Perlakuan Berbagai Jenis Katalis untuk Mendapatkan Titik Optimum

Produk Akhir Penghapusan Katalis Tar Model

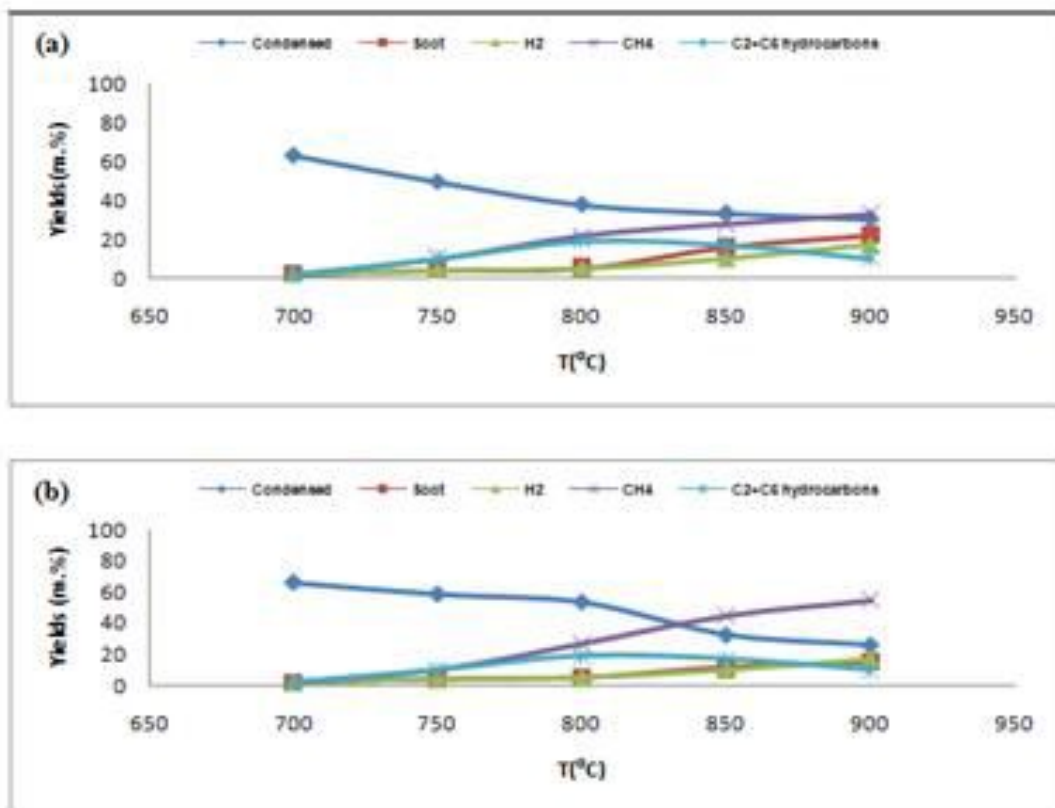
Pengaruh katalis (dolomit, nikel, Y-zeolit, ruthenium, dan rhodium) pada efisiensi penghapusan tar diuji pada suhu yang sama (700⁰C) menggunakan toluene dan naftalena sebagai model senyawa tar. Hasil penelitian menemukan bahwa dolomit dan rhodium menunjukkan efisiensi penyisihan tar rendah dibandingkan dengan Y-zeolit, nikel dan ruthenium dalam semua kondisi diselidiki (campuran air-tar dan perlakuan suhu).

Pengujian ini dikelompokkan menjadi dua kelompok dolomit perlakuan yang sama, nikel dan Y zeolit, ruthenium, rhodium keduanya diperlakukan pada suhu 700⁰C. Efisiensi penghapusan toluene sekitar (63, 66, 17, 26, dan 29)% diamati untuk dolomit, nikel dan Y-zeolit, ruthenium, dan rhodium masing-masing pada suhu 700⁰C dan waktu tinggal gas 0.12-0.18 detik. Seperti halnya dalam penghapusan toluena, aktivitas penghapusan dolomite dan nikel juga rendah dari Y-zeolit, ruthenium dan rhodium. Seperti halnya dalam penghapusan toluena, aktivitas dolomit pada penghapusan naftalena juga rendah dari Y-zeolit (**Anis, Zainal et al. 2013**). Perbedaan dalam kegiatan ini terutama disebabkan oleh perbedaan sifat fisik dan kimia dari kedua katalis seperti yang ditunjukkan pada tabel 3. Literatur menunjukkan bahwa diameter pori rata-rata dolomit umumnya di atas 600 μm sementara Y-zeolit memiliki ukuran pori sekitar 7.4 μm (**Gusta 2009**). Di sisi lain, (**Gates 1992**) dimensi molekul toluena dan naftalena berada dalam kisaran 0.49-0.73 μm . Hal ini menunjukkan bahwa ukuran pori kedua katalis memungkinkan toluena dan naftalena untuk berdifusi ke pori-pori mereka.

Dalam kebanyakan kasus, aktivitas katalitik yang lebih tinggi dari Y-zeolit, ruthenium dan rhodium dibandingkan dengan dolomit dan nikel, sebagaimana mempunyai sifat asam akan yang mendukung penghapusan toluena dan naftalena. Selain itu dengan aktivitas yang tinggi Y-zeolit, ruthenium, dan rodium luas permukaan yang lebih tinggi permukaan (780 m^2g^{-1}) dari dolomit dan nikel. (**Dou, Gao et al. 2003; Buchireddy, Bricka et al. 2010**) melaporkan bahwa aktivitas Y-zeolit, ruthenium dan rhodium terhadap konversi model tar diperoleh pemanasan konvensional.

