

# Penggunaan reaktor microwave efektif pada penghapusan tar dengan perlakuan panas dan penambahan air

Aris Warsita <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>School of Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia, *aris\_warsital@yahoo.com*

<sup>b</sup>Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari Caturtunggal, Depok, Sleman, 55281 Yogyakarta, Indonesia

## Abstrak

Penghapusan tar pada perlakuan panas efektif dengan microwave sebagai reaktor, mempunyai energi pembangkitan intensif telah dipromosikan pada penghapusan tar dari gas gasifikasi biomassa. Toluena dan naftalena sebagai senyawa tar model biomassa gasifikasi dengan perlakuan panas serta penambahan air pada perlakuan suhu dari 800<sup>o</sup>C - 1200<sup>o</sup>C dengan waktu tinggal 0-0,4 detik. Metoda baru ini akan dijelaskan pada makalah ini dibagian karakteristik pemanasan. Studi ini akan menjelaskan bahwa toluena jauh lebih mudah untuk dihapus dari naftalena. Perlakuan panas pada penghapusan tar efektif dengan penambahan air, ini telah didapatkan hasil penghapusan tar pada suhu penghapusan rendah dan didapatkan efisiensi hampir 100% pada suhu optimum referensi. Jelaga ditemukan sebagai produk akhir pengobatan penghapusan panas dari model tar dan benar-benar bersih pada suhu 1200<sup>o</sup>C. Pemanasan dengan microwave tidak saja menghasilkan penghapusan tar namun juga terjadi reaksi radikal. Studi ini menunjukkan bahwa penghapusan tar dengan pemanasan dan penambahan air dengan tar model toluena dan naftalena yang bersifat asam, ini sangat berpengaruh terhadap penghapusan tar dan konversi gas-gas bermanfaat.

Kata kunci : microwave panas tar air toluene.

## 1. Pendahuluan

Permasalahan utama produksi gas gasifikasi biomassa adalah masih terdapatnya kandungan tar yang terjadi pembekuan pada suhu rendah, dan sampai sekarang belum dapat teratasi. Pembekuan tar dapat terjadi pada pipa saluran mesin dan turbin dengan kadar konsentrasi tinggi. Produksi gas gasifier mempunyai kadar tar bermacam-macam sekitar 1g Nm<sup>-3</sup>, 10g Nm<sup>-3</sup> dan 100g Nm<sup>-3</sup> yang dihasilkan dari type gasifer downdraft, updraft dan fluidized bed gasifikasi (Milne; and Evans 1998).

Persyaratan konsentrasi kandungan tar sampai 100mg Nm<sup>-3</sup> untuk mesin-mesin dengan pembakaran dalam (motor bakar) sedang kurang dari 5mg Nm<sup>-3</sup> untuk mesin turbin gas.

Perlakuan mekanis, panas, dan katalis merupakan metode yang dapat dilakukan pada pengurangan tar pada desain gasifier. Penyelesaian yang belum menunjukkan hasil dari desain gasifier karena bermacamnya bahan baku yang digunakan, penurunan efisiensi pendinginan gas, dan tidak sama konstruksi gasifier (Boroson, Howard et al. 1989; Radwan, Kyotani et al. 2000; Yu, Rybakov et al. 2001; Bergman 2003 ; Zhang 2010). Metode-metode yang telah dilakukan para peneliti tersebut belum menunjukkan pengurangan tar secara nyata. Perubahan yang cepat pada fluidized-bed gasifier (FICFB) dengan jumlah tar yang dihasilkan

selama proses pengegasan(pembuatan gas) diperoleh 1g Nm<sup>-3</sup> (Hofbauer, Veronik et al. 1997). Metode-metode dipromosikan dalam pengurangan jumlah tar produksi biomassa gasifikasi dengan: konversi energi, alat pemisah, dan pengolahan kotoran ekonomis (Lee, Jung et al. 2008; Anis and Zainal 2011). Selanjutnya metode penghapusan panas-katalis yang dilakukan pada reaktor skunder ini sangat menjanjikan, karena tidak menghasilkan limbah namun mengkonversi tar menjadi energi tambahan (Anis and Zainal 2011).

Perlakuan tar dengan pemanasan sudah banyak dilakukan, namun dengan suhu dibawah 1100 °C dengan efisiensi penghapusan yang masih relative rendah. Beberapa peneliti yang mendapatkan penghapusan tar yang memberikan efisiensi tinggi dengan perlakuan panas lebih dari 1100 °C (Jess 1996; Zhang 2010) juga peneliti lain telah melakukan dengan suhu 1200 °C dengan waktu tinggal dibawah 10 detik mendapatkan penghapusan tar tinggi (Jess 1996). Suhu tinggi yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi tinggi ini tentu berdampak pada biaya tinggi dan tidak layak untuk aplikasikan.

Hydrogen dan CO dalam gas yang hasilkan meningkat menjadi dua sampai tiga kali lipat dari gas masuk yang diberikan (Onozaki, Watanabe

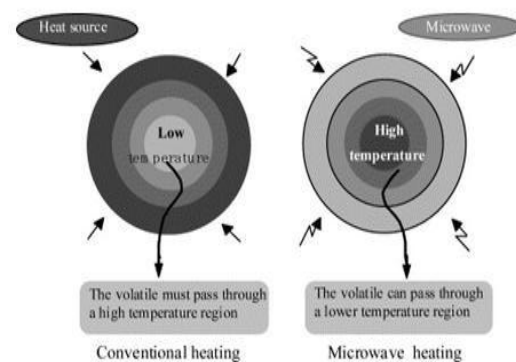
et al. 2006). Kenaikan suhu berdampak pada peningkatan produksi hydrogen, sedangkan hanya terjadi penurunan sedikit LHV yang dihasilkan. Perbandingan antara uap dan biomasa dijadikan sebagai faktor untuk pengegasan biomasa (Gao, Li et al. 2009). (Vivanpatarakij and Assabumrungrat 2013) menentukan parameter tertentu pada pengoperasian yang sesuai gasifikasi temperature (Tgs), reformasi temperature (Tref), dan perbandingan bahan baku-uap (S:BM), sedangkan panas eksotermis dari pengegasan dapat memberikan pemanasan kebagian lain termasuk perubahan uap yang terjadi.

Dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa penghapusan tar dengan pemanasan sangat efektif pada suhu tinggi, namun secara keseluruhan untuk mendapatkan suhu tinggi tentu akan berdampak pada biaya tinggi. Mekanisme pemanas konvensional menggunakan sumber listrik tinggi dari eksternal di mana perpindahan panas terjadi dari permukaan ke inti materi, hal ini telah banyak dilakukan oleh para peneliti. Lambatnya suhu pemanasan yang didapatkan, tahanan perpindahan panas yang tinggi, kehilangan panas sekitar, dan dinding reaktor menjadi mudah rusak akibat pemanasan terus-menerus (Salema and Ani 2011). Dengan berbagai macam alasan tersebut metode penghapusan tar konvensional tidak ekonomis dan mahal.

