

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 4, No. 2, Oktober 2016



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) merupakan publikasi resmi Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA). JTEP terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. Sehubungan dengan banyaknya naskah yang diterima redaksi, maka sejak edisi volume 4 No. 1 tahun 2016 redaksi telah meningkatkan jumlah naskah dari 10 naskah menjadi 15 naskah untuk setiap nomor penerbitan, tentunya dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi *online*. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energy alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam **invited paper** yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, **review** perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, **technical paper** hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta **research methodology** berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang B. Seminar (Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Universitas Sriwijaya, Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta)
Y. Aris Purwanto (Institut Pertanian Bogor)
M. Faiz Syuaib (Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Universitas Hasanuddin, Makassar)
Anom S. Wijaya (Universitas Udayana, Denpasar)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah
Sekretaris : Lenny Saulia
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah
Anggota : Usman Ahmad
Dyah Wulandani
Satyanto K. Saptomo
Slamet Widodo
Liyantono
Sekretaris : Diana Nursolehat

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Darmaga, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 4 No. 2 Oktober 2016. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Thamrin Latief, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Ade M. Kramadibrata, (Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwanto, MS (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Tineke Madang, MS (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Budi Indra Setiawan (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Siswoyo Soekarno, M.Eng (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya), Dr.Ir. Nugroho Triwaskito, MP (Prodi. Ilmu dan Teknologi Pangan, Universitas Muhammadiyah Malang), Dr.Ir. Lady Corrie Ch Emma Lengkey, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. Andasuryani, S.TP, M.Si. (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Yazid Ismi Intara, SP.,M.Si. (Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman), Dr. Ir. Supratomo, DEA (Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr. Suhardi, STP.,MP (Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr.Ir. Desrial, M.Eng (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Lilik Pujantoro, M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Dyah Wulandani, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Leopold O. Nelwan, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Gatot Pramuhadi, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Sugiarto (Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Chusnul Arief, STP., MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Yudi Chadirin, STP.,M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

Karakterisasi Arang dan Gas-gas Hasil Pirolisis Limbah Kelapa Sawit

Characterization of Pyrolysis Char and Gases of Palm Oil Waste

Muhammad Raju, Mahasiswa Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: muhammadraju.raju3@gmail.com

Armansyah Halomoan Tambunan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: ahtambun@yahoo.com

Radite Praeko Agus Setiawan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem,

Institut Pertanian Bogor. Email: iwan_radit@yahoo.com

Abstract

Empty fruit bunch (EFB) and shell of oil palm are potential sources of bioenergy because they contain lignocellulose (cellulose, hemicellulose and lignin) which can be converted to bio-oil (liquid), char, or combustible gases by pyrolysis process. Operating temperature of the pyrolysis process will influence the composition of the liquid, char and gases, as well as its characteristics. The objective of this study is to characterize the pyrolysis product of both empty fruit bunch and shell as affected by the pyrolysis temperature. The experiment was conducted by using a lab scale pyrolysis reactor, specially designed with controllable temperature. The temperature of the pyrolysis process was controlled at 300°C, 400°C, 500°C, and 600°C level, and the product was measured and analysed. The result showed that pyrolysis of shell produced char, liquid and gases at the range of 34.99 - 63.78%, 22.76 - 43.28% and 13.47 - 21.73%, in mass fraction respectively. While pyrolysis of empty fruit bunch produced char, liquid and gases at the range of 30.66 - 64.7%, 16.25 - 29.16% and 18.98 - 44.49%, in mass fraction respectively. Increasing temperature resulted in increasing calorific value of the pyrolysis char from shell and empty fruit bunch in range of 25.64 – 29.60 kJ/g and 24.50 – 27.86 kJ/g, respectively. However, the calorific value of pyrolysis gases was decreasing with the increasing temperature in range of 12.18 kJ/g – 20.05 kJ/g and 11.98 kJ/g – 15.94 kJ/g, respectively. The gas calorific value did not account H₂ gas, which might be the cause of the phenomenon. Shell pyrolysis temperature increasing caused the increasing of CO concentration in range 2.86% - 18.42% while the CH₄ concentration increased at 400°C level afterwards decreased at higher temperature level in range of 0.89% - 2.84%. The increasing of EFB pyrolysis temperature increased CO dan CH₄ concentration in range 3.8% - 15.74% and 0.29% - 0.76%, respectively.