Penghapusan toluena menggunakan dolomit, nikel, Y-zeolit, ruthenium, dan rhodium sebagai katalis pada berbagai suhu diuji ditunjukkan pada Gambar. 3 (a), 3 (b), 4 (a), 4 (b), dan 5. Dalam penghapusan toluena dilakukan dengan kisaran suhu 700-900⁰C untuk dolomit dan nikel dan 500-700⁰C untuk Y zeolit, ruthenium dan rhodium. Suhu

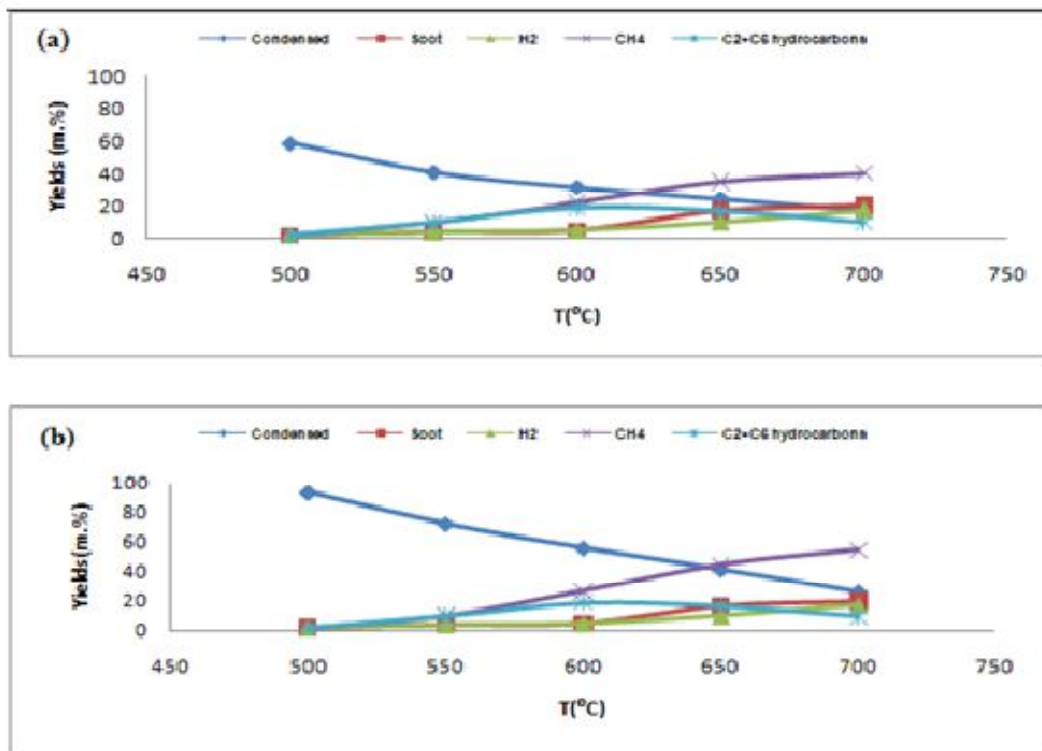
memainkan peran penting dalam penghapusan model tar, seperti yang dijelaskan sebelumnya. Didapatkan produk kental dan jelaga menurun diikuti dengan meningkatnya produk gas dengan penambahan suhu. Gambar 3(a) dan 3(b) menunjukkan bahwa hampir sepertiga dari produk terkondensasi telah dihapus dari 700^oC ke 900^oC selama perlakuan katalis pada tar model toluena menggunakan dolomite dan nikel. Didapat hasil produk kental sekitar (63.1-30.1)% dan (66.75- 26.25)% pada perlakuan suhu 700^oC dan 900^oC.



Gambar 3: Produk Akhir Selama Penghapusan Katalis Tar Model Toluena dengan Katalis (a) Dolomit dan (b) Nikel

Perbandingan penghapusan toluena menggunakan dolomit, nikel, Y zeolit, rutenium, dan rodium juga ditunjukkan dalam gambar 4(a), 4(b), dan 5. Di bawah kondisi operasi dengan suhu 700^oC penggunaan di Y zeolit, ruthenium dan rhodium didapatkan reaktivitas lebih tinggi dari dolomit dan nikel. Penghapusan toluena menunjukkan perbaikan yang signifikan pada suhu yang lebih tinggi di mana H₂ dan CH₄ muncul sebagai produk penting bagi semua katalis. Menurut penelitian sebelumnya bahwa