Hal penting harus dipenuhi sebagai persyaratan penggunaan alat percobaan adalah : pengoperasian alat yang sederhana, cepat mendapatkan panas, dan secara ekonomis murah dalam pengoperasiannya. Untuk memenuhi persyaratan diatas penggunaan energi gelombang mikro dalam penelitian ini diyakini menjadi pemecahan kekurangan yang terdapat pada metode pemanasan konvensional. Diperlihat gambar 1 transfer panas kedalam bahan dapat terjadi seketika melalui sebuah interaksi molekul medan elektromagnetik, dalam metode ini biasa digunakan dengan microwave (Thostenson and Chou 1999). Perlakuan pemanasan volumetric bahan dengan menggunakan microwave dapat penghematan energi yang signifikan, waktu yang cepat, meningkatkan proses produksi, dan ramah lingkungan (Yu, Rybakov et al. 2001; Jones, Lelyveld et al. 2002). Microwave pada perlakuan Penggunaan microwave diyakini akan menghasilkan unjuk kerja baik dan optimal dalam penghapusan tar dengan proses penguapan didalam reaktor dengan beberapa indikator operasional, antara lain: ukuran partikel susceptor, jarak waktu tinggal, laju aliran gas dan daya listrik yang digunakan. Dalam penelitian ini penghapusan tar dengan perlakuan panas dan penambahan air diharapkan lebih efektif dengan

pemanasan dalam bidang pengolahan limbah termasuk dari pengolahan gas mempunyai keuntungan adalah: (1) pemanasan cepat, (2) kemampuan suhu tinggi, (3) pemanasan selektif, (4) peningkatan reaktivitas kimia, (5) cepat dan proses yang fleksibel dengan jarak jauh, (6) kemudahan kontrol, (7) ketersediaan peralatan proses, kekompakan, biaya, dan pemeliharaan, (8) portabilitas peralatan dan proses, (9) sumber energi yang lebih bersih dibandingkan dengan beberapa sistem konvensional, dan (10) efektivitas keseluruhan biaya keseluruhan/ investasi rendah (Wicks 1997). Penggunaan microwave pada pemanasan biomasa pirolisis telah dilaporkan dan analisis secara menyeluruh tentang karakteristik dan unjuk kerjanya (Yin 2012).

Oleh karena itu, dalam penelitian ini karakteristik panas dari sistem microwave dimodifikasi dan dapat aplikasi untuk penghapusan tar model. Penelitian ini menawarkan prospek yang tinggi dalam memberikan pengetahuan dasar perlakuan penghapusan panas tar dengan tambahan air melalui iradiasi microwave yang mempunyai potensi: hemat biaya, konversi energi yang bersih, kesederhanaan dan memenuhi potensi untuk skala proses sesungguhnya. Selain itu, diharapkan bahwa suhu tinggi yang dihasilkan akan berdampak pada peningkatan reaksi radikal yang diyakinkan tidak hanya mampu melakukan penghapusan tar yang tinggi melainkan juga memberikan pemanasan cepat dengan iradiasi intensitas elektromagnetik yang tinggi.



Gambar 1 : Perbandingan pemanasan konvensional dengan pemanasan microwave

berbagai variasi antara lain: perlakuan berbagai suhu, waktu proses penghapusan tar, dan penggunaan tar model (toluene dan naftalen) sebagai bahan pengganti senyawa tar.

## 2. Metode

### 2.1. Material

Senyawa toluene dan naftalena (merk pasaran) adalah bahan yang digunakan menjadi model dari

tar yang merupakan bagian senyawa biomasa dalam percobaan ini. Naftalena (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>) adalah senyawa poli aromatik hidrokarbon ringan (LPAH) dengan senyawa dua cicin yang merupakan kelas 4 tar, sedangkan toluena (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>) adalah hidrokarbon aromatik ringan (LAH) dengan senyawa cicin tunggal yang merupakan kelas 3 tar. Pengegasan gasifier downdraft biasa dikelompokkan dalam kelas 3 dan 4 tar yang dihasilkan fluidized bed (Milne; and Evans 1998). Sebagai gas pembawa nitrogen (99,999%) yang telah dimurnikan akan membawa model tar dalam penguapan dan menjaga dalam keadaan uap. Pencampuran air (20%, 40%, 60%, 80% dan 100%) dalam tar model diuapkan pada tabung pemanasan selanjutnya dialirkan masuk pada reaktor penghapus tar. Bahan suseptor (penyimpan panas) yang digunakan ada empat partikel silikon karbida (SiC): F10, F12, F14, dan F16. Ditunjukkan pada tabel 1 adalah sifat SiC sesuai dengan FEPA-Standard 42-GB-1984 R 1993 dan 42-GB-1986 R 1993. Suseptor dalam microwave sebagai bahan menyerap panas dan mengubah energi microwave menjadi panas oleh konduksi karena kerugian dielektrik tinggi dan waktu relaksasi sesuai dengan perubahan dari ke microwave kearah SiC. Selain itu, SiC juga tidak memiliki efek katalitik dalam dekomposisi tar (Simell, Hepola et al. 1997).

Tabel 1 : Berat jenis dan pembagian ukuran butir silikon karbida (SiC)

Grnt designation (FEPA standard)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Grain size distribution		
		(um)	(%)	Mean (um)
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	

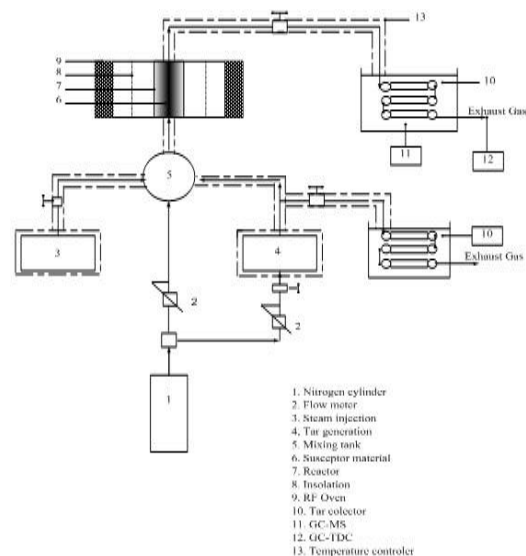
## 2.2. Peralatan Eksperimen

Aparat eksperimental terdiri dari pemanas microwave yang telah dimodifikasi, reaktor, tar generator, pencampuran, tar kolektor, dan sistem pengukuran. Diagram skematik dari peralatan eksperimen ditunjukkan pada gambar 2.