Keywords: *pyrolysis, oil palm shell, empty fruit bunch, char, combustible gas*

Abstrak

Cangkang dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan sumber bioenergi yang potensial karena mengandung lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa dan lignin) sehingga dapat dikonversi menjadi cairan, arang atau gas mampu bakar melalui proses pirolisis. Suhu pengoperasian pada proses pirolisis akan mempengaruhi komposisi cairan, arang dan gas serta karakteristik hasil pirolisis tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkarakterisasi produk pirolisis cangkang dan tandan kelapa sawit yang dipengaruhi oleh suhu pirolisis. Penelitian dilakukan dengan menggunakan reaktor pirolisis skala lab, yang didesain khusus agar suhunya dapat dikendalikan. Suhu pirolisis dikendalikan pada level 300°C, 400°C, 500°C dan 600°C, kemudian hasil pirolisis diukur dan dianalisa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pirolisis cangkang menghasilkan fraksi massa arang, cairan dan gas dalam rentang 34.99 - 63.78%, 22.76 - 43.28% dan 13.47 - 21.73% secara berturut-turut. Sedangkan pirolisis TKKS menghasilkan fraksi massa arang, cairan dan gas dalam rentang 30.66 – 64.76%, 16.25 – 29.16% dan 18.98 – 44.49% secara berturut-turut. Peningkatan suhu menghasilkan peningkatan nilai kalor arang hasil pirolisis cangkang dan TKKS dengan rentang antara 25.64 – 29.60 kJ/g dan 24.50 – 27.86 kJ/g. Tetapi, nilai kalor gas pirolisis menurun seiring dengan peningkatan suhu pirolisis dengan rentang 12.18 kJ/g – 20.05 kJ/g dan 11.98 kJ/g – 15.94 kJ/g untuk pirolisis cangkang dan TKKS. Nilai kalor gas tidak menghitung gas H₂ yang mungkin menyebabkan fenomena tersebut. Peningkatan suhu pirolisis cangkang kelapa sawit mengakibatkan peningkatan konsentrasi gas CO pada rentang 2.8% - 18.42% sementara konsentrasi gas CH₄ meningkat pada suhu 400°C namun menurun kembali dengan rentang 0.89% - 2.84%. Peningkatan suhu pirolisis TKKS meningkatkan konsentrasi gas CO dan CH₄ pada rentang 3.81% - 15.74% dan 0.29% - 0.76%.

Kata Kunci: pirolisis, cangkang kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit, arang, gas mampu bakar

Diterima: 19 November 2015; Disetujui: 13 Mei 2016

Pendahuluan

Biomassa menjadi sumber energi terbarukan untuk mensubstitusi bahan bakar fosil serta mengatasi kerusakan lingkungan. Limbah kelapa sawit merupakan biomassa yang melimpah di Indonesia. Menurut Badan Pusat Statistik produksi kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2014 mencapai 29.34 juta ton. Pengolahan tandan buah segar menghasilkan limbah berupa cangkang (6.7%) dan TKKS (22.5 %).

Cangkang dan TKKS mengandung lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa dan lignin) yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar sebagai sumber energi (Omar *et al.* 2011). Konversi lignoselulosa dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu pembakaran langsung, gasifikasi, liquefaksi, torefaksi dan pirolisis. Pada penelitian ini proses konversi akan dilakukan secara pirolisis karena menghasilkan produk dalam bentuk arang, cairan dan gas yang memiliki fungsi tersendiri. Komposisi produk-produk tersebut dapat dikendalikan dengan menggunakan kendali proses.

Pirolisis adalah 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). Menurut Klass (1998) umumnya gas yang dihasilkan terdiri dari H₂, CO₂, CO, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, gas organik dan uap air. 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).