naftalena adalah tar model yang paling stabil dan dengan unsur sulit untuk dihapus menggunakan dolomit sebagai katalis (Devi, Ptasinski et al. 2005). Jelaga pada dolomit dan nikel permukaan juga diamati di bawah kondisi percobaan. Sebagian kecil dari dolomit dan nikel menjadi hitam terutama pada bagian bawah dan seterusnya berubah abu-abu. Hal ini disebabkan dolomit dan nikel, memiliki ukuran pori yang lebih tinggi memungkinkan reaksi model tar di permukaan, meskipun luas permukaan adalah lebih kecil dari Y-zeolit, ruthenium dan rhodium. Semua percobaan katalis toluena penghapusan dilakukan pada kisaran suhu 700-900⁰C untuk dolomit dan nikel, sedang pada Y-zeolit, ruthenium dan rhodium pada suhu 500-700⁰C. Sebagai bahan pertimbangan lainnya adalah Y-zeolite cukup membutuhkan suhu yang relatif rendah (maksimal 700⁰C) sedangkan bahan katalis lainnya Si/Al rasio rendah seperti A-, X dan untuk perbandingan tinggi Si/Al rasio seperti ZSM-5 diperlukan suhu 1300⁰C (Gates 1992). Hasil pada Gambar. 3 (a), 3 (b), 4 (a), 4 (b), dan 5 menunjukkan bahwa penghapusan model tar meningkat secara signifikan sebagai kenaikan suhu mulai 750⁰C untuk dolomit dan nikel pada 550⁰C untuk Y zeolit, ruthenium dan rhodium.



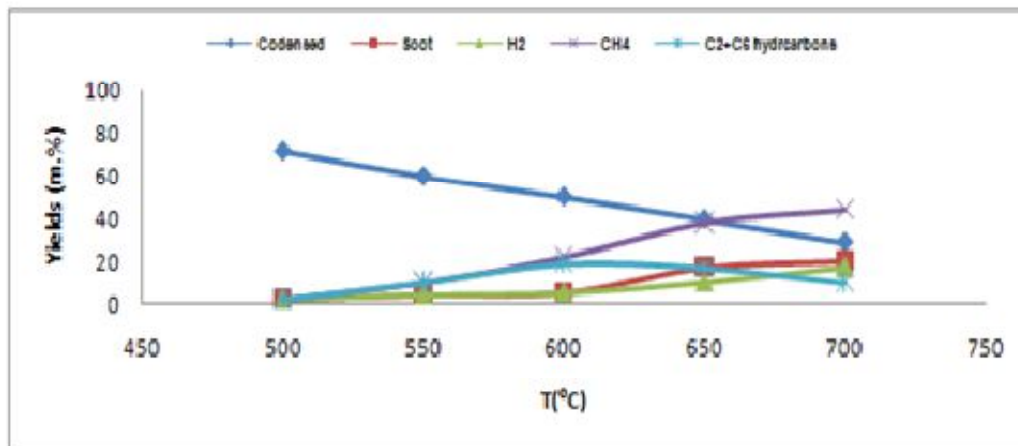
Gambar 4 : Produk Akhir Selama Penghapusan Katalis Tar Model Toluena dengan Katalis (a) Y-Zeolite dan (b) Ruthenium

Peningkatan perlakuan suhu lebih lanjut belum mampu menghapus toluena dengan menggunakan semua katalis signifikan. Angka tersebut juga menunjukkan dengan jelas reaktivitas berbeda penghapusan toluena dengan dolomit, nikel, Y-zeolit, ruthenium, dan rhodium sebagai katalis penghapus tar. Penurunan produk butiran hitam berkurang dengan peningkatan suhu selama penghapusan dengan toluena dan naftalena, seiring itu terjadi peningkatan penghapusan tar dengan reaksi pembentukan dan jelaga seperti yang ditunjukkan pada Pers. (18) - (22). Luas permukaan lebar, ukuran pori-pori dan sifat asam dari semua katalis juga mendukung reaksi pembersihan dan terjadi pembentukan jelaga dalam kondisi diselidiki. Hasil dari produk gas meningkat dengan suhu, sebagai hasilnya. H₂ dan CH₄ menunjukkan peningkatan eksponensial dalam hasil untuk semua katalis digunakan penghapusan toluena. Selain itu pada suhu tertinggi percobaan didapat produksi utama selama pengobatan katalis dengan tar model toluena menggunakan dolomit, nikel, Y-zeolit, ruthenium, dan rhodium

Jelaga diendapkan pada permukaan katalis selanjutnya untuk menghilangkan toluena dan menghilangkan jelaga mulai menurun di atas suhu 850⁰C untuk dolomit dan nikel sementara pada 550⁰C di Y zeolit, ruthenium dan rhodium. **(Radwan, Kyotani et al. 2000)** Pada daerah suhu tinggi jelaga disimpan terutama di saluran katalis sehingga menurunkan luas permukaan.

TGA tes secara umum menunjukkan bahwa mayoritas jelaga yang terbentuk pada katalis adalah jelaga berat (kandungan C tinggi) yang hanya dapat dibakar pada suhu di atas 550⁰C di Y zeolit, ruthenium, rhodium dan sementara 850⁰C untuk dolomit dan nikel. Ini sebagai alasan untuk menghilangkan toluena dengan semua katalis digunakan pada suhu di atas 550⁰C dan 650⁰C pada dua kelompok perlakuan suhu. **(Buchireddy, Bricka et al. 2010)** Mempunyai alasan lain karena hilangnya luas permukaan katalis terjadi pada suhu di atas 500⁰C. Penghapusan Tar dengan berbagai katalis: dolomit, nikel, Y-zeolit, ruthenium dan rhodium dengan perlakuan panas pada 900 °C untuk katalis dolomite dan nikel sedangkan pada 700⁰C untuk katalis Y-zeolit, ruthenium dan rhodium diperoleh harga tertinggi masing-masing adalah: (96.97, 97.37, 96.57, 94.75, 97.13)% penghapusan tar berdasarkan suhu diperoleh pada tertinggi ruthenium dan terendah adalah nikel. Secara keseluruhan dengan perbedaan suhu penghapusan, dapat ditentukan bahwa: rhodium >> Y zeolit > nikel > dolomit > ruthenium.

