



Kajian Ke Atas Sifat Singas Yang Terhasil Dari Biojisim Terhangus Menggunakan Penggas Tiup Turun *Investigation on The Properties of Syngas Produced from Torrefied Biomass Using Downdraft Gasifier*

Open
Access

Nor Afzanizam Samiran¹, Mohammad Nazri Mohd Jaafar², Cheng Tung Chong³, Muhammad Roslan
Rahim², Mazlan Said², Mohd Kamal Ariffin²

¹ Jabatan Teknologi Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Teknologi Kejuruteraan, Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia

² Jabatan Kejuruteraan Aeronautik, Automotif dan Samudera, Sekolah Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Teknologi Malaysia

³ China-UK Low Carbon College, Shanghai Jiao Tong University, China

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 29 September 2019

Received in revised form 15 November 2019

Accepted 18 November 2019

Available online 28 December 2019

Penggas tiup turun merupakan salah satu teknik penggasan yang berpotensi menghasilkan gas yang berupaya menjana kuasa mekanikal dan elektrik. Bahan yang digunakan untuk tujuan penggasan ini datangnya dari biojisim dengan kos yang berpatutan kerana sistem yang digunakan adalah sesuai untuk aplikasi skala kecil. Ciri unik penghasilan tar rendah dalam gas yang dihasilkan oleh penggas tiup turun ini membolehkan penggunaannya dalam enjin atau sistem turbin gas tanpa keperluan proses pembersihan utama. Untuk tujuan meningkatkan kualiti gas yang terhasil proses menghanguskan diperlukan untuk merendahkan kelembapan biojisim serta meningkatkan nilai haba. Kajian semasa menyelidik kualiti singas yang dihasilkan menggunakan penggas tiup turun. Proses penggasan ini membandingkan kualiti singas yang dihasilkan oleh beberapa bahan mentah seperti tempurung kernal sawit (PKS), tandan buah kosong (EFB) dan perikarp biji getah (RSP). Hasil kajian menunjukkan bahawa PKS dan EFB yang terhangus lebih sesuai digunakan dengan penggas tiup turun kerana kualiti singas dan nilai LHV yang diperoleh jauh lebih baik berbanding dengan menggunakan RSP terhangus.

Downdraft gasifier is one of the few techniques of gasification that can produce gas capable of generating mechanical and electrical power. The materials used for gasification come from biomass at a reasonable cost as the system used is ideal for small scale applications. The unique features of low tar production in gas produced by downdraft gasifier enable their use in engine and gas turbine systems without the need for major cleaning processes. For the purpose of improving the quality of the produced gas, the torrefaction process is required to lower the moisture of the biomass and increase the heating value. Current research investigates the quality of syngas produced using a downdraft gasifier. This gasification process compares the quality of syngas produced from several raw materials such as palm kernels (PKS), empty fruit bunches (EFB) and rubber seed pericarps (RSP). The results show that the torrefied PKS and EFB are more suitable for use with downdraft gasifier because the quality of the syngas and the LHV values obtained are better than those using the torrefied RSP.

Keywords:

Penggas tiup turun; tempurung kernal sawit; tandan buah kosong; perikarp biji getah; nilai pemanasan yang rendah

Downdraft gasifier; palm kernels; empty fruit bunches; rubber seed pericarps; low heat values

Copyright © 2019 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

1. Introduction

Tenaga biojisim adalah sumber potensi karbon yang berguna dalam menghasilkan bahan bakar gas. Penukaran biojisim kepada bahan api gas biasanya menggunakan salah satu teknologi penukaran termokimia yang berpotensi dikenali sebagai kaedah penggasan yang melibatkan proses pengoksidaan separa [1-3]. Gas yang mudah terbakar dikenali sebagai gas pengeluar atau gas sintesis (singas) yang dihasilkan melalui proses penggasan mengandungi gas campuran karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂) dan nitrogen (N₂) [4]. Singas yang dihasilkan boleh digunakan secara langsung sebagai bahan api gas untuk penjanaan haba dan elektrik atau proses selanjutnya untuk aplikasi hiliran.

Proses penggasan biasanya menggunakan udara atau stim sebagai medium untuk proses pengoksidaan. Oleh kerana keperluan tenaga tambahan terlibat semasa menggunakan medium stim untuk proses tindak balas pembaharuan stim endotermik, [3], penggasan udara ditiup turun lebih sesuai.

Reaktor penggasan boleh dikelompokkan ke dalam tiga jenis utama iaitu penggas lapisan tetap, penggas lapisan terbendalir dan penggas aliran terikat [5]. Untuk aplikasi skala kecil, penggas lapisan tetap adalah lebih sesuai terutamanya di kawasan pedalaman kerana kos pengumpulan dan pengangkutan adalah mahal buat masa ini [6]. Teknologi yang ada pada penggas lapisan tetap terdiri daripada dua jenis iaitu penggas tiup naik dan penggas tiup turun [2, 5]. Penggunaan penggas tiup turun adalah lebih sesuai untuk aplikasi enjin berbanding penggas tiup naik kerana pengeluaran singas menggunakan kaedah pertama menghasilkan gas rendah tar (0.015-0.05 g m⁻³) berbanding yang kemudian (sehingga 150 g m⁻³) [6, 7, 8].

