

KARAKTERISTIK GAS-GAS HASIL PIROLISIS TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT

CHARACTERISTICS OF GASES OF PALM OIL EMPTY FRUIT BUNCHES PYROLYSIS

Agus S Ginting*, Armansyah H Tambunan, dan Radite P A Setiawan

Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga PO.Box 220, Bogor, Indonesia
Email: agus.ginting84@gmail.com

Makalah: Diterima 21 April 2014; Diperbaiki 13 September 2014; Disetujui 20 September 2014

ABSTRACT

Palm empty fruit bunches is about of 23% of total fresh fruit bunches, which are rich in lignocellulosic (cellulose, hemicellulose and lignin) content. The bunches can be converted into flammable gases (H_2 , CO and CH_4) by pyrolysis. The objective of this research was to characterize gases produced from palm empty fruit bunch pyrolysis using a laboratory scale reactor with capacity of 152.9 g. The pyrolysis temperature was set at 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C and 450°C. The results showed an increase in the mass fraction of H_2 and CH_4 gas, but decrease of CO gas, by increasing pyrolysis temperature. The highest caloric value of gas was obtained at temperature of 450°C, which was 6,7682 kJ/g. The result also showed that pyrolysis of empty fruit bunches should be at temperature of 250°C or higher to obtain the flammable gas.

Keywords: empty fruit bunches, pyrolysis, flammable gas

ABSTRAK

Tandan kosong kelapa sawit merupakan 23% dari total tandan buah segar, yang kaya kandungan lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa dan lignin). Tandan kosong kelapa sawit dapat dikonversi menjadi gas mampu bakar (H_2 , CO dan CH_4) melalui pirolisis. Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan karakterisasi gas hasil proses pirolisis tandan kosong kelapa sawit menggunakan reaktor skala laboratorium berkapasitas 152,9 g. Pirolisis dilangsungkan pada suhu 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C dan 450°C. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan fraksi massa pada gas H_2 dan CH_4 , tetapi terjadi penurunan gas CO seiring dengan peningkatan suhu pirolisis. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada suhu 450°C sebesar 6,7682 kJ/g. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa pirolisis tandan kosong kelapa sawit hendaknya dilakukan pada suhu minimal 250°C jika ingin menghasilkan produk berupa gas mampu bakar.

Kata kunci : tandan kosong kelapa sawit, pirolisis, gas mampu bakar

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan adalah penghasil minyak mentah kelapa sawit (*crude palm oil*) terbesar dunia. Minyak mentah diolah dari buah segar kelapa sawit yang terdapat pada tandan buah segar. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Perkebunan tahun 2013 produksi minyak kelapa sawit nasional mencapai 23,5 juta ton. Dari hasil pengolahan tandan buah segar menjadi minyak mentah akan dihasilkan beberapa produk sampingan berupa limbah padat dan juga limbah cair.

Tandan kosong kelapa sawit merupakan salah satu limbah padat yang dihasilkan dalam proses pengolahan tandan buah sawit. Tandan kosong merupakan 23% dari keseluruhan tandan buah segar kelapa sawit. Tandan sawit kaya kandungan lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa dan lignin) (Omar *et al.*, 2011). Kandungan lignoselulosa yang terdapat pada tandan sawit dapat diubah menjadi bahan bakar gas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi.

Berbagai cara dapat digunakan untuk konversi lignoselulosa tandan sawit menjadi bahan

bakar, salah satunya adalah secara termokimia yang menghasilkan bahan bakar dalam bentuk gas. Pengubahan lignoselulosa secara termokimia terdiri dari berbagai macam yaitu pembakaran langsung, gasifikasi, pencairan (*liquefaction*) dan pirolisis. Pada penelitian ini proses perubahan dilakukan dengan cara pirolisis, karena pembakaran langsung tidak menghasilkan gas mampu bakar, sedangkan pirolisis sudah menghasilkan gas mampu bakar pada suhu relatif lebih rendah dibandingkan dengan suhu gasifikasi.