Penghapusan model tar relatif tinggi untuk toluena dan naftalena melalui perlakuan katalitik dalam penelitian ini tidak hanya disebabkan oleh waktu tinggal yang lama, suhu tinggi dan aktivitas katalis tetapi juga karena peningkatan kandungan energi tar molekul karena intensitas tinggi radiasi elektromagnetik seperti yang disebutkan juga oleh (Vreugdenhil 2009). (Yin 2012) Sebagai contoh toluena sebagai model tar yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kemampuan untuk menyerap energi elektromagnetik dengan tangeren kehilangan 0.04.



Gambar 5. Produk Akhir Selama Penghapusan Katalis Tar Model Toluena dengan Katalis Rhodium

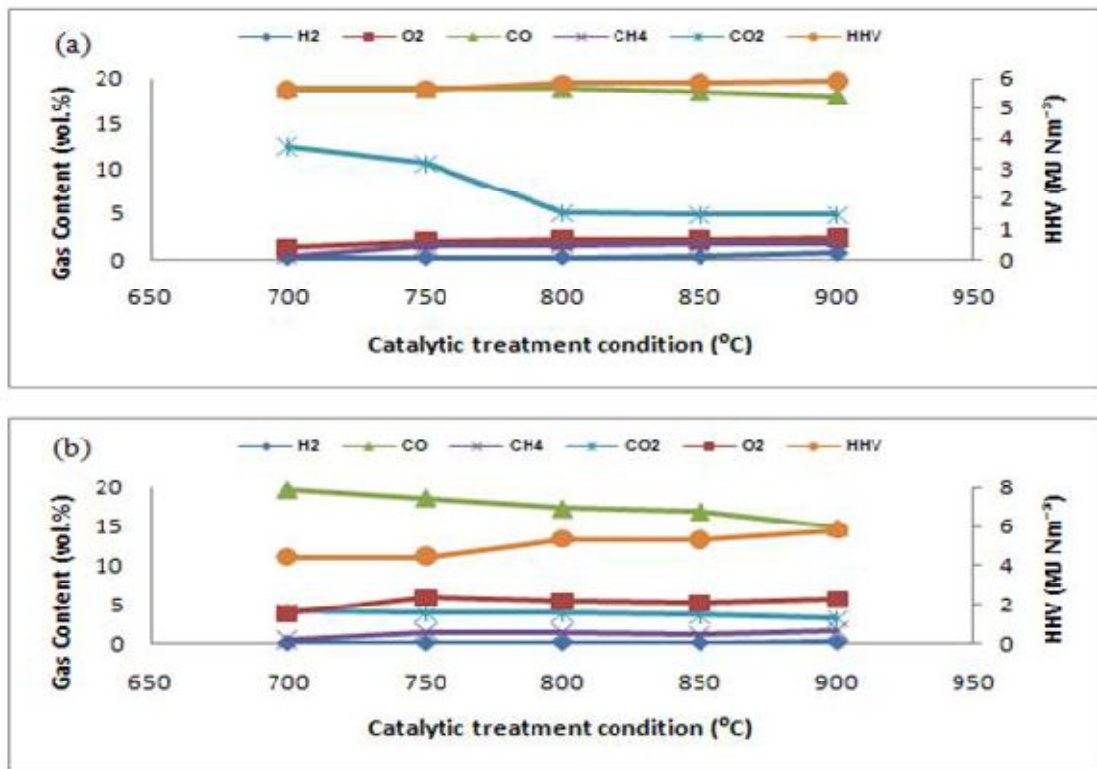
Laju percepatan reaksi selama iradiasi *microwave* telah secara luas disebut *microwave* tidak berdampak pada pemanasan. (Gedye and Wei 1998) Perbandingan dengan pemanasan konvensional, penghapusan *microwave* dapat meningkatkan laju reaksi dari reaksi organik sekitar 10-1200 kali. Meskipun jelaga yang dihasilkan selama pengobatan thermocatalytic toluena dalam penelitian ini dapat mengurangi aktivitas katalis, namun juga memiliki efek positif dalam pengolahan *microwave* yang mampu menyerap energi gelombang mikro, sehingga getaran frekuensi tinggi dari molekul, energi gerak, dan pemanasan sendiri menjadi lebih efektif dalam penghapusan tar.

Konversi Tar Menjadi Gas Bermanfaat

Konversi tar menjadi gas bermanfaat ditunjukkan pada gambar: 6(a), 6(b), 7(a), 7(b), dan 8 dari proses penghapusan katalis akan mengubah tar menjadi gas-gas: H₂, O₂, CO, CH₄ dan CO₂, sehingga akan diperoleh peningkatan nilai pemanasan panas (HHV).