Sebuah microwave pemanas dimodifikasi bagian dalam (Panasonic, NN-SM330 M) dengan daya output maksimum 700 W dan frekuensi 2450 MHz, yang dilengkapi dengan alat pengontrol daya variabel dan waktu digunakan dalam percobaan ini. Dinding reaktor terbuat dari bahan keramik (alumina) yang mampu menahan

suhu hingga 1600 °C dengan ukuran (25,4 mm id dan 160 mm panjang) digunakan pada reaktor secara vertikal dipasang di ruang microwave. Isolator dipasang pada seluruh dinding raktor dengan ketebalan tertentu untuk mencegah panas yang berlebihan didalam microwave dan menghindari kerusakan.

Thermocouple jenis K-Tepy ditempatkan didalam reaktor sebagai pengontrol suhu yang diharapkan. Kedua bahan yang dapat tertembus microwave tanpa hambatan adalah reaktor dan isolstor. Sebuah detektor suhu ditempatkan tepat dalam reaktor (K-type thermocouple) pada pusat reaktor terdapat susceptor silikon karbida (SiC). Desain konstruksi reaktor dibuat untuk memberikan ke mudahan dalam perbaikan apabila terjadi kerusakan.



Gambar 2 : . Sketsa diagram peralatan percobaan

Tabung pencampur berukuran (50 mm id, mm tinggi 100) dan pembuatan tar berukuran (100 mm id, 120 mm tinggi) terbuat dari bahan stainless steel. Pembuatan tar dirancang untuk menguapkan toluena atau naftalena dan air sedangkan pencampuran digunakan untuk memastikan homogenitas tar dan pembawa campuran gas menguap. Tar dan air dipanaskan dengan kompor gas LPG untuk mempercepat penguapan tar dengan suhu 250 °C. Tabung pencampuran dipanaskan menggunakan kompor listrik induksi untuk menjaga campuran gas dan tar tetap dalam kondisi uap selama dalam pipa saluran menuju reaktor oleh karenanya pipa saluran diisolasi dengan bahan asbes. Analisis penguapan tar dan air sebelum penghapusan tar serta massa pembekuan setelah proses yang digunakan dengan model keseimbangan mikro analisis TB-413 dengan ketepatan mencapai 0,001 g digunakan untuk menentukan massa toluena atau naftalena (mass balance).

### 2.3. Analisis Data

H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub> terdeteksi di setiap analisa gas, sedangkan hidrokarbon C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub> tidak terdeteksi. Untuk setiap pengujian sampel akan didapatkan nilai dari H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> yang merupakan jumlah volume 85 % dari total pengukuran. Hal ini diketahui bahwa laju aliran toluena tersebut. Kandungan hidrogen (V% (H<sub>2</sub>)) dihitung sesuai dengan persamaan (2), dan

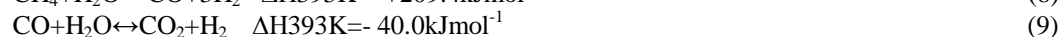
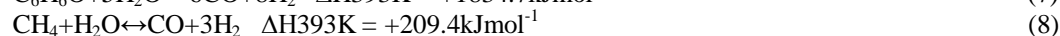
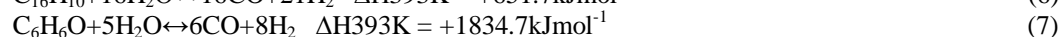
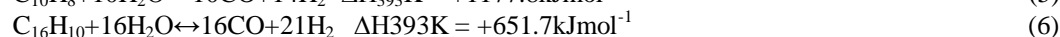
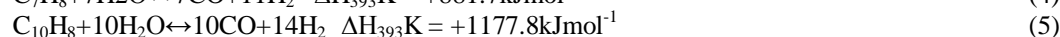
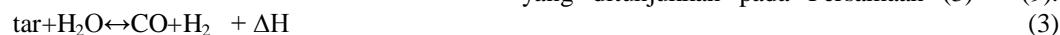
$$X_{C_7H_8} \text{ (mol\%)} = \frac{FCO_{out} + FCO_{2,out} + FCH_4_{out}}{7FC_{7H_8,in}} \times 100 \quad (1)$$

$$V \text{ (H}_2\text{)} = \frac{H_2}{H_2 + CO + CO_2 + CH_4} \times 100 \quad (2)$$

Persamaan untuk menentukan persentase penghapusan tar dalam analisis perlakuan panas dan gas hidrogen (Tao, Ohta et al. 2013).

### 2.4. Perlakuan Panas dan Penambahan Air Tar Model

Kecepatan aliran gas (2-15 LPM), daya listrik yang perlukan microwave (135-700 W), posisi ketinggian bed (40-120 mm), ukuran partikel bahan susceptor (F10 -F16), dan variasi berbagai suhu di dalam reaktor penelitian ini dilakukan. Pengaturan menggunakan flow meter dan katup pada penggunaan nitrogen murni dilewatkan melalui sistem dari bagian bawah reaktor. Suhu didalam reaktor microwave dicatat setiap 5 menit dan 20 menit iradiasi tercatat menggunakan 12 channel sensor suhu dengan data suhu logger Model 69292-30. Untuk memadatkan pengukuran suhu di medan reaktor elektromagnetik dipasang thermocouple berdiameter 3 mm (K-type thermocouple) dari



Sedangkan uap (tar+air) terjadi reformasi reaksi yang endotermik dan reaksi dalam proses gasifikasi terjadi secara keseluruhan eksotermis. Energi panas juga dibutuhkan pada unit pemanasan dan uap pembangkit.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Profil Temperatur

#### 3.1.1. Pengaruh Ukuran Material Partikel Susceptor

Untuk memastikan pengaruh ukuran partikel SiC yang tepat sebagai bahan susceptor pada kinerja pemanasan panas microwave, penelitian ini dilakukan. Ketinggian bahan susceptor dalam reaktor 120 mm dengan empat ukuran partikel, 2,085 mm (F10), 1,765 mm (F12), 1,470 mm (F14), dan 1,230 mm (F16) pada daya

nitrogen tetap selama percobaan sehingga jumlah gas N<sub>2</sub> dapat dihitung dari hasil dari H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> untuk setiap percobaan. Berdasarkan jumlah produk gas konversi toluena (XC<sub>7</sub>H<sub>8</sub>) dapat dihitung menurut persamaan (1), yang didefinisikan dalam karbon produk gas (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) dibagi dengan karbon dalam jumlah gas lainnya dapat ditentukan dengan cara yang sama:

bahan stainless steel. Isolasi ini diperlukan untuk menghindari busur terhubung langsung ke landasan dengan isolasi pada seluruh permukaan selubung logam. Didalam reaktor dipasang isolasi logam tahan suhu tinggi untuk menghindari terjadinya sentuhan langsung dengan suhu tinggi. Pemanas microwave dapat dimatikan setelah gas melalui reactor dengan waktu iradiasi yang diperlukan terpenuhi. Setelah percobaan selesai untuk mendinginkan microwave dengan suhu lingkungan digunakan fun sirkulasi. Prosedur pengoperasian reaktor selalu diulang untuk setiap pengujian.