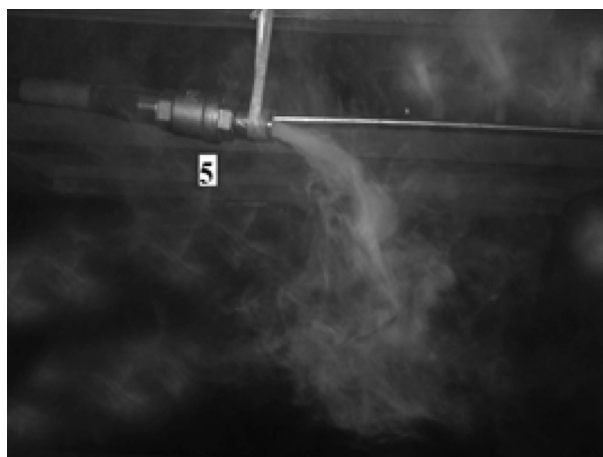
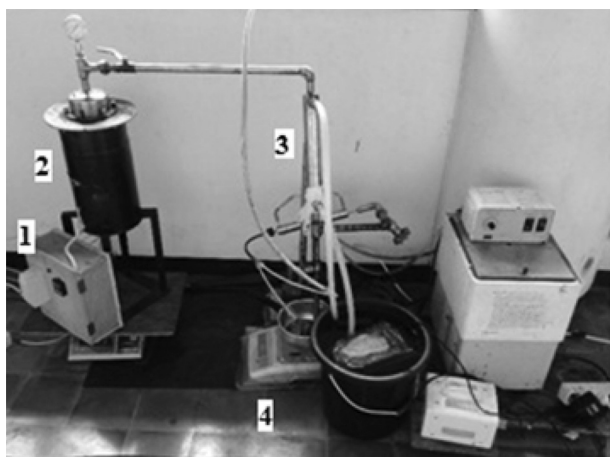
Penelitian yang dilakukan Razuan *et al.* (2010) menunjukkan bahwa proses pirolisis dengan suhu 500°C dan 700°C yang diaplikasikan pada *oil palm stone* dan *palm kernel cake* meningkatkan nilai kalor pada arang seiring dengan peningkatan suhu pirolisis. Konsentrasi gas H₂ meningkat, CH₄ mengalami peningkatan sampai suhu 600°C setelah itu mengalami penurunan sedang gas CO dan CO₂ mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya suhu pirolisis. Penelitian dengan bahan sekam padi dilakukan oleh Park *et al.* (2014). Peningkatan suhu pirolisis meningkatkan jumlah gas namun menurunkan jumlah dan nilai kalor arang yang dihasilkan. Konsentrasi CO dan CO₂ yang terbentuk mengalami penurunan sedangkan H₂ dan CH₄ mengalami peningkatan seiring meningkatnya suhu. Ginting (2014) menggunakan bahan TKKS. Pirolisis dilakukan dengan suhu 200°C – 450°C. Hasil yang diperoleh adalah nilai kalor gas mampu bakar yang terbentuk berupa H₂, CO dan CH₄ meningkat dengan meningkatnya suhu pirolisis.

Hasil pirolisis biomassa dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain jenis bahan (meliputi komposisi komponen serta lignoselulosa), ukuran, suhu, laju pemanasan dan sebagainya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik produk yang dihasilkan khususnya arang dan gas mampu bakar dari pirolisis limbah kelapa sawit pada berbagai perlakuan suhu.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2014 hingga April 2015 di laboratorium Pindah Panas dan Massa, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Analisis laboratorium dilakukan di Laboratorium Pengujian



Gambar 1. Rangkaian peralatan eksperimen.

Keterangan :

1. Panel listrik yang terdiri dari termostat digital (Omron E5CZ), MCB dan solid state relay
2. Reaktor dilengkapi dengan heater
3. Kondensor
4. Timbangan digital dengan sensitivitas 0.01 g
5. Selang pengukuran gas yang dihubungkan dengan alat gas analyzer Merk Lancom 4

Hasil Hutan Pusat Penelitian dan Pengembangan Keteknikan Kehutanan dan Pengolahan Hasil Hutan Bogor dan Laboratorium Ilmu dan Teknologi Pakan, Departemen Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan, Institut Pertanian Bogor.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah cangkang dan TKKS yang diperoleh dari hasil pengolahan tandan buah segar dari pabrik kelapa sawit Kebun Cikasungka PTPN VIII, Cigudeg, Bogor. Proses pengecilan ukuran dilakukan secara manual untuk bahan TKKS agar diperoleh ukuran bahan sebesar 3-4 cm.