Reka bentuk penggas tiup turun biasanya dilengkapi dengan mekanisme kerongkong. Menurut Bhavanam dan rakan-rakan [9] kerongkong mengoptimalkan pencampuran gas di kawasan suhu tinggi dan mengakibatkan berlakunya retak tar. Bagaimanapun kerongkong ini tidak begitu sesuai untuk biojisim dengan kandungan lembapan yang agak tinggi (> 25%) [10]. Di samping itu, kaedah penggasan tiup turun ini cenderung menghasilkan gas dengan nilai haba yang rendah berbanding kaedah tiup naik [11].

Proses penghangusan merupakan salah satu kaedah pra-rawatan yang menjanjikan akan meningkatkan biojisim mentah menjadi bahan bakar halus dengan sifat-sifat pemanasan yang lebih tinggi, kandungan karbon yang lebih tinggi dan mudah untuk dihancurkan [12]. Menurut Kuo dan rakan-rakan [3], sifat-sifat biojisim terhangus biasanya dicirikan dengan kelembapan yang lebih rendah, ketumpatan tenaga yang lebih tinggi, kebolehpercayaan yang lebih baik, kereaktifan dan keboleh hancuran berbanding dengan biojisim induknya. Keadaan yang lebih baik menyebabkan nilai dan kualiti biojisim terurai sebagai bahan api jauh lebih tinggi daripada biojisim mentah [3, 12].

Proses penggasan menggunakan biojisim yang tidak dirawat secara meluas telah dikaji dalam kajian terdahulu. Gai dan rakan-rakan [2] menggunakan jerami jagung sebagai bahan bakar untuk reaktor penggas tiup turun. Mereka melaporkan bahawa nilai optimum nisbah setara, ER di mana kualiti singas dan kecekapan penggasan pada nilai tertinggi adalah di antara ER = 0.28 hingga 0.32.

Nilai LHV yang optimum adalah $5.39\text{MJ}/\text{Nm}^3$, hasil gas adalah $2.86\text{ Nm}^3/\text{kg}$, kecekapan pembekuan adalah 73.61% dan kepekatan tar adalah $5\text{ g}/\text{Nm}^3$.

Atnaw dan rakan-rakan [13] pula menjalankan kajian mengenai penggasan ke atas pelepah kelapa sawit (OPF). Keputusan menunjukkan bahawa OPF merupakan bahan api penggas yang berpotensi. Nilai pemanasan purata dan puncak adalah $4.8\text{ MJ}/\text{Nm}^3$ dan $5.5\text{ MJ}/\text{Nm}^3$, dan kecekapan gas sejuk adalah 70.2% pada nisbah kesetaraan optimum $ER = 0.37$. Sementara itu pula, Olgun [10] menggunakan cip kayu dan cengkerang kacang hazel sebagai bahan mentah dan mendapati bahawa $ER = 0.35$ menghasilkan nilai pemanasan tertinggi gas produk bagi kedua-dua biojisim yang dikaji.

Walaupun banyak penyelidikan mengenai biojisim yang tidak dirawat telah dijalankan, biojisim yang dirawat tidak dikaji dengan begitu mendalam terutama ke atas penggas tiup turun. Kuo dan rakan-rakan [3] membandingkan prestasi termodinamik buluh mentah dengan buluh yang dihanguskan pada suhu penyejatan 200°C dan 350°C . Analisis menunjukkan bahawa buluh yang terhangus adalah sesuai untuk peningkatan hasil singas. Semakin tinggi suhu penghangusan, semakin tinggi nilai haba singas yang diperolehi.

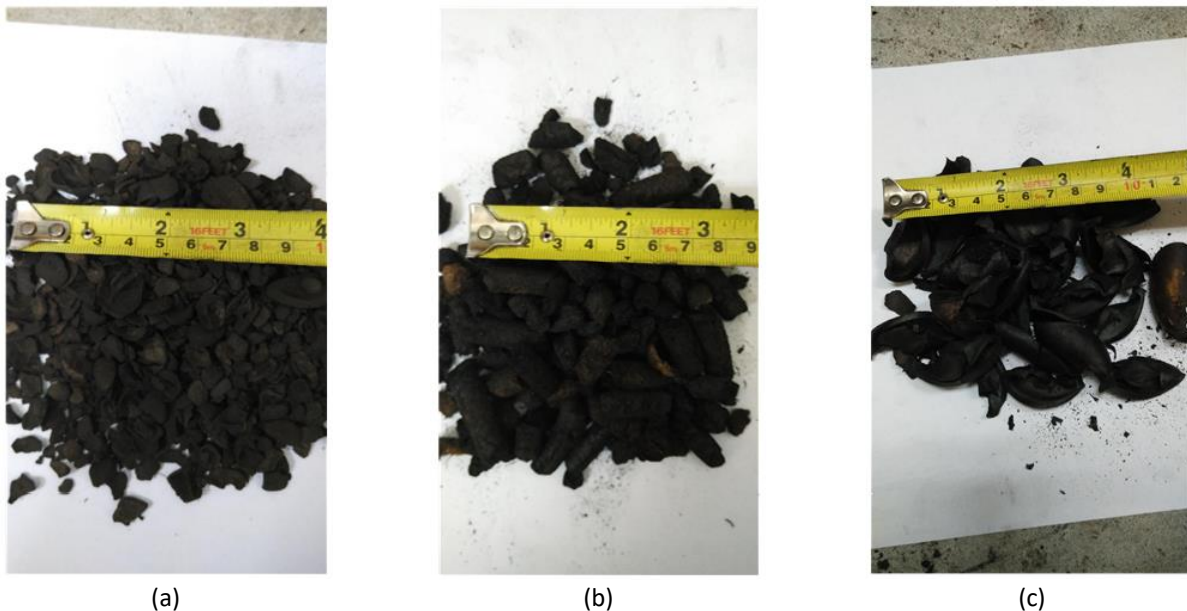
Kulkarni dan rakan-rakan. [14] pula menilai prestasi pain terhangus sebagai bahan mentah penggasan di dalam penggas Lapisan terbendalir skala makmal. Keputusan daripada pain terhangus dibandingkan dengan hasil penggasan pain tak terhangus. Didapati bahawa pengewapan pain terhangus telah menghasilkan arang lebih tinggi nilai haba (lebih daripada dua kali ganda) daripada pain yang tidak dirawat.