Dalam percobaan dilakukan pada suhu 500-900°C penghapusan katalis dan pengambilan sampel gas untuk pengujian pada gas kromatografi (GC). Senyawa H₂, O₂, dan CH₄ meningkat dengan kenaikan suhu, akan terdapat peningkatan kandungan (vol. %), sementara CO dan CO₂ dengan kenaikan suhu terjadi pengurangan jumlah gas (vol. %). Pada gambar 6(a) menunjukkan perlakuan penghapusan tar dengan katalis dolomite sehingga terjadi peningkatan jumlah gas 75% H₂ dengan perlakuan penghapusan suhu 700-900°C. Peningkatan kenaikan suhu berdampak juga pada penambahan jumlah gas sebesar 74%, namun terjadi penurunan pada gas CO dan CO₂ masing-masing 24% dan 26%. Peningkatan jumlah gas-gas bermanfaat sangat penting pengaruhnya pada nilai pemanasan panas (HHV) sebesar 15%. Peningkatan kandungan H₂ dan CH₄ adalah indikasi yang menunjukkan pada suhu tinggi campuran tar-air dapat dengan mudah bergerak dan bereaksi. Sementara penurunan CO dan gas CO₂ menunjukkan ion gas pembentuk menurun. Peningkatan jumlah gas H₂ dengan penghapusan tar dan penambahan air dapat dijelaskan pada persamaan: (18, 19, 20, 21, dan 22). Tar model toluene (C₇H₈), gas methana (CH₄), karbon (C), dan karbodioksida (CO) bila beraksi dengan air (H₂O), maka akan terjadi reaksi dan menghasilkan gas H₂. Jadi dengan peningkatan suhu pada senyawa-senyawa tersebut akan beraksi dengan senyawa air dan dihasilkan jumlah gas H₂.

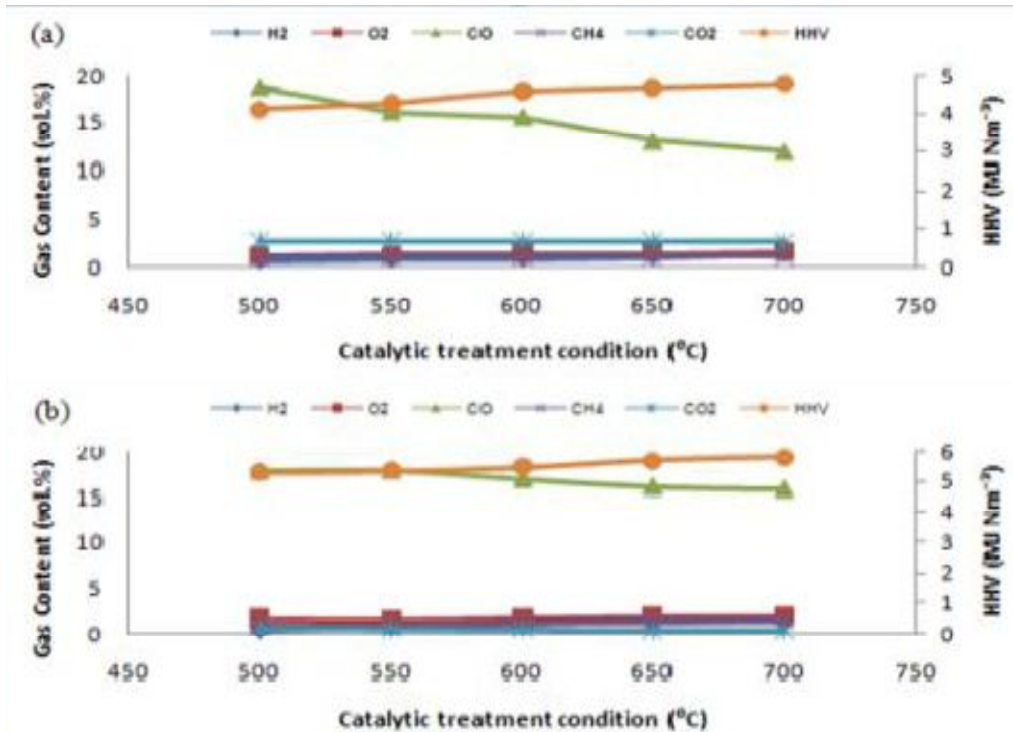
Penghapusan tar dengan katalis nikel dihasilkan konversi gas-gas bermanfaat di tunjukan pada gambar 6(b). Pengujian ini dilakukan pada suhu 700-900°C dengan waktu tunggu gas didalam reaktt penghapusan 0,12-0,18 detik. Peningkatan jumlah terjadi pada H₂ dan CH₄ sebesar 67% dan 74%, sedang terjadi penurunan untuk CO dan CO₂ dengan jumlah tar 5% dan 6%. Pada konversi tar menjadi gas berguna ini kenaikan jumlah nilai pemanasan panas sebesar 6%. Penurunan jumlah gas CO dengan penghapusan tar dan penambahan air dapat dijelaskan pada persamaan: (18, 19, 20, dan 21). Tar model toluene (C₇H₈), gas methana (CH₄), dan karbon (C) bila beraksi dengan air (H₂O), maka akan terjadi reaksi dan menghasilkan penurunan gas CO. Ini sebabkan karena peningkatan suhu pada perlakuan reaksi menghasilkan CH₄, terbentuk gas methane tersebut membutuhkan lebih banyak unsur karbon, sehingga harus mengambil senyawa pada gas CO untuk dapat terbentuk jumlah gas CH₄. Jadi dengan peningkatan suhu pada senyawa-senyawa tersebut akan beraksi dengan senyawa air dan dihasilkan penurunan jumlah gas CO. Terjadinya penurunan gas CO sangat menguntungkan baik untuk kesehatan dan lingkungan.