### 2.5. Perubahan Uap Tar

Toluena, naftalena, fenol dan pyrene adalah senyawa-senyawa yang terdapat pada tar biomasa. Pergeseran gas reaksi uap (WGSR), perubahan uap menthana (MSR), dan perubahan uap tar (TSR) adalah reaksi yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3) - (9).

microwave 700 W dengan laju alir gas dari 10 LPM diperlihatkan pada gambar 3 (b). Didapatkan suhu lebih tinggi pada reaktor dan juga laju pemanasan pada ukuran partikel yang paling kecil. Pada masing-masing ukuran partikel di iradiasi dengan lama waktu 20 menit mencapai suhu 1206 °C, 1196 °C, 1179 °C, dan 1168 °C untuk F16, F14, F12, dan F10. Dan selanjutnya tingkat kecepatan pemanasan dengan urutan yaitu 54,82 °C min<sup>-1</sup>, 54,54 °C min<sup>-1</sup>, 54,06 °C min<sup>-1</sup>, dan 52,56 °C min<sup>-1</sup>. Peningkatan suhu reactor meningkat perlahan dan menjadi signifikan pada pemanasan lanjut waktu iradiasi, itu terjadi setiap 5 menit iradiasi. Suhu awalnya pada permukaan partikel menjadi dasar dengan kedalaman penetrasi microwave dengan angka kesalahan menjadi 1/e (e =

2,718). Pada bagian ini energi gelombang mikro diubah menjadi panas dan sisa daya menurun sesuai jarak dari permukaan material, ketika itu energi microwave mengirimi melalui bahan penyerap panas. (J. Tang 2012) Menjelaskan bahwa pengurangan daya microwave adalah fungsi dari jarak (z) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (10) adalah hukum Lambert:

$$P(z) = P_0 e^{-\alpha z} \quad (10)$$

dimana  $P_0$  adalah kekuatan microwave insiden di permukaan,  $P(z)$  adalah kekuatan microwave di z jarak ke arah microwave propagasi dalam bahan penyerap, dan  $\alpha$  adalah konstanta atenuasi. Dari persamaan (10) dapat dijelaskan bahwa kekuatan microwave berkurang secara eksponensial dengan kedalaman materi penyerap. Dengan ukuran yang lebih kecil untuk mencapainya lebih cepat dan suhu yang lebih tinggi ini adalah bahan penyerap yang efektif (Huang, Kuan et al. 2010). Selain itu, kebutuhan daya microwave dapat juga dikurangi dengan ukuran partikel yang lebih kecil. Namun demikian, hanya sedikit berbeda untuk semua ukuran partikel diuji selama 20 menit iradiasi, baik suhu reaktor dan laju pemanasan dalam penelitian ini. Suhu reaktor serta tingkat pemanasan setiap sampel mempunyai perbedaan kurang dari 5%. Energi gelombang mikro cukup untuk menembus ke dalam partikel dan hanya fokus pada satu hotspot, untuk rentang ukuran partikel.

### 3.1.2. Pengaruh Ketinggian Posisi Bed

Microwave pemanasan panas dipelajari dengan memvariasikan ketinggian bahan susceptor pada 40 mm, 80 mm, dan 120 mm pada daya microwave 700 W dengan laju alir gas 10 LPM dengan ukuran bahan partikel susceptor dari F10 adalah untuk mempelajari efek tinggi bed pada unjuk kerjanya. Peningkatan suhu reaktor dengan meningkatnya ketinggian bed diperlihatkan pada gambar 3 (b). Suhu reaktor juga dipelajari dengan sistem ketinggian bed untuk mendapatkan daya penyerapan pada microwave. Suhu reaktor meningkat tajam pada 2 menit pertama iradiasi dengan ketinggian bed : 40 mm dan 80 mm. Suhu reaktor tetap konstan untuk tinggi bed dari 40 mm namun meningkat secara perlahan untuk 80 mm setelah 2 menit. Suhu reaktor meningkat secara signifikan setelah 20 menit pengujian iradiasi pada ketinggian bed dari 120 mm. Daya microwave meningkatkan penyerapan lebih banyak volume bahan susceptor, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (11) (Sutton 1992), yang bersamaan dengan penelitian ini (Salema and Ani 2011):

Pemanasan microwave dipelajari dengan memvariasikan ketinggian bahan susceptor pada 40 mm, 80 mm, dan 120 mm dalam pengaruh microwave dengan daya 700 W, laju alir gas dari

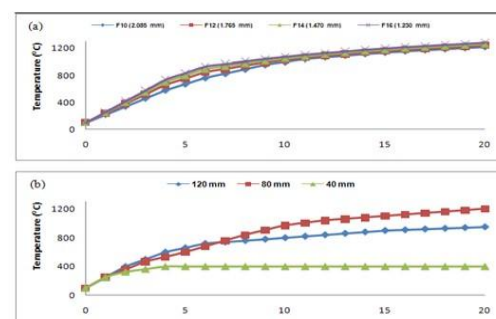
10 LPM, dan bahan susceptor ukuran partikel F10 pengaruh ketinggian terhadap unjuk kerja. Persamaan ini menjelaskan dimana bahwa:

$$P_{abs} = 2\pi r f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 V \quad (11)$$

$P_{abs}$  adalah daya microwave diperlukan (W),  $f$  adalah frekuensi (Hz),  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang bebas ( $8,85 \times 10^{-12}$  F-m<sup>-1</sup>),  $\epsilon''$  adalah faktor kerugian dielektrik, E adalah medan listrik ( $V m^{-1}$ ), dan V adalah volume bahan ( $m^3$ ).

### 3.1.3. Pengaruh Laju Alir Gas

Pengaruh pemanasan microwave dengan daya terpasang 700 W, dengan tinggi bed 120 mm, dan bahan susceptor ukuran partikel F10 pada laju alir gas bervariasi pada 5 LPM, 10 LPM dan 15 LPM. Pada gambar 4 (a) adalah hasil pemanasan microwave yang ditunjukkan selama 20 menit iradiasi. Selanjutnya laju aliran gas yang tepat harus dipilih untuk kinerja yang optimal. Perbedaan aliran dari dua atau lebih sampai ditemukan bahwa laju aliran gas dari 10 LPM memiliki tingkat pemanasan. Suhu reaktor meningkat secara signifikan selama 5 menit pertama iradiasi dan kemudian meningkat secara bertahap untuk laju alir gas dari 5 LPM dan 10 LPM menunjukkan peningkatan. Oleh karena itu diperlu waktu yang cukup untuk mendapatkan temperatur yang seragam dalam reaktor, karena laju konveksi panas untuk memanaskan semua partikel bahan susceptor pada suhu rendah. Suhu reaktor meningkat lebih signifikan untuk pertama 5 menit iradiasi, sedangkan suhu luar berangsur-angsur dan akhirnya konstan, ini dampak dari laju alir gas 15 LPM. Partikel-partikel yang terdapat di sepanjang reaktor panas yang dihasilkan oleh kekuatan microwave diserap dalam bahan susceptor dengan cepat dan dapat didistribusikan. Namun demikian, laju alir gas yang tinggi dengan suhu yang rendah disebabkan pengaruh pendinginan konvektif pada permukaan material ini terjadi sebelum kondisi optimum dicapai. Ini merupakan penjelasan hukum Newton tentang pendinginan konveksi.