Berdasarkan kepada kajian awal yang telah dilaksanakan seperti di atas, dapat diperhatikan bahawa penyelidikan tentang penggasan biojisim terhangus di dalam penggas lapisan tetap tiup turun adalah sangat sedikit. Oleh itu, kajian semasa akan memfokuskan kepada prestasi penggasan bahan mentah biojisim yang terhangus khususnya ke atas sisa sawit. Kajian ujikaji proses penggasan pada kadar aliran udara yang berbeza telah dijalankan. Ciri-ciri gas yang terhasil beserta nilai LHV diukur dan dibandingkan untuk beberapa bahan mentah yang berbeza.

2. Sifat Bahan Biojisim

Jenis bahan mentah biojisim yang berbeza digunakan dalam analisis seperti ditunjukkan dalam Rajah 1 termasuk tempurung kelapa sawit terhangus (T-PKS), tandan buah kosong terhangus (T-EFB) dalam bentuk terpelet dan terhangus serta perikarp biji getah (T-RSP). Semua biojisim diperolehi dalam keadaan mentah dari Syarikat Teknologi DST (Bayan Lepas, Pulau Pinang) dan dihantar untuk proses penghangusan di USM, Nibong Tebal menggunakan mesin penghangusan berterusan. Dalam sistem penghangusan ini, biojisim dipanaskan di dalam relau menggunakan unit pemanas penghantar suapan skru pada suhu sekitar 400°C hingga 500°C . Penghantar suapan skru telah ditetapkan pada kelajuan berputar 1 - 2 putaran per minut untuk proses tindak balas pirolisis homogen, seragam dan berterusan semasa proses pemanasan 3-6 jam [15].

Semua sifat biojisim dicirikan melalui analisis proksimat dan muktamad. Analisis proksimat dilakukan menggunakan analisis Thermogravimetric oleh penganalisis TGA (Perkin Elmer TGA7) untuk mencirikan komposisi karbon tetap, bahan tidak menentu dan kandungan abu. Analisis muktamad dijalankan menggunakan penganalisis unsur atau CHNS / O (Perkin Elmer 2400) untuk mendapatkan komposisi dan unsur kandungan karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O) dan sulfur (S). Jadual 1 menunjukkan hasil analisis proksimat dan muktamad bagi semua jenis biojisim yang digunakan dalam kajian ini.



Rajah 1 Jenis biojisim terhangus yang berbeza: (a) PKS terhangus; (b) EFB terhangus; (c) RSP terhangus

Jadual 1

Analisis proksimat dan muktamad untuk beberapa biojisim yang berlainan

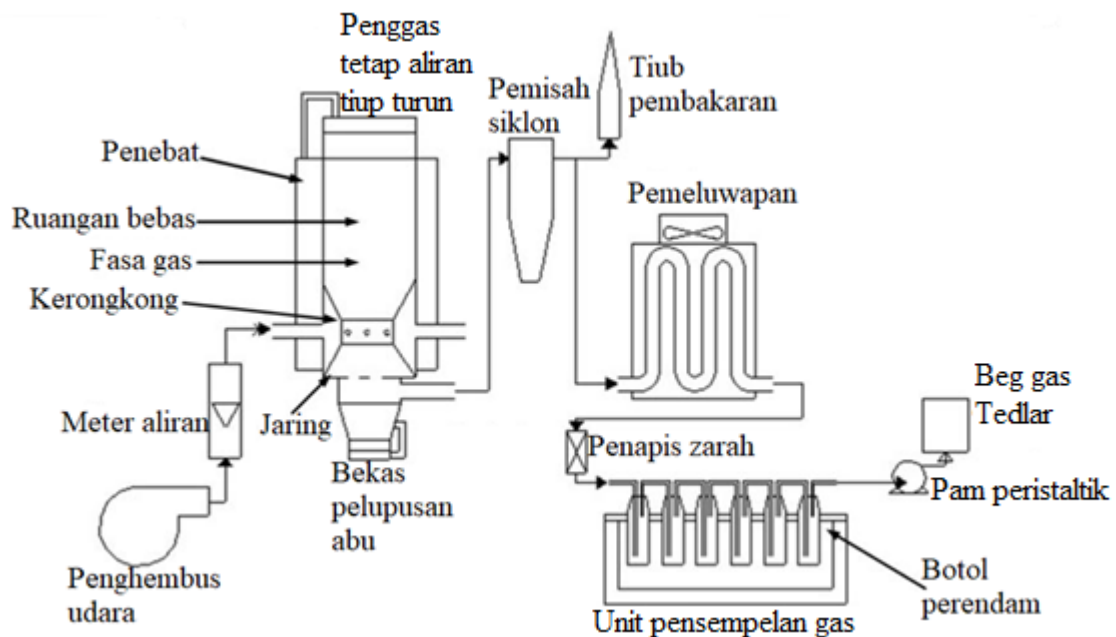
Parameter	Terhangus		
	PKS	EFB	RSP
Kandungan lembapan	2.564	1.258	0.98
Analisis proksimat			
Bahan meruap	45.389	77.914	79.12
Karbon Tetap	49.531	16.946	5.43
Abu	2.616	3.882	3.21
Analisis muktamad			
C	73.77	60.76	65.32
H	4.34	4.11	3.76
N	0.78	1.35	0
S	0.43	0.39	0.45
O	20.68	33.39	30.47
HHV [MJ/kg]	28.70	22.54	24.06