Pirolisis dapat dijelaskan sebagai penguraian kandungan kimia biomassa dengan pemanfaatan panas tanpa adanya campuran oksigen pada suhu sekitar 200°C - 600°C. Produk yang dihasilkan berupa arang, cairan dan gas (Silva *et al.*, 2012). Umumnya gas yang dihasilkan terdiri dari H_2 , CO_2 , CO, CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , gas organik dan uap air (Klass, 1998). Proses pirolisis lignoselulosa biomassa terdiri dari empat tahapan yaitu pelepasan uap air, dekomposisi hemiselulosa, dekomposisi selulosa dan dekomposisi lignin. Dekomposisi hemiselulosa biasanya terjadi pada suhu 220°C - 315°C. Selulosa terdekomposisi pada suhu 315°C - 400°C dan lignin

biasanya terdekomposisi pada suhu 150°C sampai suhu 900°C (Yang *et al.*, 2006).

Penelitian yang dilakukan oleh Imam dan Capadera (2012) menunjukkan bahwa proses pirolisis ilalang (*switchgrass*) menghasilkan gas H₂ dan gas CH₄ yang semakin menurun dengan peningkatan suhu. Hal ini berbanding terbalik dengan gas CO yang justru semakin meningkat. Penelitian tersebut dilakukan pada suhu 400°C, 500°C dan 600 °C sebagai suhu pirolisis. Penelitian menggunakan tandan kosong kelapa sawit juga sudah dilakukan oleh Sukiran *et al.*, 2014 pada suhu 300°C, 400°C, 500°C dan 600°C. Hasil penelitian tersebut mengidentifikasi gas yang dihasilkan berupa CO₂, CO, CH₄, C₂H₆ dan C₂H₄. Persentase gas CO menunjukkan penurunan dengan peningkatan suhu operasi, sedangkan persentase gas CH₄ meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Proses pirolisis menggunakan rumput gajah pada suhu 500°C menghasilkan 5% H₂, 19% CH₄, 38%CO, 2% masing-masing C₂H₄ dan C₂H₆ (Bosong *et al.*, 2012). Penelitian menggunakan *miscanthus* (sejenis alang-alang) yang dilakukan oleh Meligan *et al.* (2011) pada suhu 600°C menghasilkan gas H₂ sebanyak 2%, 28% CO, 20% CH₄, 5% C₂H₄ dan 1,8% C₂H₆. Pirolisis terhadap tongkol jagung dengan suhu reaksi antara 300°C sampai 650°C menunjukkan peningkatan gas CH₄ sampai 39,5% (v/v) seiring dengan peningkatan suhu, sedangkan komposisi gas H₂ dan CO cenderung stabil (Duric *et al.*, 2011).

Pirolisis biomassa dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain komposisi masing-masing komponen lignoselulosa, ukuran, laju pemanasan dan sebagainya. Komposisi ultimat dan proximat akan berpengaruh terhadap produk padatan, cairan dan gas yang dihasilkan (Neves *et al.*, 2011). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui komposisi

produk yang dihasilkan khususnya komposisi gas mampu bakar dari pirolisis tandan kosong kelapa sawit pada berbagai suhu perlakuan.

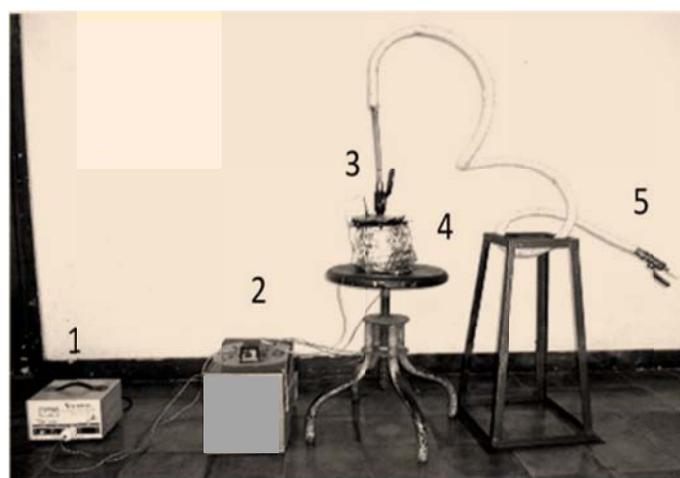
BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit yang diperoleh dari hasil pengolahan tandan buah segar dari pabrik kelapa sawit PTPN VIII Kerta Jaya Banten. Proses pengecilan ukuran secara manual dilakukan agar diperoleh ukuran bahan sebesar 3-4 cm.