Proses pirolisis dilakukan dengan alat pirolisis skala lab berukuran Ø 10 cm dan tinggi 40 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 dan alat gas analyzer Merk Lancom 4 untuk mengukur komposisi gas yang dihasilkan. Peralatan pengujian juga dilengkapi dengan kondensor dengan fluida berupa air dingin 18°C.

Metode

Pirolisis pada biomassa diharapkan dapat meningkatkan densitas energi yang terkandung pada hasilnya karena akan menghasilkan kerja yang lebih baik dibandingkan dengan pembakaran langsung biomassa tersebut. Perbedaan perlakuan suhu pada pirolisis dilakukan untuk mengetahui perlakuan yang lebih baik dalam menghasilkan produk pirolisis yang ingin diprioritaskan untuk dihasilkan.

Pirolisis dilakukan dengan sistem batch. Bahan dimasukkan ke dalam reaktor dan dipanaskan dengan heater pada suhu 300°C, 400°C, 500°C dan 600°C. Bahan yang digunakan pada tiap perlakuan adalah 1000g cangkang sawit dan 300g TKKS. Arus listrik *heater* dikendalikan dengan termostat digital.

Titik pengukuran suhu di dalam reaktor ditunjukkan oleh Gambar 2. Titik T1, T2, T3 dan T4 adalah titik-titik pengukuran suhu di dalam reaktor yang dicatat tiap menit selama proses pirolisis. Titik T1 berada tepat di tengah reaktor (pusat reaktor), titik T2 berada di tengah jari-jari reaktor (0.5R), titik T3 berada 1 cm dari dinding dalam reaktor dan T4 ditempelkan pada dinding dalam reaktor dan merupakan titik dimana suhu pirolisis dikontrol. Dari hasil pencatatan akan diperoleh laju pemanasan tiap titik. Laju pemanasan dan suhu perlakuan akan dikorelasikan dengan hasil pirolisis yang diperoleh.

Reaktor kemudian didiamkan sampai mencapai suhu lingkungan. Produk pirolisis berupa padatan dan cairan ditimbang sedangkan gas dihitung dengan prinsip kesetimbangan massa. Fraksi massa produk dihitung sesuai dengan persamaan (1), (2) dan (3).

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

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

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

Gas pirolisis yang terbentuk diukur dan dicatat secara otomatis pada komputer kemudian dihitung dengan menggunakan rumus integrasi simpson dengan menerapkan prinsip luas kurva yang terbentuk oleh diagram persentase gas, dengan rumus seperti pada persamaan (4).

$$\text{luas kurva} = \frac{h}{3} \left\{ f_0 + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f_{\text{ganjil}} + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f_{\text{genap}} + f_n \right\} \quad (4)$$

h = interval tiap data

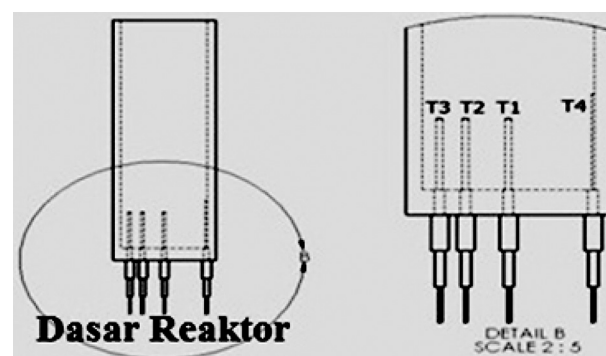
f_0 = data pertama

f_{ganjil} = data ganjil (f_1, f_3, f_5 dst)

f_{genap} = data genap (f_2, f_4, f_6 dst)

f_n = data terakhir

Analisis ultimat untuk mengetahui besarnya persentase karbon, hidrogen, nitrogen, dan oksigen yang terkandung pada cangkang dan TKKS dilakukan menggunakan alat GCMS Pirolisis Shimadzu tipe GCMS-QP2010. Analisis Proksimat untuk mengetahui kadar air, zat terbang (*volatile matter*), karbon tetap dan abu dilakukan dengan menggunakan *termogravimetri analyzer*. Analisis lignoselulosa TKKS 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. Analisis nilai kalor arang dilakukan di Laboratorium Ilmu dan Teknologi Pakan, Departemen Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan, Institut Pertanian Bogor dengan menggunakan alat *bomb calorimeter* Parr 6200.