3. Kaedah Ujikaji

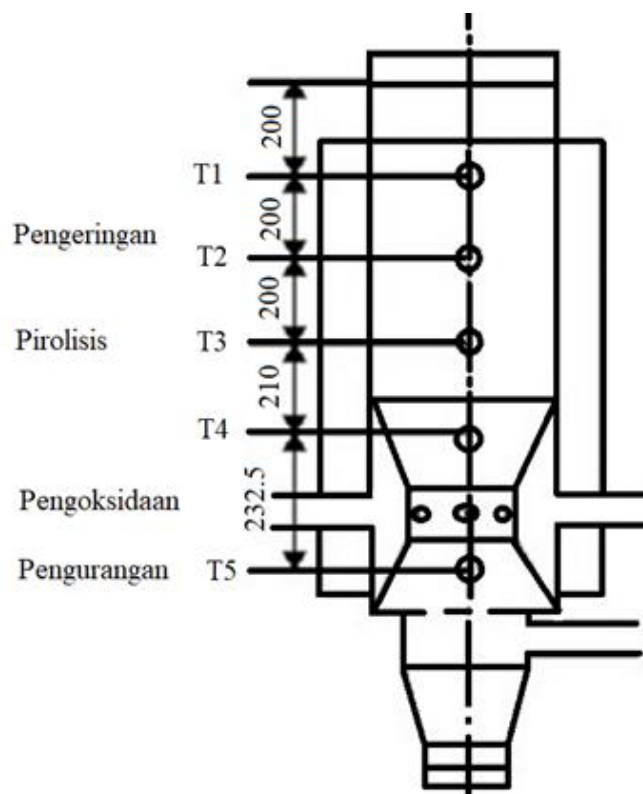
3.1 Reaktor Penggas

Kajian ini dijalankan secara ujikaji makmal menggunakan sistem penggas lapisan tetap tiup turun skala makmal seperti ditunjukkan dalam Rajah 4. Pembakar gas dibina dengan reaktor silinder yang terdiri daripada empat zon tindakbalas dari atas ke bawah iaitu zon pengeringan, pirolisis, pengoksidaan dan pengurangan seperti digambarkan dalam Rajah 2. Diameter dan ketinggian keseluruhan reaktor di zon pengeringan dan pirolisis adalah masing-masing 366 mm dan 810 mm. Penggas ini mempunyai kerongkong di zon pengoksidaan dengan ketinggian dan diameter kerongkong masing-masing 232.5 mm dan 101.6 mm seperti ditunjukkan dalam Rajah 3. Diameter dan ketinggian zon pengurangan ialah 300 mm dan 210 mm. Jejaring besi tuang dipasang di bahagian bawah penggas untuk penyingkiran abu secara berterusan dari penggas. Penggas dioperasikan pada tekanan atmosfera untuk semua ujikaji.

Penggas lapisan tetap tiup turun ini juga dilengkapi dengan pemisah siklon dan bekalan udara. Pemisah siklon digunakan untuk memisahkan abu dan arang yang tercemar dalam gas panas singas yang dihasilkan dari penggas semasa proses penggasan. Arus aliran singas kemudiannya terbahagi kepada dua selepas melepasi unit siklon. Salah satu aliran gas diarahkan ke suar dan aliran lagi satu diekstrak oleh sistem unit pensampelan untuk dikumpulkan dalam beg gas.

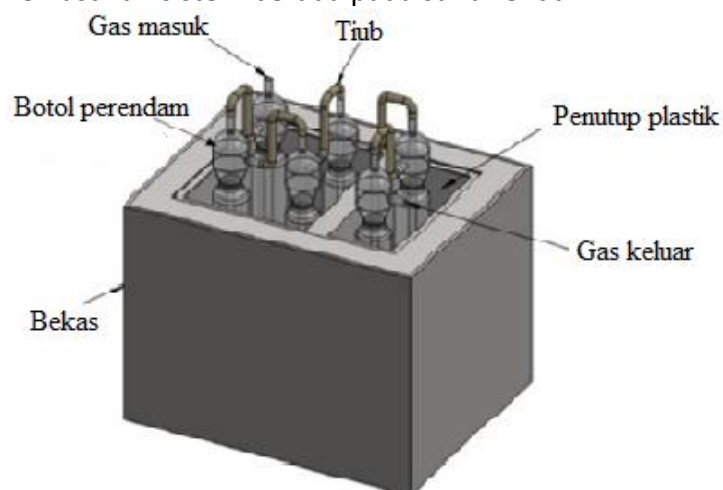


Rajah 2 Skematik pelantar ujian penggas Lapisan tetap tiup turun



Rajah 3 Penggas Lapisan tetap tiup turun (dengan kerongkong)

Sistem pensampelan gas seperti yang digambarkan dalam Rajah 4 melibatkan proses pensampelan gas isokinetik yang terdiri daripada proses penapisan zarah dan penyingkiran tar. Pensantak kaca atau botol yang terdiri daripada deretan pensampelan gas yang ditempatkan di dalam air sejuk untuk memastikan sistem berada pada suhu rendah.