Peralatan Eksperimen

Proses pirolisis dilakukan pada reaktor mini berukuran ϕ 12 cm dan tinggi 12 cm dengan rangkaian seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Peralatan pengujian dilengkapi dengan peralatan ukur menggunakan termokopel tipe K dan termostat digital (Omron E5CZ) sebagai pengendali suhu elemen pemanas (*heater*) pada reaktor. Tahapan proses dimulai dengan pemasukan bahan ke dalam reaktor kemudian pengaliran arus listrik ke elemen pemanas. Arus listrik yang diberikan dikendalikan dengan termostat digital sesuai suhu perlakuan. Gas hasil pirolisis mulai ditampung ketika suhu sudah mencapai suhu percobaan dan proses penampungan dilakukan sampai reaktor tidak mengeluarkan gas. Reaktor kemudian dibiarkan sampai mencapai suhu lingkungan dan dilakukan penimbangan sisa padatan dan cairan yang dihasilkan.

Temperatur elemen pemanas diatur pada suhu 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C dan 450°C dengan sistem *batch* untuk masing-masing perlakuan suhu. Bahan yang digunakan untuk masing-masing perlakuan sebanyak 152,9 g disesuaikan dengan kapasitas muat reaktor.



Keterangan :

1. Stabilizer
2. Termostat digital (Omron E5CZ)
3. Thermokopel K
4. Reaktor
5. Kran penyalur gas.

Gambar 1. Rangkaian peralatan pengujian

Proses Pirolisis Pada Reaktor Mini

Produk pirolisis kemudian dianalisis dengan cara penimbangan produk berupa padatan, cairan dan gas. Hasil produk dihitung berdasarkan keseimbangan massa sesuai dengan persamaan (1), (2) dan (3).

$$\% \text{ padatan} = \frac{\text{massa akhir padatan}}{\text{massa total bahan}} \times 100 \% \quad (1)$$

$$\% \text{ cairan} = \frac{\text{massa cairan}}{\text{massa total bahan}} \times 100 \% \quad (2)$$

$$\% \text{ gas} = 100\% - (\% \text{ padatan} + \% \text{ cairan}) \quad (3)$$

Sampel gas sebanyak 2 mL dianalisa dengan peralatan gas *chromatograph* (Shimadzu Type GC-2014). Proses ini dilakukan di laboratorium pencairan batu bara Balai Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) Serpong. Perhitungan massa dan densitas gas yang dihasilkan dilakukan berdasarkan persamaan berikut (4), (5) dan (6).

$$\rho_{total} = \frac{M_{total}}{V_{total}} \quad (4)$$

$$\rho_{total} = \frac{(M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5)}{V_{total}} \quad (5)$$

$$\rho_{total} = \frac{(V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2 + V_3 \rho_3 + V_4 \rho_4 + V_5 \rho_5)}{V_{total}} \quad (3)$$

Dengan ρ_{total} adalah densitas gas yang dihasilkan melalui proses pirolisis. M_1 sampai M_5 adalah massa gas H_2 , CO , CH_4 , CO_2 dan N_2 secara berturut-turut. ρ_1 sampai ρ_5 merupakan densitas gas H_2 , CO , CH_4 , CO_2 dan N_2 secara berturut-turut dan V_{total} menunjukkan volume gas yang dimasukkan ke dalam alat penganalisis.