Gambar 6. Pengaruh Penghapusan Tar Dengan Katalis: (a) Dolomite dan (b) nikel untuk Mendapatkan Gas-Gas Bermanfaat dan HHV

Y-zeolite katalis mempunyai unjuk kerja yang baik sehingga layak dipromosi sebagai salah satu katalis penghapus dan pengkonversi tar menjadi gas-gas bermanfaat dalam peningkatan nilai pemanasan panas (energi) dan sangat menguntungkan secara ekonomis, ini diperlihatkan pada gambar 7(a). Pada suhu 500-700°C pengujian katalis dilakukan, 0.12-0.18 detik waktu tunggu gas melewati ruang reactor, peningkatan jumlah gas 53% untuk H₂ sedangkan 2% pada CH₄, dan 14% hasil yang didapatkan pada nilai pemanasan panas dari 4.11^{-4.79} MJ Nm⁻³. Peningkatan jumlah gas CH₄ saat penghapusan tar dengan penambahan air dapat dijelaskan pada persamaan: (7 dan 17). Tar model toluene (C₇H₈) dan karbon (C) bila beraksi dengan air (H₂O) pada suhu tinggi, maka akan terjadi reaksi dan menghasilkan peningkatan jumlah gas CH₄. Terbentuknya gas CH₄ memerlukan senyawa dalam banyak unsur-unsur C dan H. Jadi pada suhu reaksi senyawa-senyawa tersebut akan beraksi dengan senyawa air dan menghasilkan jumlah gas CH₄. Terbentuknya gas CH₄ memerlukan senyawa dalam banyak unsur-unsur C dan H. Jadi

pada suhu reaksi senyawa-senyawa tersebut akan beraksi dengan senyawa air dan menghasilkan jumlah gas CH₄.

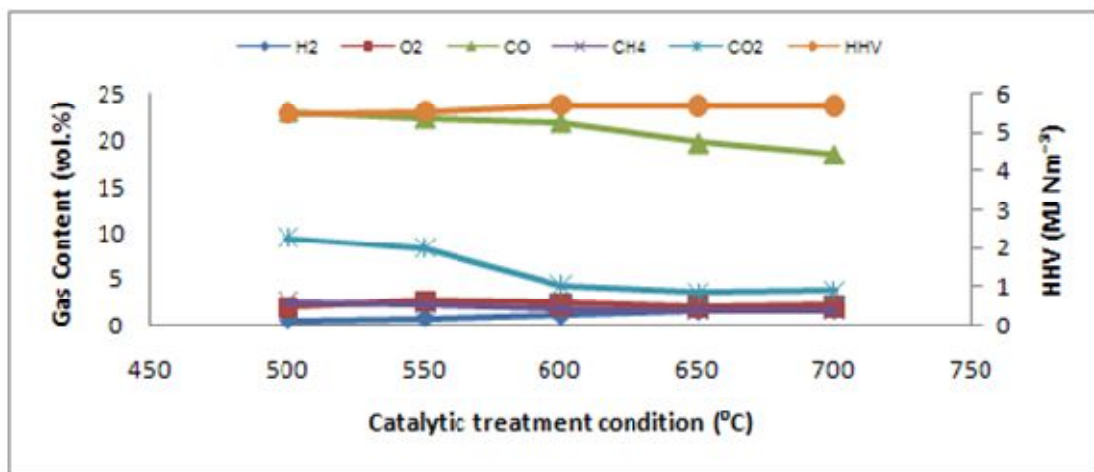


Gambar 7. Pengaruh Penghapusan Tar dengan Katalis: (a) Y-zeolite dan (b) ruthenium untuk mendapatkan gas-gas bermanfaat dan HHV

Pada gambar 7(b) menunjukkan perlakuan penghapusan tar dengan katalis ruthenium sehingga terjadi peningkatan jumlah gas 72% H₂ dengan perlakuan penghapusan suhu 500-700°C. Peningkatan kenaikan suhu berdampak juga pada penambahan jumlah gas CH₄ sebesar 31%, namun terjadi penurunan pada gas CO dan CO₂ masing-masing 11% dan 78%. Peningkatan jumlah gas-gas bermanfaat sangat penting pengaruhnya pada nilai pemanasan panas (HHV) sebesar 9%. Peningkatan kandungan H₂ dan CH₄ adalah indikasi yang menunjukkan pada suhu tinggi campuran tar-air dapat dengan mudah bergerak dan bereaksi. Sementara penurunan CO dan gas CO₂ menunjukkan ion gas pembentuk menurun. Penurunan jumlah gas CO₂ dengan penghapusan tar dan penambahan air dapat dijelaskan pada persamaan: (2, 3, 7, 8, 11, 13, 14, dan 22). Tar model toluene (C₇H₈), gas methana (CH₄), karbon (C), dan karbodioksida

(CO) bila beraksi dengan air (H_2O), maka akan terjadi reaksi dan menghasilkan gas CO_2 . Penurunan jumlah gas CO_2 yang terjadi ini sebagai akibat dari terbentuk gas CH_4 yang memerlukan lebih banyak senyawa unsur C.

Katalis rhodium merupakan katalis yang mempunyai unjuk kerja sangat baik dengan perlakuan panas hanya $500-700^\circ C$ dan mampu menghapuskan tar sebesar 91-96%. Pada gambar 8 diperlihatkan rhodium katalis mampu mengkonversi tar sebesar $5.60 MJ N m^{-3}$, selain juga menghasilkan peningkatan jumlah gas bermanfaat sebesar 71% untuk H_2 dan 37% untuk CH_4 .