Rajah 4 Sistem deretan pensampelan gas

Pensempel perlukan enam buah botol kaca bersambung secara siri. Botol pertama dibiarkan kosong untuk pengumpul kelembapan. Empat botol seterusnya dipenuhi dengan isopropanol untuk memeluwapkan air dan tar daripada gas yang mengalir dari penggas. Botol terakhir dipenuhi dengan gel silika untuk tujuan mengeluarkan kelembapan atau proses penyahlembapan gas.

Bahagian seterusnya selepas deretan botol-botol ini adalah pam peristaltik yang digunakan untuk mengeluarkan gas dari penggas. Gas yang diekstrak dari penggas melalui deretan pensampelan adalah gas bersih dan dikumpulkan dalam beg pensampelan gas Tedlar. Gas sampel dalam beg ini kemudian dihantar ke makmal untuk dianalisis menggunakan alat kromatografi gas (GC).

3.2 Sistem Pengukuran

Agihan suhu merentasi paksi menegak reaktor diukur menggunakan lima pengganding haba jenis-K seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Semua pengganding haba dipasang dari bahagian atas reaktor merentasi zon pengeringan (T1), zon pirolisis (T2 dan T3), zon pengoksidaan (T4) dan zon pengurangan (T5) pada kedudukan 200 mm, 400 mm, 600 mm, dan 810 mm masing-masing. Pengganding haba telah dimasukkan ke dalam penggas pada jarak bawah 100 mm untuk mengelakkan gangguan ke atas pengagihan biojisim secara rawak di dalam reaktor.

Gas yang bersih, sejuk dan kering telah diambil menggunakan beg pensampelan gas melalui deretan unit pensampelan gas pada jeda 5 minit. Komposisi gas utama seperti H_2 , CO, CO_2 dan CH_4 dianalisis menggunakan alat kromatografi gas (GC-Agilent 7890B) yang dijalankan berdasarkan pengesanan kekonduksian terma (TCD), dipasang dengan empat lajur yang berlainan (Agilent 0.5M 1/8 2mm HayaSep Q 80/100SS, Agilent 6 kaki 1/8 2mm HayaSep Q 80/100, Agilent 3kaki HayaSep Q 80 / 100SS dan Agilent Molsieve 5A 60 / 80SS). Suhu awal ketuhar telah ditetapkan pada 60°C dan secara beransur-ansur ditingkatkan kepada 200°C, dengan persediaan suhu pengesanan hadapan pada 250°C. GC telah ditentukur dengan menggunakan gas penentukuran piawai.

3.3 Langkah Ujikaji

Ujikaji bermula dengan proses memasukkan bahan mentah (biojisim) sebanyak 5 kg ke dalam reaktor penggas. Biojisim yang dimasukkan kemudiannya dinyalakan sama ada menggunakan bahan api pepejal seperti arang batu dan serat biojisim atau dibakar menggunakan gas petroleum cair (LPG) di bahagian kerongkong.

Penghembus dihidupkan untuk membekalkan udara melalui bahagian bawah reaktor dan jumlah udara yang dibekalkan dikawal menggunakan pengawal meter aliran. Pengukuran kemudiannya dilakukan apabila suhu di kerongkong reaktor mencapai 700 - 800°C selepas kira-kira 30 minit. Untuk setiap ujian, kadar aliran udara diselaraskan dengan mengawal injap terbuka pada penghembus udara. Proses penggasan dianggap mencapai keadaan mantap apabila suhu di zon pengoksidaan separa dengan suhu di zon pengurangan adalah malar. Dalam keadaan ini, gas yang dihasilkan kemudian disampelkan dalam unit pensampelan dan taburan suhu direkodkan.

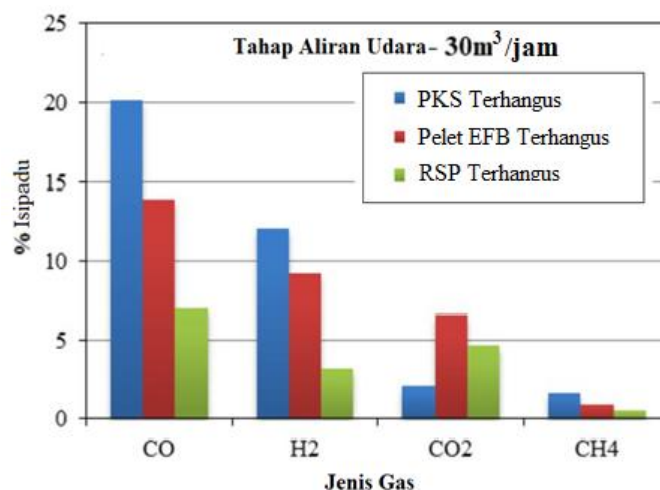
4. Keputusan dan Perbincangan

Kajian perbandingan telah dijalankan untuk mengkaji kualiti singas yang didapati daripada pelbagai jenis biojisim terhangus. Rajah 5 menunjukkan peratusan isipadu bagi komponen utama singas yang dihasilkan oleh PKS, EFB dan RSP terhangus. Kajian dijalankan pada kadar aliran udara 30 dan 40 m³/j.