Analisis Ultimat, Proximat, dan Lignoselulosa

Analisis ultimat untuk mengetahui besarnya persentase karbon, hidrogen, nitrogen, dan oksigen

yang terkandung pada tandan kosong kelapa sawit dilakukan menggunakan alat GCMS Pirolisis Shimadzu tipe GCMS-QP2010. Analisis Proximat untuk mengetahui kadar air, zat terbang (*volatile metter*), karbon tetap dan abu dilakukan dengan menggunakan *termogravimetri analyzer*. Analisis lignoselulosa tandan kosong sawit dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan selulosa menggunakan metode Norman Jenkins, lignin dengan standar TAPPI, T 6 m – 59 (ASTM), hemiselulosa menggunakan standar ASTM 1104-56 dan ASTM 1103-60. Analisis ultimat, proximat dan lignoselulosa dilakukan di laboratorium pengujian hasil hutan Pusat Penelitian dan Pengembangan Keteknikan Kehutanan dan Pengolahan Hasil Hutan Bogor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit

Formula kimia tandan kosong kelapa sawit dapat dinyatakan sebagai $C_nH_xO_yN_z$ dimana n, x, y dan z merupakan fraksi C, H, O dan N berturut-turut. Fraksi mol masing-masing komponen diperoleh berdasarkan perbandingan massa komponen ultimat dibandingkan dengan massa relatif masing-masing komponen. Berdasarkan perhitungan maka diperoleh fraksi mol sebesar 1, 1,52, 0,37 dan 0,03 untuk karbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen berturut-turut. Dari hasil perhitungan tersebut maka diperoleh rumus empiris dari tandan kosong yang digunakan sebagai $CH_{1,52}O_{0,37}N_{0,03}$. Disamping itu karakteristik tandan kosong kelapa sawit juga dapat diketahui berdasarkan analisis proximat. Tabel 1 berikut menunjukkan perbandingan hasil analisis proximat dan ultimat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang digunakan dengan hasil penelitian lainnya yang menggunakan tandan sawit.

Tabel 1. Analisis proximat dan ultimate tandan kosong sawit dan perbandingannya dengan literatur

Kandungan	Sumber data				
	TKKS (*)	A	B	C	D
Proksimat					
Kadar Air , bk (%)	1,70	5,18	8,75	7,95	-
Volatile matter (%)	75,37	82,58	79,67	83,86	81,9
Karbon tetap (%)	17,44	8,97	8,68	10,78	12,6
Abu (%)	7,27	3,45	3,02	5,36	3,11
Ultimat					
	TKKS (*)	A	B	C	D
C (%)	60,4	46,61	48,78	49,07	53,78
H (%)	7,6	6,45	7,33	6,48	4,37
N (%)	2,2	1,21	0,00	0,7	0,35
S (%)	-	0,035	0,08	0,1	0,00
O (%)	29,8	45,66	40,18	38,29	41,5
Nilai Kalor (kJ/g)	18,74	17,02	18,96	17,08	-

A: Muhammed *et al.* (2011); B: Ma dan Yousuf (2005); C: Yang *et al.* (2006); D: Abdulah dan Gerhauser (2008)

* Hasil pengukuran pada penelitian ini

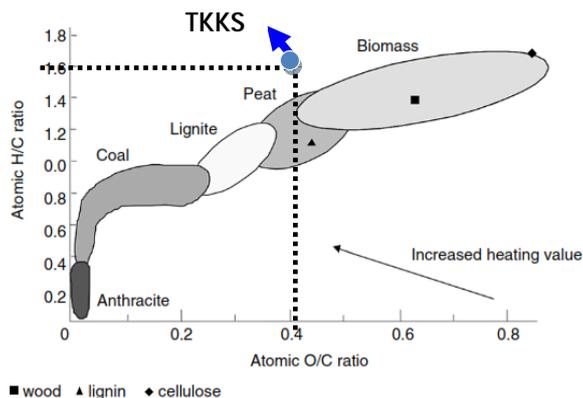
Hasil analisis proximat merupakan indikator terhadap hasil yang dapat diperoleh dari konversi biomassa tersebut menjadi gas mampu bakar. Proporsi karbon tetap (*fixed carbon*) dan zat terbang (*volatile matter*) merupakan dua komponen yang merepresentasikan kandungan energi yang terkandung dalam tandan sawit. Semakin tinggi rasio perbandingan antara zat terbang dengan karbon tetap maka semakin besar energi kimia yang dapat dilepaskan oleh biomassa. Disisi lainnya kuantitas kadar air dan kadar abu merupakan dua komponen yang mempengaruhi kualitas dari bahan bakar (Silva *et al.*, 2012).