Gambar 3 : profil Suhu di dalam reaktor: (a) efek susceptor ukuran partikel material; (b) efek ketinggian bed.



### 3.1.4. Pengaruh Daya Microwave

Pada gambar 4 (b) ditunjukkan profil temperatur dalam reaktor sebagai dampak pemanasan pada microwave dengan daya berbeda. Parameter lainnya yang digunakan yaitu bed dengan ketinggian konstan adalah 120 mm, laju alir gas adalah 10 LPM, dan ukuran partikel bahan susceptor adalah F10 percobaan ini dilaksanakan. Peningkatan suhu dalam reaktor sebagai pengaruh kerja microwave, seperti yang ditunjukkan dalam percobaan adalah meningkatnya suhu secara signifikan untuk 2 dan 4 menit pertama iradiasi dengan daya microwave 135 W dan 444 W. Kondisi suhu konstan untuk daya microwave dari 135W selanjutnya meningkat perlahan untuk 444 W. Dihasilkan suhu maksimum 283 °C dan 743 °C dengan waktu iradiasi selama 20 menit. Pada 590 W dan 700 W di mana dihasilkan suhu meningkat secara signifikan mencapai 943 °C dan 1168 °C setelah 20 menit iradiasi, hasil ini yang diperoleh ini sangatlah menjanjikan. Oleh karena itu suhu di dalam reaktor juga akan meningkat, kasus ini menunjukkan bahwa kekuatan microwave menyerap panas adalah kekuatan pemancaran gelombang dari microwave. Seperti yang diungkapkan sebelumnya di mana kekuatan microwave menyerap sangat dipengaruhi oleh medan listrik dan akan didapatkan hasil yang sesuai. Oleh sebab itu untuk mendapatkan pemanasan yang dibutuhkan dalam waktu yang cepat dibutuhkan peningkatan medan listrik tinggi. Dihasilkan suhu reaktor 900 °C dalam waktu 8 menit iradiasi dengan daya 700 W, sedangkan waktu yang dibutuhkan 15 menit membutuhkan daya 590 W dalam percobaan ini didapatkan.

Ditunjukkan pada tabel 2 adalah laju pemanasan pada interval waktu yang berbeda. Kemiringan regresi linear dari suhu setiap 5 menit iradiasi interval mereka dihitung. Kekuatan microwave dari 590 W dan 700 W, setiap 20 menit kenaikan suhu pemanasan dilaporkan. Laju pemanasan yang lebih rendah diamati, untuk kekuatan yang lebih rendah microwave (135 W dan 444 W) didapatkan hasil yang berbeda. Secara umum iradiasi yaitu 25.99 °C min<sup>-1</sup>, 98,80 °C min<sup>-1</sup>, 98,83 °C min<sup>-1</sup>, dan 120,10 °C min<sup>-1</sup> untuk 135 W, 444 W, 590 W, dan 700 W, masing-masing adalah laju pemanasan tertinggi dicapai dalam 5 menit pertama. Sementara itu pemanasan dihasilkan masing-masing: 0,39 °C min<sup>-1</sup>, 4,28 °C min<sup>-1</sup>, 10,27 °C min<sup>-1</sup>, dan 15,51 °C min<sup>-1</sup> pada interval iradiasi 15-20 menit.

Peneliti ini telah membuat sebuah laporan ((Huang, Kuan et al. 2008) bahwa kenaikan suhu dan penurunan suhu disebabkan karena posisi kedalaman penetrasi terhadap daya microwave. Persamaan 12 (Sutton 1992) dapat ditentukan kedalaman penetrasi daya microwave:

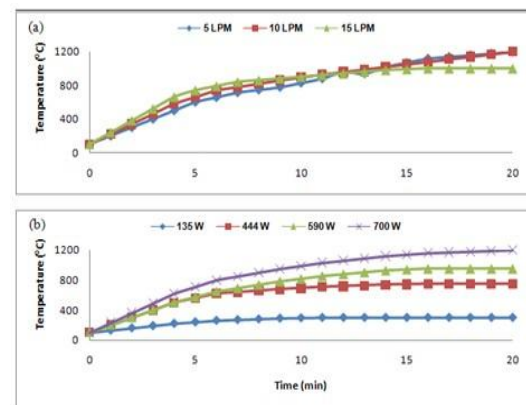
Tabel 2 : Laju pemanasan (°C min<sup>-1</sup>) di bawah daya microwave yang berbeda-beda

Daya microwave (W)	Waktu pencapaian (min)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
50	25.991	4.098	0.618	0.394
380	98.805	15.927	8.174	4.275
540	98.837	32.071	17.013	10.271
700	120.141	50.877	24.334	15.513

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2}\epsilon''} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (12)$$

di mana  $\lambda_0$  adalah panjang gelombang ruang bebas dari radiasi gelombang mikro,  $\epsilon$  dan  $\epsilon''$  adalah nilai-nilai relatif dari faktor konstan dan kerugian dielektrik yang berbeda-beda.

Pengaruh kedalaman penetrasi microwave tergantung pada sifat dielektrik dari bahan susceptor, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (12). Pada frekuensi tetap sifat dielektrik dari kedua nilai relatif konstan dan faktor kehilangan dielektrik tergantung pada suhu yang dibangkitkan. Secara umum, kedua sifat bahan penyerap akan meningkat bila terjadi peningkatan suhu. (Sutton 1992) SiC yang digunakan dalam penelitian ini memiliki faktor kehilangan 1,71 pada suhu kamar pada frekuensi 2,45 GHz, sementara pada 695 °C untuk frekuensi yang sama adalah 27,99. Oleh karena itu, kedalaman penetrasi daya microwave dalam perubahan material selama pemrosesan mempunyai pengaruh yang besar.