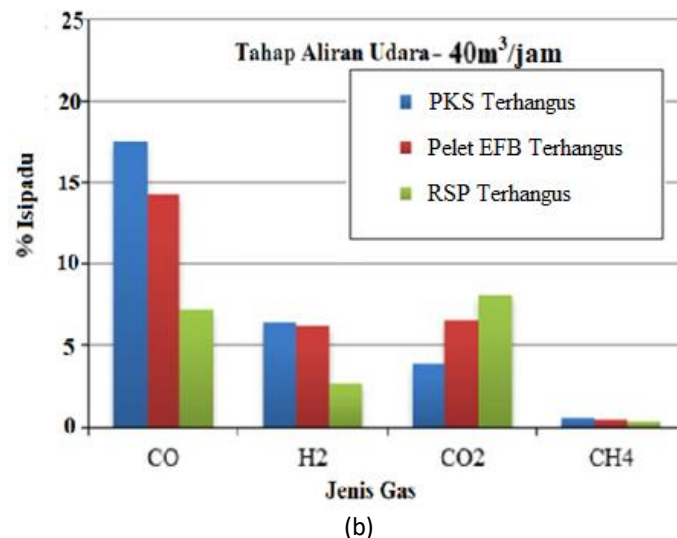
Pada kadar aliran udara 30 m³/j, PKS terhangus didapati menghasilkan komponen reaktif CO, H₂ dan CH₄ tertinggi. Sementara itu gas terhasil dari EFB mengandungi komponen gas lengai tertinggi seperti CO₂ berbanding biojisim yang lain. Perbezaannya dapat dijelaskan dengan membandingkan antara sifat biojisim seperti ditunjukkan dalam Jadual 1 untuk setiap bahan mentah tersebut. Sudah dijangka bahawa kandungan karbon yang tinggi menyebabkan PKS terhangus menghasilkan komponen CO tertinggi di kalangan biojisim yang dikaji.

Walaupun bagaimanapun, RSP terhangus yang mengandungi kandungan karbon yang lebih tinggi menghasilkan komponen CO yang lebih rendah daripada EFB terhangus. Ini mungkin disebabkan oleh perbezaan saiz zarah di antara RSP dengan EFB yang terhangus.

RSP terhangus mempunyai saiz zarah secara purata antara 2 cm hingga 4 cm. Manakala EFB terhangus antara 1 cm hingga 2 cm. Oleh itu, saiz zarah EFB terhangus adalah lebih kecil daripada RSP terhangus. Saiz zarah dan taburan suhu diperhatikan mempunyai pengaruh relatif yang mempengaruhi perbezaan dalam komposisi singas.



(a)



(b)
Rajah 5 Peratusan isipadu ciri gas utama dalam singas dihasilkan oleh PKF, EFB dan RSP terhangus pada kadar aliran: a) 30 m³/j dan b) 40 m³/j

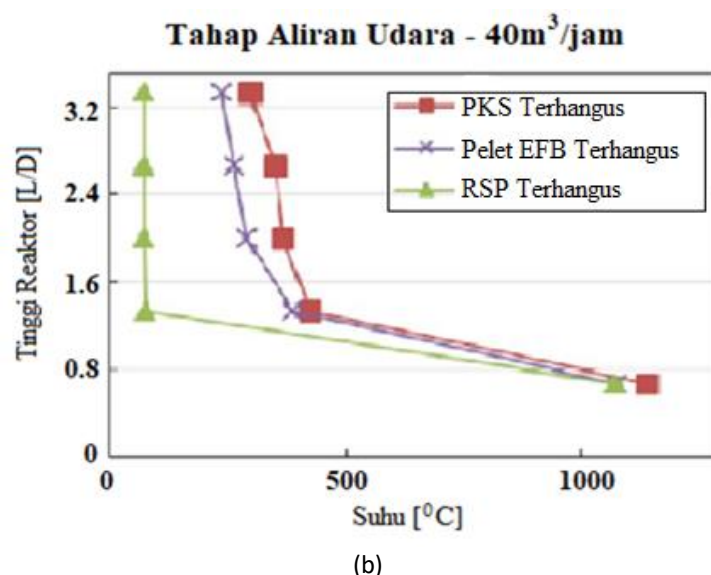
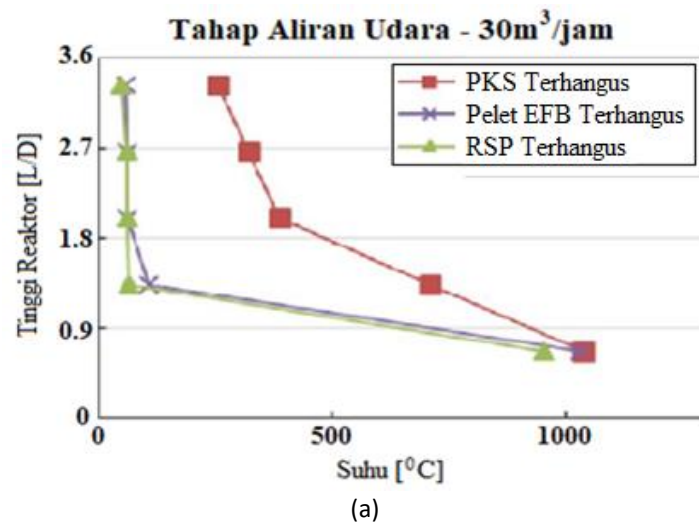
Rajah 6 menunjukkan taburan suhu di sepanjang paksi tegak reaktor. Patel dan rakan-rakan [16] melaporkan bahawa saiz zarah yang lebih besar menghasilkan nilai suhu rendah di kedua-dua zon pembakaran dan pengurangan menggunakan kaedah pengelasan tiup turun yang sama. Peningkatan saiz zarah menyebabkan kawasan permukaan berkurang. Oleh itu, suhu zon pembakaran berkurangan kerana kawasan reaktif terhadap oksigen berkurangan. Proses pengelasan EFB terhangus menghasilkan suhu yang lebih tinggi berbanding RSP terhangus. Ini digambarkan dengan jelas dalam Rajah 6(b). Pengagihan suhu yang lebih tinggi daripada EFB terhangus menyumbang kepada jumlah CO yang lebih tinggi berbanding dengan RSP terhangus [17]. Kesan suhu pada komposisi singas adalah sama seperti yang dinyatakan dalam subseksyen sebelumnya.