Nilai rasio atom berdasarkan komponen ultimat menunjukkan besarnya nilai kalor yang dapat dimanfaatkan dari bahan bakar tertentu. Dari hasil analisis ultimat yang dilakukan pada penelitian ini diperoleh rasio O/C dan H/C tandan kosong kelapa sawit berturut-turut 0,37 dan 1,52. Peneraan nilai tersebut di dalam diagram van Krevelen, seperti pada Gambar 2, menunjukkan bahwa tingkat nilai kalor tandan kosong kelapa sawit relatif tinggi dibandingkan dengan biomassa lainnya.

Hasil analisis lignoselulosa tandan kosong kelapa sawit tercantum pada Tabel 2. Perbandingan terhadap penelitian lain menunjukkan bahwa tandan kosong kelapa sawit yang dibudidayakan di PTPN VIII memiliki kandungan selulosa yang lebih tinggi dan kandungan lignin yang lebih rendah.

Karakteristik Gas-Gas Hasil Pirolisis Tandan Kosong Sawit

Hasil pirolisis tandan kosong kelapa sawit berupa padatan (arang), gas dan cairan pada perlakuan suhu 200 - 450 °C ditunjukkan pada Tabel 3. Porsi terbesar yang dihasilkan dari proses pirolisis tersebut adalah gas (49,33% - 57,79%) diikuti oleh padatan (32,96% - 42,74%) dan cairan (7,14% - 10,80%). Besarnya gas yang dihasilkan disebabkan tingginya kandungan zat terbang yang terkandung pada tandan kosong kelapa sawit (75,37%). Pelepasan zat terbang pada proses pirolisis akan menghasilkan gas mampu bakar. Gas mampu bakar yang dihasilkan sebagian besar adalah H₂, CO, dan CH₄, dengan komposisi yang berubah sesuai dengan suhu pirolisis.



Gambar 2. Rasio hidrogen/karbon dan oksigen/ karbon tandan kosong kelapa sawit pada diagram van Krevelen

Tabel 2. Analisis linognoselulosa tandan kosong kelapa sawit

Komponen	Sumber data			
	TKKS*	A	B	C
Selulosa	56,05	22,24	23,7	38,1-63,0
Hemiselulosa	17,63	20,58	21,6	20,1-35,3
Lignin	5,97	30,45	29,2	10,5-36,6
Komponen lain	20,35	26,73	25,5	-

A: Muhammed *et al.* (2011); B: Law *et al.* (2007); C: Yang *et al.* (2006)

* Hasil pengukuran pada penelitian ini

Tabel 3. Massa hasil pirolisis tandan kosong kelapa sawit

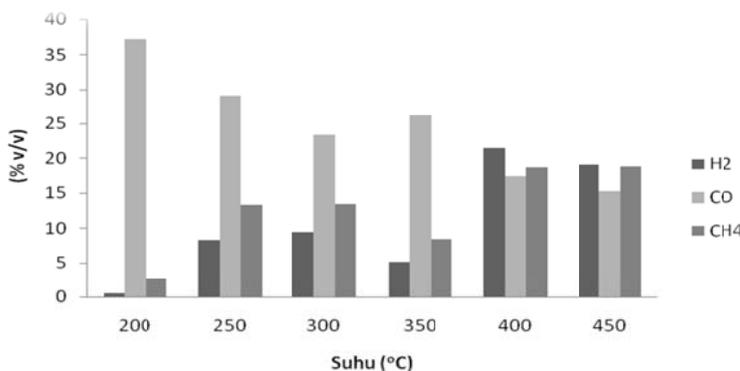
Suhu percobaan (°C)	Padatan (g)	Cairan (g)	Gas (g)
200	60,13	10,92	81,85
250	65,35	11,59	75,96
300	54,49	16,51	81,90
350	62,94	14,53	75,43
400	50,54	23,80	78,56
450	50,39	14,15	88,36