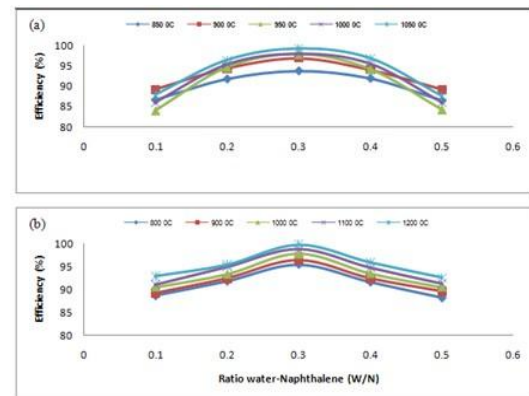
Gambar 4 : profil suhu di dalam reaktor: (a) pengaruh laju alir gas; (b) efek daya microwave

### 3.2. Perbandingan Campuran Optimum Tar-Air

Penghapusan model tar toluena pada perbandingan paling optimum air-tar diperoleh (W/T): 0.3 diperoleh 99,3 (%) pada suhu 1050 °C diperoleh 84,06 (%) dan terendah di 950 °C seperti yang ditunjukkan gambar 5(a). Pada gambar tersebut 0.1 menunjukkan bahwa rasio campuran meningkat mencapai puncak pada 0,3, kemudian mulai turun di 0,4-0,5. Dalam

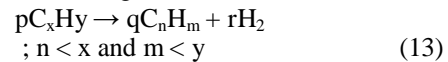
percobaan ini setiap perlakuan dilakukan tiga kali dan diambil harga rata-rata. Untuk mendapatkan hasil yang optimal penghapusan tar dilakukan variasi perbandingan campuran 0,1 sampai 0,5 dengan perlakuan suhu 850-1050 °C. Proses pelaksanaan percobaan dilakukan antara lain sebagai berikut: membuat campuran air-tar ditimbang sebelum pengujian, alat tangkap tar juga timbang, dilakukan pengujian, alat tangkap tar ditimbang setelah pengujian, dan selanjutnya dilakukan perhitungan perbandingan berat sebelum pengujian dibanding dengan setelah pengujian. Perbandingan setelah dan sebelum pengujian dikalikan 100 %, maka kita dapatkan efisiensi penghapusan tar. Dari hasil yang diperoleh dalam pengujian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan: pertama perlakuan tes akan efektif jika kita menggunakan rasio 0,3 pada suhu 1050 °C dan yang kedua perbandingan tersebut dapat jelaskan bahwa campuran senyawa air dan tar memiliki perbandingan stoikiometri sehingga terbentuk ion senyawa baru yang menguntungkan, dan ketiga membuat ion air-tar bebas untuk bergerak membentuk ion baru sehingga dihasilkan konversi gas tar menjadi gas bermanfaat. Pada gambar 5(b) menunjukkan penghapusan model tar naftalen pada perbandingan paling optimum air-tar diperoleh (W/T): 0.3 diperoleh 99,83 (%) pada 1200 °C diperoleh 88,64 dan terendah di 800 °C. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa perbandingan 0,1 penghapusan tar meningkat sampai mencapai puncak pada 0,3, kemudian kemudian di 0,4-0,5. Dalam percobaan ini setiap perlakuan dilakukan tiga kali dan diambil harga rata-rata. Untuk mendapatkan hasil penghapusan tar optimal dilakukan variasi rasio campuran mulai dari 0,1 sampai 0,5 dengan suhu perlakuan 800-1200 °C. Proses pelaksanaan percobaan dilakukan antara lain sebagai berikut: membuat campuran air-tar ditimbang sebelum pengujian, alat tangkap tar juga timbang, dilakukan pengujian, alat tangkap tar ditimbang setelah pengujian, dan selanjutnya dilakukan perhitungan perbandingan berat sebelum pengujian dibanding dengan setelah pengujian. Perbandingan setelah dan sebelum perlakuan pengujian dikalikan 100%, maka kita dapatkan efisiensi penghapusan tar. Ada tiga kesimpulan dari hasil percobaan di atas: pertama perlakuan tes akan efektif jika kita menggunakan rasio 0,3 pada suhu 1200 °C, kedua perbandingan dapat jelaskan bahwa campuran senyawa air dan tar memiliki perbandingan stoikiometri sehingga dihasilkan ion baru yang menguntungkan, dan ketiga membuat ion air-tar lebih bebas untuk bergerak sehingga terjadi konversi tar menjadi gas bermanfaat.

Pada kondisi ini meskipun pembentukan produk gas meningkat pesat terutama H<sub>2</sub>, namun jelaga muncul sebagai produk utama selama pengobatan panas dari naftalena. Percobaan ini muncul jelaga sebagai produk utama selama pengobatan termal dari naftalena. Hasil paling terendah produk kental 9 % dan hasil tertinggi produk jelaga dari sekitar 68 % diperoleh pada 1200 °C ini berdampak pada pembentukan produk gas terutama H<sub>2</sub>. Di bawah ini merupakan reaksi utama selama perlakuan panas model tar (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>).

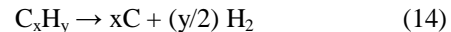


Gambar 5 : Titik optimum perbandingan air-tar untuk penghapusan tar dengan model tar: (a) toluena dan (b) naftalena

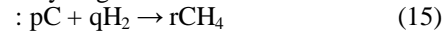
– Cracking reaction:



– Carbon formation:



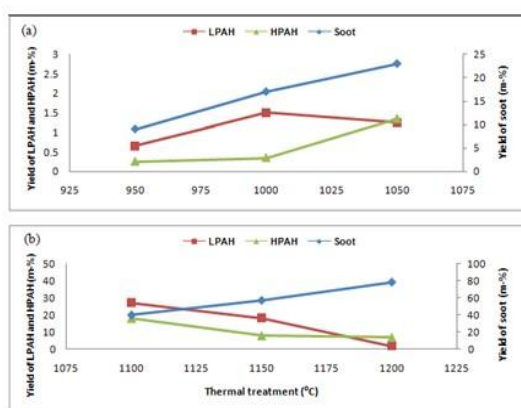
– Hydrogen-carbon reaction



Toluena dan naftalena terlihat dalam gambar 6(a) dan 6(b) adalah spesies tar dan jelaga hasil perlakuan panas dalam reactor. Pada gambar terlihat PAH berat (HPAH kelompok tiga cincin senyawa) untuk menghilangkan toluena dan dihasilkan LPAH naftalena yang berbeda masuk dalam kelompok 2-3 cincin senyawa. Hidrokarbon akan berkembang untuk membentuk PAH dan akhirnya membentuk jelaga pada penghapusan toluena. Proses pembentukan PAH dimulai pada suhu 850 °C sedangkan pembentukan jelaga muncul pada suhu sekitar 950 °C.