PKS terhangus menghasilkan kandungan H₂ tertinggi diikuti oleh EFB dan RSP terhangus. Turutan adalah jelas dengan ketinggian kelembapan (H₂O) dan kandungan H₂ dalam setiap biojisim. Oleh itu, komponen H₂ tertinggi dalam PKS terhangus adalah sama dengan kandungan kelembapan dan hidrogen yang tertinggi berkadar dengan biojisim yang lain.

Untuk komponen CH₄, PKS terhangus menghasilkan komponen tertinggi untuk kedua-dua aliran udara 30 m³/j dan 40m³/j. Bagi PKS, pengeluaran CO lebih cenderung berbanding CH₄ terhadap peningkatan aliran udara. Oleh itu, komponen karbon yang tersedia untuk pengeluaran CH₄ melalui tindak balas metanasi dikurangkan.

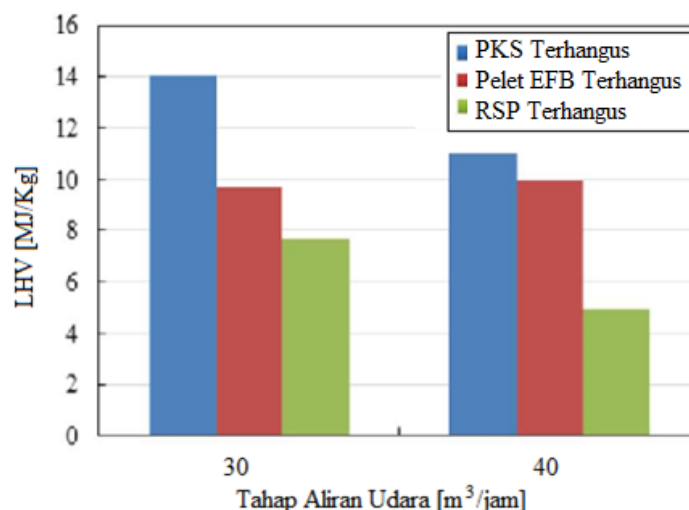
Bagi komponen CO₂ pula, PKS dan RSP terhangus telah meningkat manakala EFB terhangus berkurangan apabila kadar aliran udara meningkat daripada 30 m³/j kepada 40 m³/j. Faktor utama mungkin disebabkan oleh pembahagian komponen karbon antara pengeluaran CO dan CO₂. Pengeluaran CO₂ meningkat apabila menggunakan PKS dan RSP terhangus diganding dengan penurunan pengeluaran CO. Pengeluaran CO₂ meningkat disebabkan peningkatan suhu dalam zon pengoksidaan daripada 30 m³/j hingga 40 m³/j seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6. Suhu tinggi membawa kepada tindak balas CO kepada CO₂ yang lengkap kerana komponen oksigen yang ada meningkat.

Walau bagaimanapun, corak menurun CO dan CO₂ diperhatikan untuk EFB terhangus. Ia mungkin disebabkan oleh peningkatan pesat pembentukan abu utama dari bahan api reaktif apabila menggunakan EFB terhangus. Apabila bahan bakar reaktif dikurangkan, komponen karbon yang ada juga berkurangan dan dengan itu menyekat pembentukan CO dan CO₂. Kesan pencairan oleh kenaikan N₂ dalam aliran juga merupakan faktor pengurangan.



Rajah 6 Taburan suhu reaktor penggasingan PKF, EFB dan RSP terhangus pada kadar aliran udara (a) 30 m³/j dan (b) 40m³/j

Rajah 7 menunjukkan nilai LHV untuk semua biojisim terhangus pada kadar aliran udara sebanyak 30 m³/j hingga 40 m³/j. Pada umumnya, PKS terhangus menghasilkan LHV tertinggi yang mana sesuai dengan kandungan reaktif tertinggi CO dan H₂. LHV bagi kedua-dua PKF dan RSP terhangus berkurangan dengan peningkatan kadar aliran udara. Nilai kadar aliran tinggi udara meningkatkan komponen oksigen yang ada dan dengan itu meningkatkan pengeluaran CO₂. Peningkatan gas lengai CO₂ mengurangkan nilai LHV. EFB terhangus menunjukkan sedikit peningkatan nilai LHV dengan peningkatan nilai kadar aliran udara disebabkan pengurangan komponen CO₂. Sebab pengurangan CO₂ telah dibincangkan sebelum ini.