Gambar 3 menunjukkan bahwa komposisi gas H₂ dan CH₄ meningkat seiring dengan peningkatan suhu pirolisis, sementara komposisi gas CO menurun. Tabel 4 menunjukkan massa masing-masing gas yang dihasilkan beserta kandungan energinya. Nilai kalor CO adalah yang terendah dibandingkan nilai kalor H₂ dan CH₄, sehingga peningkatan komposisi H₂ dan CH₄ juga menyebabkan peningkatan nilai kalor gas yang dihasilkan. Persentase nilai kalor yang dikandung oleh gas terhadap nilai kalor TKKS, masing-masing per satuan massa TKKS yang dipirolisis, menunjukkan peningkatan dengan peningkatan suhu pirolisis. Persentase terbesar diperoleh pada suhu pirolisis 450°C, yaitu 36%, yang menyatakan bahwa hanya 36% dari nilai kalor TKKS yang terbawa dalam gas mampu bakar yang dihasilkan. Sekitar 64% dari nilai kalor TKKS tersimpan di dalam padatan dan cairan yang juga dihasilkan selama pirolisis dan di dalam gas-gas yang tidak terdeteksi pada penelitian ini.

Pada proses pirolisis, gas CO dihasilkan pada suhu rendah melalui penguraian komponen hemiselulosa, karena sifat komponen tersebut dapat terurai pada suhu rendah (200°C - 315°C) dan pada proses penguraian tersebut gas yang terbanyak

dilepaskan adalah gas CO. Pelepasan gas H₂ dan CH₄ disebabkan oleh terurainya komponen selulosa dan lignin yang terjadi pada suhu yang lebih tinggi. Selulosa terurai pada suhu 315 - 400°C dan lignin pada suhu 150-900°C.

Hasil perhitungan nilai kalor gas per massa gas hasil pirolisis ditunjukkan pada Tabel 5. Perbandingan terhadap nilai kalor spesifik tandan kosong kelapa sawit menunjukkan bahwa proses pirolisis pada suhu di bawah 250°C menghasilkan nilai kalor gas spesifik yang lebih rendah dari nilai kalor spesifik TKKS. Pada suhu pirolisis 250°C dan lebih tinggi memberi kecenderungan peningkatan nilai kalor spesifik, kecuali pada suhu 350°C yang perlu mendapat kajian lebih lanjut dan pada penelitian ini sementara dianggap sebagai pencilan data. Hal ini berarti bahwa jika proses pirolisis tandan kosong kelapa sawit diharapkan untuk menghasilkan gas mampu bakar, maka sebaiknya dilakukan pada suhu di atas 250°C untuk mendapatkan nilai kalor spesifik gas yang lebih tinggi dari nilai kalor spesifik TKKS. Meskipun demikian, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan suhu pirolisis yang optimum karena peningkatan suhu pirolisis juga memerlukan asupan energi yang lebih tinggi.



Gambar 3. Hubungan antara suhu dan gas mampu bakar yang dihasilkan

Tabel 4. Persentase nilai kalor gas per g biomassa yang dapat dimanfaatkan dari pirolisis tandan sawit

Suhu (°C)	H ₂ (g)	CO (g)	CH ₄ (g)	H ₂ (kJ)	CO (kJ)	CH ₄ (kJ)	Total Nilai Kalor (kJ/g Biomassa)	Nilai kalor TKKS (kJ/g Biomassa)	% Nilai Kalor Terhadap Biomassa
200	0,0002	0,1880	0,0077	0,0235	1,9163	0,3836	2,3234		12,40
250	0,0035	0,1589	0,0428	0,4160	1,6192	2,1422	4,1775		22,29
300	0,0044	0,1413	0,0483	0,5324	1,4399	2,4166	4,3889		23,42
350	0,0021	0,1387	0,0263	0,2496	1,4133	1,3156	2,9785	18,74	15,89
400	0,0109	0,1149	0,0729	1,3175	1,1712	3,6454	6,1340		32,73
450	0,0112	0,1164	0,0846	1,3508	1,1868	4,2307	6,7682		36,12

Tabel 5. Nilai kalor gas yang diperoleh dari hasil pirolisis

Suhu (°C)	H ₂ (g)	CO (g)	CH ₄ (g)	Total gas (g)	Nilai kalor gas (kJ/g gas)
200	0,0002	0,1880	0,0077	0,1959	11,8612
250	0,0035	0,1589	0,0428	0,2052	20,3619
300	0,0044	0,1413	0,0483	0,1940	22,6210
350	0,0021	0,1387	0,0263	0,1670	17,8307
400	0,0109	0,1149	0,0729	0,1987	30,8648
450	0,0112	0,1164	0,0846	0,2122	31,8881