Pada gambar 6(a) menunjukkan hasil dari LPAH mencapai hasil maksimum pengaruh dari peningkatan suhu reaksi 1000 °C. Pengaruh peningkatan suhu menghasilkan LPAH menurun dan pembentukan HPAH mempunyai peran terbentuknya polimerisasi yang tinggi. Peran terbentuknya LPAH dan HPAH dalam pembentukan jelaga yang menunjukkan

peningkatan. Pada gambar 6(b) menunjukkan hasil dari LPAH dan HPAH menurun dengan peningkatan suhu pada penghapusan naftalena. Peningkatan terbentuknya jelaga meningkat dengan peningkatan suhu. Naftalena dalam bentuk kinetik dapat diubah menjadi jelaga ini terjadi pada suhu yang sangat tinggi. Hasil jelaga yang merupakan sisa penghapusan pada suhu yang lebih tinggi dari 1200 °C (Jess 1996). Berikut dua mekanisme yang terjadi untuk perlakuan panas tar model (toluena dan naftalena), berdasarkan suhu reaksi dalam aliran N<sub>2</sub> murni yang digunakan dalam penelitian ini: (1) pada suhu reaksi yang relatif lebih rendah, tar model hanya diubah menjadi LAH dan LPAH (1-3 cincin senyawa), gas hidrogen dan hidrokarbon; dan (2) pada suhu reaksi yang relatif lebih tinggi, tar model diubah menjadi hidrogen, gas hidrokarbon, LAH, LPAH, HPAH dan jelaga. Penghapusan toluena dan naftalena dalam penelitian ini memenuhi penambahan hidrogen abstraksi karbon (HACA), dari dua mekanisme metode yang diberikan diusulkan oleh (Frenklach and Wang 1994). (Jess 1996; Namioka, Son et al. 2009) metode ini juga telah diadopsi dalam penelitian lain untuk menentukan skema reaksi konversi panas hidrokarbon aromatik dan biomassa gravimetri tar. Pengaruh waktu tinggal gas perlakuan panas biomassa senyawa tar model. Pada suhu tetap 950 °C untuk toluena dan 1100 °C untuk naftalena percobaan dilakukan dengan waktu tinggal 0-0,7 detik. Efisiensi penghapus toluena dan naftalena meningkat dengan peningkatan waktu tinggal gas (Jess 1996; Fassinou, Van de Steene et al. 2009) didapatkan hasil percobaan perlakuan panas tar seperti yang dilaporkan dalam peneliti lain.



Gambar 6 : Hasil perlakuan panas dari model tar sebagai fungsi suhu: (a) toluena dan (b) naftalena

Namun sebaliknya laju reaksi membatasi penghapusan toluena dan naftalena untuk waktu tinggal pendek. Dari hasil pengamatan didapat efisiensi penghapusan naftalena diperoleh hanya 30 % pada 0,2 detik dan sekitar 68 % pada 0,7

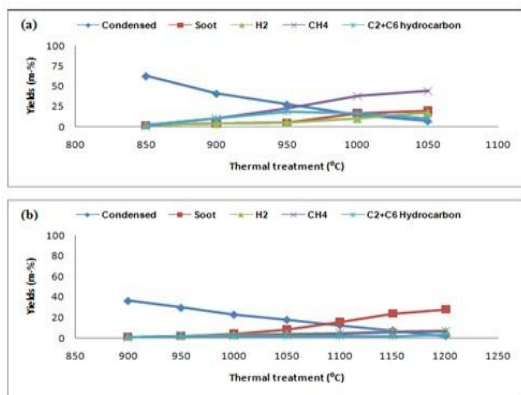
detik sedangkan untuk toluena hanya mencapai 38% pada 0,2 detik dan sekitar 75% pada 0,7 detik. Banyaknya produksi jelaga yang dihasilkan dari naftalena menjadi masalah baru yang harus dipecahkan, meskipun toluena dan naftalena dapat dihilangkan dengan perlakuan panas. (Boroson, Howard et al. 1989; Jess 1996; Zhang 2010) Beberapa cara penyelesaian telah dilakukan untuk mengurangi produksi jelaga. Pertama dengan kinetik dapat menghambat pembentukan jelaga oleh hidrogenasi, pembakaran parsial atau reaksi gasifikasi kering dengan kehadiran H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> atau CO<sub>2</sub>. Kedua dengan mengubah jelaga ke CO dan CO<sub>2</sub> baik melalui gas air reaksi pergeseran atau reaksi gasifikasi karbon dengan penggunaan uap sebagai agen reformasi. Yang ketiga dengan penguraian menjadi gas yang berharga pada suhu yang lebih rendah, dan keempat dengan kombinasi metode ini dan penggunaan katalis di mana jelaga terjebak. Oleh karena itu ketiga cara dipilih dan diuji dalam penelitian ini untuk menghilangkan tar serta jelaga secara bersamaan. Konversi tar menjadi gas berguna ditunjukkan pada gambar 8(a) dari proses penghapusan panas pada suhu tinggi akan mengubah tar menjadi H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>, sehingga akan diperoleh peningkatan nilai pemanasan panas (HHV). Dalam percobaan dilakukan pada suhu 850-1050°C penghapusan panas dimulai dan pengambilan sampel gas untuk dilakukan pengujian pada gas kromatografi (GC). Senyawa H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> meningkat dengan kenaikan suhu, akan terdapat peningkatan kandungan (vol. %), Sementara CO dan CO<sub>2</sub> dengan kenaikan suhu terjadi pengurangan jumlah gas (vol.%). Terjadi peningkatan 72,11 % H<sub>2</sub> dari hasil percobaan dengan perlakuan kenaikan suhu, sedang dihasilkan peningkatan sebesar 36,99 % pada CH<sub>4</sub>. Peningkatan nilai secara keseluruhan dari perlakuan nilai panas pemanasan (HHV) adalah 16,28 % sebesar dari 4,01 sampai 4,79 (MJ Nm<sup>-3</sup>).

### 3.3. Konversi Tar Menjadi Gas Bermanfaat

Pengaruh perlakuan penghapusan panas dan jumlah gas dari konversi tar adalah dengan terbentuknya semua gas bermanfaat yang menjadi ukuran peningkatan nilai pemanasan panas (HHV). Peningkatan kandungan H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> adalah indikasi yang menunjukkan pada suhu tinggi campuran tar-air dapat dengan mudah bergerak dan bereaksi. Sementara penurunan CO dan gas CO<sub>2</sub> menunjukkan ion gas pembentuk menurun. Seperti telah jelas bahwa kenaikan HHV karena pengaruh penambahan panas pada penelitian ini. Gambar 8 (b) menunjukkan proses penghapusan panas tar model naftalena pada suhu tinggi akan mengubah tar menjadi H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>, sehingga

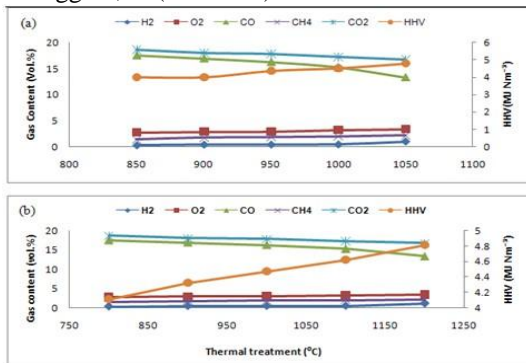


akan diperoleh peningkatan nilai pemanasan panas (HHV). Percobaan ini dilakukan 800-1200 °C dengan penghapusan panas dan pengambil sampel gas untuk dilakukan pengujian pada gas kromatografi (GC).