Gambar 8. Pengaruh Penghapusan Tar Pada Penambahan Air Dengan Katalis Rhodium untuk Mendapatkan Gas-Gas Bermanfaat dan HHV

KESIMPULAN

Sebuah sistem penghapusan tar dengan pemanans *microwave* mempunyai spesifikasi: energi yang butuhkan rendah, intensif, cepat, dan efektif telah terbukti dikembangkan untuk penghapusan katalis dengan senyawa tar model. Diharapkan suhu $1200^\circ C$ dengan waktu 20 menit iradiasi di dengan daya 700 W, pada tinggi bed 120 mm, dan gas laju aliran gas 2 LPM. Proses penghapusan katalis dengan toluena dan naftalena terjadi pada suhu antara $500^\circ C$ sampai $900^\circ C$. Jelaga muncul sebagai produk utama selama pengobatan termal dari naftalena. Sedangkan didapatkan juga jelaga bebas gas diperoleh dengan menggunakan berbagai katalis. Dalam penelitian didapatkan penghapusan tar tertinggi dengan katalis rhodium sebesar 97%, peningkatan H_2 sebesar

71, dan nilai panas kalor (HHV) $5,67 \text{ MJ Nm}^{-3}$ pada suhu penghapusan 700°C . Katalis nikel menghasilkan penghapusan tertinggi dibandingkan dengan dolomite, Y-zeolite, ruthenium dan rhodium yang digunakan dalam penelitian ini. Namun secara keseluruhan dengan perbedaan suhu penghapusan, dapat ditentukan bahwa: rhodium \gg Y zeolit $>$ nikel $>$ dolomit $>$ ruthenium.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih E-Science Fund diberikan dari Departemen Ilmu, Teknologi dan Inovasi (MOSTI) Malaysia bersama dengan RUI dan PRGS Hibah Universiti Sains Malaysia dalam melaksanakan pekerjaan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anis, S., Z. A. Zainal, et al. (2013). "*Thermocatalytic treatment of biomass tar model compounds via radio frequency.*" *Bioresource Technology* 136(0): 117-125.
- Asadullah, M., T. Miyazawa, et al. (2004). "*A comparison of Rh/CeO₂/SiO₂ catalysts with steam reforming catalysts, dolomite and inert materials as bed materials in low throughput fluidized bed gasification systems.*" *Biomass and Bioenergy* 26(3): 269-279.
- Asadullah, M., T. Miyazawa, et al. (2003). 64 *Catalyst development for low temperature gasification of biomass: Function of char removal in fluidized bed reactor. Studies in Surface Science and Catalysis*. M. O. Masakazu Anpo and Y. Hiromi, Elsevier. Volume 145: 307-310.
- Aznar, J. s. D. a. M. a. P. (1997). "Biomass Gasification with Steam in Fluidized Bed: Effectiveness of CaO, MgO, and CaO-MgO for Hot Raw Gas Cleaning." *Ind. Eng. Chem. Res.* 36, 1535-1543.
- Bridgwater, A. V. (1994). "*Catalysis in thermal biomass conversion.*" *Applied Catalysis A: General* 116(1-2): 5-47.
- Bu, Q., H. Lei, et al. (2012). "*A review of catalytic hydrodeoxygenation of lignin-derived phenols from biomass pyrolysis.*" *Bioresource Technology* 124(0): 470-477.
- Buchireddy, P. R., R. M. Bricka, et al. (2010). "*Biomass Gasification: Catalytic Removal of Tars over Zeolites and Nickel Supported Zeolites.*" *Energy & Fuels* 24(4): 2707-2715.

- Chang, A. C. C., L.-S. Chang, et al. "Steam reforming of gasification-derived tar for syngas production." *International Journal of Hydrogen Energy*(0).
- Chiang, K.-Y., Y.-S. Chen, et al. (2012). "Effect of calcium based catalyst on production of synthesis gas in gasification of waste bamboo chopsticks." *International Journal of Hydrogen Energy* 37(18): 13737-13745.
- Corella, J. O. o., A.; Toledo, J. M (1999). "Biomass Gasification with Air in a Fluidized Bed: Exhaustive Tar Elimination with Commercial Steam Reforming Catalysts " *Energy Fuels* 13, 702-709.
- Devi, L., K. J. Ptasiński, et al. (2005). "Catalytic decomposition of biomass tars: use of dolomite and untreated olivine." *Renewable Energy* 30(4): 565-587.
- Dou, B., J. Gao, et al. (2003). "Catalytic cracking of tar component from high-temperature fuel gas." *Applied Thermal Engineering* 23(17): 2229-2239.
- Farag, S., L. Kouisni, et al. (2014). "Lumped Approach in Kinetic Modeling of Microwave Pyrolysis of Kraft Lignin." *Energy & Fuels* 28(2): 1406-1417.
- Gates, B. C. (1992). " *Catalytic Chemistry* " Wiley & Sons Inc., Singapore. Gedye, R. N. and J. B. Wei (1998). *Canadian Journal of Chemistry* 76(5): 525-532.
- Grieco, E. M., C. Gervasio, et al. (2013). "Lanthanum–chromium–nickel perovskites for the catalytic cracking of tar model compounds." *Fuel* 103(0): 393-397.
- Gusta, E., Dalai, A.K., Uddin, M.A. (2009). "Catalytic decomposition of biomass tars with dolomites " *Energy Fuels* 23 2264–2272.
- Hu, X. and G. Lu (2009). "Investigation of the steam reforming of a series of model compounds derived from bio-oil for hydrogen production." *Applied Catalysis B: Environmental* 88(3–4): 376-385.
- Kruse, A. (2008). "Supercritical water gasification." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2(5): 415-437.
- Lu, Y., L. Guo, et al. (2007). "Thermodynamic modeling and analysis of biomass gasification for hydrogen production in supercritical water." *Chemical Engineering Journal* 131(1–3): 233-244.
- Lv, P., J. Chang, et al. (2003). "Biomass Air–Steam Gasification in a Fluidized Bed to Produce Hydrogen-Rich Gas." *Energy & Fuels* 17(3): 677-682.