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pirolisis tandan kosong kelapa sawit mempunyai kandungan gas mampu bakar berupa gas H₂, CO dan CH₄. Perlakuan pada suhu rendah (200°C) menunjukkan bahwa nilai kalor gas yang diperoleh dari tiap gram tandan kosong sawit yang dipirolisis hanya 12,40% dari nilai kalor TKKS, dan semakin meningkat seiring peningkatan suhu, hingga mencapai 36,12% pada perlakuan suhu tertinggi (450°C). Nilai kalor spesifik gas yang diperoleh pada suhu pirolisis 200 °C adalah sebesar 11,86 (kJ/g gas) dimana nilai ini lebih kecil nilai kalor tandan kosong kelapa sawit. Suhu pirolisis minimal untuk menghasilkan nilai kalor spesifik gas yang lebih besar dari nilai kalor tandan kosong kelapa sawit adalah pada suhu 250°C yaitu sebesar 20,36 (kJ/g gas).

Saran

Perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk mengetahui fenomena gas yang dihasilkan pada suhu 350°C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan tinggi Republik Indonesia yang sudah mendukung penelitian ini dalam program penelitian Hibah Kompetensi : 035/SP2H/PL/DI.LITABMAS/V/2013 tanggal 13 Mei 2013.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah N dan Gerhauser H. 2008. Bio oil derived from empty fruit bunch. *Fuel*. 87: 2606-2613.
- Basu P. 2010. *Biomass Gasification And Pyrolysis Practical Design*. United States: Academic Press, Elsevier.
- Bosong L, Enchen J, Xiwei X, Qiang Z, Min L, Mingfeng W. 2012. Reforming of biomass pyrolysis gas over bio-char and steam. *Int Conference on Biological and Biomedical Sciences. Advances in Biomedical Engineering*, Vol 9.
- Duric NS, Brankov DS, Kosanic RT, Ceranic BM, Smaragdakis N. 2011. The composition of gaseous products from corn stalk pyrolysis process. Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia.
- Iman T dan Capadera S. 2011. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. *J Analytical Appl Pyroly*. 93, : 170–177.
- Klas DL. 1998. *Biomass for Renewable Energy, Feuls and Chemicals*. United States: Academic Press, Elsevier.
- Law KN, Daud WRW, dan Ghazali A. 2007. Morphological and chemical nature of fiber strands of oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). *Bio Res*. 2 (3): 351-362.
- Ma AN dan Yousof B. 2005. Biomass energy from palm oil industry in Malaysia. *Ingenieur*. 27:18-25.
- Melligan F, Dussan K, Auccaise R, Novotny EH, Leahy JJ, Hayes MHB, Kwapinski.W. 2011. Characterisation of the products from pyrolysis of residues after acid hydrolysis of miscanthus. *Biores Technol*. 108 (2012): 258-263.
- Neves D, Thunman H, Matos A, Tarelho L, Barea AG. 2011. Characterization and prediction of biomass pyrolysis Products. *Progress in Energy and Combustion Sci*. 37: 611-630.
- Omar R, Idris A, Yunus R, Khalid K, Aida Isma. 2011. Characterization of empty fruit bunch for micromave-assisted pyrolysis. *Fuel* 90 : 1536-1544.
- Silva LS, Gonzales DS, Villasenor P, Sanchez J, Valverde L. 2012. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis. *Biores Technol*. 109: 163-172.
- Sukiran AM, Kheang SL, Bakar AN, May YC. 2014. Pyrolysis of empty fruit bunches: Influence of temperature on the yield and composition of gaseous product. *American J Appl Sci*. 11 (4): 606-610.
- Yang H, Yan R, Chen H, Lee D, Liang D, Zhang C. 2006. Pyrolysis of palm oil waste for enhance production of hydrogen rich gas. *Fuel Proces Technol*. 87 : 935-942.
- Yang H, Yan R, Chen H, Lee D, Liang D, Zhang C. 2007. Characteristic of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*. 86: 1781-1788.