Rajah 7 Nilai LHV singas dihasilkan daripada PKS, EFB dan RSP terhangus pada kadar aliran udara sebanyak 30 m³/j dan 40 m³/j

5. Kesimpulan

Kajian semasa menyiasat kesan penggasan biojisim terhadap komposisi singas yang berbeza. Beberapa jenis biojisim terhangus termasuk PKS, EFB dan RSP digunakan sebagai bahan mentah untuk proses penggasan dan gas yang dihasilkan telah dibandingkan. Hasilnya menunjukkan bahawa PKF telah menghasilkan komponen reaktif tertinggi CO, H₂ dan CH₄ diikuti oleh EFB dan RSP. Ini menggambarkan bahawa PKF terhangus merupakan calon alternatif terbaik untuk menghasilkan singas berkualiti tinggi berbanding biojisim lain menggunakan kaedah penggasan. LHV singas yang dihasilkan oleh PKS terhangus juga adalah tertinggi, sesuai dengan kandungan reaktif tinggi dalam singas.

Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Malaysia (MOE) dan Universiti Teknologi Malaysia untuk geran penyelidikan (Q.J130000.2509.17H47) serta semua kemudahan makmal dan lain-lain yang tersedia di Sekolah Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia.

Rujukan

- [1] Sheth, Pratik N., and B. V. Babu. "Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier." *Bioresource Technology* 100, no. 12 (2009): 3127-3133.
- [2] Gai, Chao, and Yuping Dong. "Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier." *International Journal of Hydrogen Energy* 37, no. 6 (2012): 4935-4944.
- [3] Kuo, Po-Chih, Wei Wu, and Wei-Hsin Chen. "Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis." *Fuel* 117 (2014): 1231-1241.
- [4] Samiran, Nor Afzanizam, Jo-Han Ng, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Agustin Valera-Medina, and Cheng Tung Chong. "H₂-rich syngas strategy to reduce NO_x and CO emissions and improve stability limits under premixed swirl combustion mode." *International Journal of Hydrogen Energy* 41, no. 42 (2016): 19243-19255.
- [5] Samiran, Nor Afzanizam, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Jo-Han Ng, Su Shiung Lam, and Cheng Tung Chong. "Progress in biomass gasification technique—with focus on Malaysian palm biomass for syngas production." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016): 1047-1062.
- [6] Nisamaneenate, Jurarat, Duangduen Atong, Panchaluck Sornkade, and Viboon Sricharoenchaikul. "Fuel gas production from peanut shell waste using a modular downdraft gasifier with the thermal integrated unit." *Renewable Energy* 79 (2015): 45-50.

- [7] Mandl, C., I. Obernberger, and I. R. Scharler. "Characterisation of fuel bound nitrogen in the gasification process and the staged combustion of producer gas from the updraft gasification of softwood pellets." *Biomass and Bioenergy* 35, no. 11 (2011): 4595-4604.
- [8] Singh, V. Christus Jeya, and S. Joseph Sekhar. "Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock." *Applied Thermal Engineering* 97 (2016): 22-27.
- [9] Bhavanam, Anjireddy, and R. C. Sastry. "Biomass gasification processes in downdraft fixed bed reactors: a review." *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 2, no. 6 (2011): 425.
- [10] Olgun, Hayati, Sibel Ozdogan, and Guzide Yinesor. "Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues." *Biomass and Bioenergy* 35, no. 1 (2011): 572-580.
- [11] Basu, P., and Biomass Gasification. "Pyrolysis and Torrefaction Practical Design and Theory." (2013).
- [12] Tapasvi, Dhruv, Rajesh S. Kempegowda, Khanh-Quang Tran, Øyvind Skreiberg, and Morten Grønli. "A simulation study on the torrefied biomass gasification." *Energy Conversion and Management* 90 (2015): 446-457.
- [13] Atnaw, Samson Mekbib, Shaharin Anwar Sulaiman, and Suzana Yusup. "Syngas production from downdraft gasification of oil palm fronds." *Energy* 61 (2013): 491-501.
- [14] Kulkarni, Avanti, Ryan Baker, Nourredine Abdoumoumine, Sushil Adhikari, and Sushil Bhavnani. "Experimental study of torrefied pine as a gasification fuel using a bubbling fluidized bed gasifier." *Renewable Energy* 93 (2016): 460-468.
- [15] Hamid, M. Fadzli, M. Yusof Idroas, M. Zulfikar Ishak, Z. Alimuddin Zainal Alauddin, M. Azman Miskam, and M. Khalil Abdullah. "An experimental study of briquetting process of torrefied rubber seed kernel and palm oil shell." *BioMed Research International* 2016 (2016).
- [16] Patel, Vimal R., Darshit S. Upadhyay, and Rajesh N. Patel. "Gasification of lignite in a fixed bed reactor: Influence of particle size on performance of downdraft gasifier." *Energy* 78 (2014): 323-332.
- [17] Othman, Mohd Hafizi, Muhammad Roslan Rahim, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Mazlan Said, Norazila Othman, Muhammad Syahiran Abdul Malik, and Anis Athirah Mohd Azli. "Study of Combustion Performance of Syngas from Biomass Waste (Wood Waste) in a Gas Burner." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 60, no. 2 (2019): 247-257.