- Mastellone, M. L. and L. Zaccariello (2013). *"Metals flow analysis applied to the hydrogen production by catalytic gasification of plastics."* International Journal of Hydrogen Energy 38(9): 3621-3629.
- Milne TA, E. R. (1998.). *"Biomass gasification "tars": their nature, formation and conversion"* NREL, Golden, CO, USA Report no. NREL/TP-570-25357
- Mun, T.-Y., J.-W. Kim, et al. (2013). *"Air gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier: Part 1. The effects and reusability of additives on the removal of tar and hydrogen production."* International Journal of Hydrogen Energy 38(13): 5226-5234.
- Perez-Martinez D, G. S., Centeno A. (2006). *"Effects of the H₂S partial pressure on the performance of bimetallic noble-metal molybdenum catalysts insimultaneous hydrogenation and hydrode sulfurization reactions"* ApplCatalA:Gen 315:35–43.
- Radwan, A. M., T. Kyotani, et al. (2000). *"Characterization of coke deposited from cracking of benzene over USY zeolite catalyst."* Applied Catalysis A: General 192(1): 43-50.
- Rapagná, S., H. Provendier, et al. (2002). *"Development of catalysts suitable for hydrogen or syn-gas production from biomass gasification."* Biomass and Bioenergy 22(5): 377-388.
- Ribeiro, A. M., J. C. Santos, et al. (2010). *"PSA design for stoichiometric adjustment of bio-syngas for methanol production and co-capture of carbon dioxide."* Chemical Engineering Journal 163(3): 355-363.
- Simell, P. A., J. O. Hepola, et al. (1997). *"Effects of gasification gas components on tar and ammonia decomposition over hot gas cleanup catalysts."* Fuel 76(12): 1117-1127.
- Skoulou, V., E. Kantarelis, et al. (2009). *"Effect of biomass leaching on H₂ production, ash and tar behavior during high temperature steam gasification (HTSG) process."* International Journal of Hydrogen Energy 34(14): 5666-5673.
- Sutton, D., B. Kelleher, et al. (2001). *"Investigation of nickel supported catalysts for the upgrading of brown peat derived gasification products."* Bioresource Technology 80(2): 111-116.
- Sutton, D., B. Kelleher, et al. (2002). *"Catalytic conditioning of organic volatile products produced by peat pyrolysis."* Biomass and Bioenergy 23(3): 209-216.

- Świerczyński, D., S. Libs, et al. (2007). "Steam reforming of tar from a biomass gasification process over Ni/olivine catalyst using toluene as a model compound." *Applied Catalysis B: Environmental* 74(3–4): 211-222.
- Taralas, G. and M. G. Kontominas (2004). "Kinetic modelling of VOC catalytic steam pyrolysis for tar abatement phenomena in gasification/pyrolysis technologies." *Fuel* 83(9): 1235-1245.
- Taralas, G. and M. G. Kontominas (2006). "Pyrolysis of solid residues commencing from the olive oil food industry for potential hydrogen production." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 76(1–2): 109-116.
- Thostenson, E. T., Chou, T.W., (1999). "Microwave processing: fundamentals and applications " *Composites Part A* 30 1055–1071.
- Virginie, M., J. Adánez, et al. (2012). "Effect of Fe–olivine on the tar content during biomass gasification in a dual fluidized bed." *Applied Catalysis B: Environmental* 121–122(0): 214-222.
- Virginie, M., C. Courson, et al. (2010). "Toluene steam reforming as tar model molecule produced during biomass gasification with an iron/olivine catalyst." *Comptes Rendus Chimie* 13(10): 1319-1325.
- Vreugdenhil, B. J., Zwart, R.W.R (2009). "Tar formation in pyrolysis and gasification." Wicks, G.G., Clark, ECN-E-08-087.
- Wang, L., Y. Hisada, et al. (2012). "Catalyst property of Co–Fe alloy particles in the steam reforming of biomass tar and toluene." *Applied Catalysis B: Environmental* 121–122(0): 95-104.
- Yin, C. (2012). "Microwave -assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production." *Bioresource Technology* 120(0): 273-284.
- Yu, Q. Z., C. Brage, et al. (2009). "Effects of Chinese dolomites on tar cracking in gasification of birch." *Fuel* 88(10): 1922-1926.

PENULIS:

ARIS WARSITA

1. School of Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia, aris_warsita1@yahoo.com
2. Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari Caturtunggal, Depok, Sleman, 55281 Yogyakarta, Indonesia