Gambar 7 : Senyawa Tar yang terkandung dalam produk kental selama pengobatan termal dari model tar sebagai fungsi temperatur: (a) toluena dan (b) naftalena

Senyawa H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> meningkat dengan kenaikan suhu, akan terdapat peningkatan kandungan (vol. %). Sementara CO dan CO<sub>2</sub> dengan kenaikan suhu terdapat penurunan jumlah gas (vol. %). Peningkatan H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> pada percobaan penghapusan dengan panas, secara keseluruhan terjadi peningkatan nilai pemanasan panas (HHV) dari perlakuan panas sebesar 14,55 % dengan nilai terendah 4,11 dan tertinggi 4,81 (MJ Nm<sup>-3</sup>).



Gambar 8 : Konversi tar menjadi gas lain dan kenaikan nilai panas kalor (HHV) dengan tar model: (a) toluena dan (b) naftalena

Dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa peningkatan pengaruh perlakuan panas pada konversi jumlah tar hampir semua terjadi peningkatan nilai senyawa baru terbentuk menjadi gas (HHV). Peningkatan harga H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> adalah sebuah indikasi bahwa pada perlakuan suhu tinggi campuran tar-air dapat dengan mudah bergerak dan bereaksi, sementara penurunan jumlah gas CO dan CO<sub>2</sub> menunjukkan pembentukan gas menurun.

Kenaikan harga HHV karena pengaruh penambahan panas dalam penelitian ini sangat penting.

#### 4. Kesimpulan

Penghapusan tar dengan pemanasan microwave memerlukan energi intensif rendah, cepat, dan efektif. Tinggi bed 120 mm, gas laju alir 10 LPM, dan perlakuan suhu 1200 °C didapatkan dalam waktu 20 menit iradiasi dengan daya 700 W. Perlakuan penghapusan tar model toluena dengan pemanasan 850-1050 °C sedangkan naftalena 800-1200°C. Didapatkan jelaga selama penghapusan dengan pemanasan dengan tar model naftalena. Pengaruh dari penambahan air selama penghapusan tar menunjukkan penghapusan yang tinggi pada suhu permulaan literatur dan mencapai 100% pada suhu maksimal. Perbandingan tar dengan air yang efektif didapatkan pada W/T = 0,3 untuk semua perlakuan panas. Didapat harga H<sub>2</sub> sebesar 72 % dengan penambahan nilai pemanasan panas (HHV) sebesar 15 %.

#### 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 untuk melaksanakan pekerjaan ini.

#### Daftar Pustaka

- Anis, S. and Z. A. Zainal (2011). "Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(5): 2355-2377.
- Bergman, P. C. A., van Paasen, S.V.B., Boerrigter, H. (2003 ). "The novel "OLGA" technology for complete tar removal from biomass producer gas. In: Bridgewater, A.V. (Ed.), *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste*. CPL press, Newbury pp. 347-356.
- Boroson, M. L., J. B. Howard, et al. (1989). "Heterogeneous cracking of wood pyrolysis tars over fresh wood char surfaces." *Energy & Fuels* 3(6): 735-740.
- Fassinou, W. F., L. Van de Steene, et al. (2009). "Pyrolysis of Pinus pinaster in a two-stage gasifier: Influence of processing parameters and thermal cracking of tar." *Fuel Processing Technology* 90(1): 75-90.
- Frenklach, M. and H. Wang (1994). *Detailed Mechanism and Modeling of Soot Particle Formation. Soot Formation in Combustion*. H. Bockhorn, Springer Berlin Heidelberg. 59: 165-192.
- Gao, N., A. Li, et al. (2009). "A novel reforming method for hydrogen production from biomass steam gasification." *Bioresource Technology* 100(18): 4271-4277.
- Hofbauer, H., G. Veronik, et al. (1997). *The FICFB — Gasification Process. Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. A. V.

- Bridgwater and D. G. B. Boocock, Springer Netherlands: 1016-1025.
- Huang, Y. F., W. H. Kuan, et al. (2008). "Total recovery of resources and energy from rice straw using microwave-induced pyrolysis." Bioresource Technology 99(17): 8252-8258.
- Huang, Y. F., W. H. Kuan, et al. (2010). "Hydrogen-rich fuel gas from rice straw via microwave-induced pyrolysis." Bioresource Technology 101(6): 1968-1973.
- J. Tang, F. H., M. (2012). "Microwave barrel reactor use in trimethylolpropane oleate synthesis by *Candida antarctica* lipase in a biphasic non-solvent process."
- Jess, A. (1996). "Mechanisms and kinetics of thermal reactions of aromatic hydrocarbons from pyrolysis of solid fuels." Fuel 75(12): 1441-1448.
- Jones, D. A., T. P. Lelyveld, et al. (2002). "Microwave heating applications in environmental engineering—a review." Resources, Conservation and Recycling 34(2): 75-90.
- Lee, B.-K., K.-R. Jung, et al. (2008). "Development and application of a novel swirl cyclone scrubber—(1) Experimental." Journal of Aerosol Science 39(12): 1079-1088.
- Milne, T. A. and R. J. Evans (1998). "Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion." National Renewable Energy Laboratory.
- Namioka, T., Y.-i. Son, et al. (2009). "Practical Method of Gravimetric Tar Analysis That Takes into Account a Thermal Cracking Reaction Scheme." Energy & Fuels 23(12): 6156-6162.
- Onozaki, M., K. Watanabe, et al. (2006). "Hydrogen production by the partial oxidation and steam reforming of tar from hot coke oven gas." Fuel 85(2): 143-149.
- 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.
- Salema, A. A. and F. N. Ani (2011). "Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass." Bioresource Technology 102(3): 3388-3395.
- 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.
- Sutton, W. H. (1992). "Microwave Processing of Ceramics - An Overview."
- Tao, K., N. Ohta, et al. (2013). "Plasma enhanced catalytic reforming of biomass tar model compound to syngas." Fuel 104(0): 53-57.
- Thostenson, E. T. and T. W. Chou (1999). "Microwave processing: fundamentals and applications." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 30(9): 1055-1071.
- Vivanpatarakij, S. and S. Assabumrungrat (2013). "Thermodynamic analysis of combined unit of biomass gasifier and tar steam reformer for hydrogen production and tar removal." International Journal of Hydrogen Energy 38(10): 3930-3936.
- Wicks, G. G. (1997). "Microwave Technology for Waste Management Applications: Treatment of Discarded Electronic Circuitry (U)." Westinghouse Savannah River Company Savannah River Site Aiken, South Carolina 29808.
- Yin, C. (2012). "Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production." Bioresource Technology 120(0): 273-284.
- Yu, V. B., K. I. Rybakov, et al. (2001). "High-temperature microwave processing of materials." Journal of Physics D: Applied Physics 34(13): R55.
- Zhang, W. (2010). "Automotive fuels from biomass via gasification." Fuel Processing Technology 91(8): 866-876.