Gambar 2. Titik pengukuran suhu di dalam reaktor.

Tabel 1. Analisis ultimat dan proksimat cangkang kelapa sawit dan beberapa literatur pembanding.

Kandungan	Hasil Penelitian	Literatur Pembanding			
		A	B	C	D
Analisa Ultimat					
C (%)	68.45	53.78	48.68	49.74	55.82
H (%)	9.52	7.20	4.77	5.32	5.62
N (%)	0.20	0.00	1.17	0.08	0.84
S (%)	0.74	0.51	0.20	0.16	-
O (%)	20.99	36.30	45.27	44.86	37.73
Analisa Proksimat					
Kadar air (%)	3.87	5.73	-	11.00	11.90
Volatile matter (%)	72.34	73.74	73.77	67.20	66.80
Karbon tetap (%)	20.61	18.37	15.15	19.70	17.90
Abu (%)	7.06	2.21	11.08	2.10	3.40
Nilai Kalor (MJ/kg)	19.15	22.14	16.30	-	15.89

^A Sukiran (2008), ^B Idris *et al* (2012), ^C Abnisa *et al* (2011), ^D Lee *et al* (2013).

Tabel 2. Analisis ultimat dan proksimat TKKS dan beberapa literatur pembanding.

Kandungan	Hasil Penelitian	Literatur Pembanding			
		E	F	G	H
Analisa Ultimat					
C (%)	66.17	46.62	48.78	49.07	53.78
H (%)	9.54	6.45	7.33	6.48	4.37
N (%)	1.51	1.21	0.00	0.70	0.35
S (%)	0.06	0.035	0.08	0.10	0.00
O (%)	22.72	45.66	40.18	38.29	41.50
Analisa Proksimat					
Kadar air (%)	2.75	5.18	8.75	7.95	-
Volatile matter (%)	76.09	82.58	79.67	83.86	81.90
Karbon tetap (%)	18.15	8.97	8.68	10.78	12.60
Abu (%)	5.80	3.45	3.02	5.36	3.11
Nilai Kalor (MJ/kg)	18.72	17.02	18.96	17.08	-

^E Mohammed *et al* (2011), ^F Ma and Yousuf (2005), ^G Yang *et al* (2006), ^H Abdulah and Gerhauser (2008).

Tabel 3. Analisis linognoselulosa cangkang dan TKKS.

Komponen	Hasil Penelitian		Literatur Pembanding			
	Cangkang	Tandan	A	B	C	D
Selulosa (%)	37.76	38.94	22.24	23.70	38.10 - 63.00	56.05
Hemiselulosa (%)	21.23	28.21	20.58	21.60	20.10 - 35.30	17.63
Lignin (%)	35.60	22.14	30.45	29.20	10.50 - 36.60	5.97

^A Mohammed *et al* (2011) (tandan), ^B Law *et al* (2007) (tandan), ^C Yang *et al* (2006) (tandan), ^D Ginting (2014) (tandan).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Cangkang dan Tandan Kosong Kelapa Sawit

Perbandingan hasil analisis ultimat, proksimat dan nilai kalor cangkang dan TKKS yang digunakan dalam penelitian ini dengan beberapa penelitian lainnya ditunjukkan oleh Tabel 1 dan 2. Rasio atom O/C dan H/C yang diperoleh dari analisis ultimat dapat digunakan untuk menunjukkan besarnya nilai kalor yang dapat dimanfaatkan dari bahan bakar tertentu. Semakin kecil nilai rasio O/C dan H/C maka nilai kalor yang terkandung di dalam suatu bahan bakar tertentu akan semakin besar,

dan sebaliknya. Dari hasil terlihat bahwa nilai kalor cangkang dan TKKS relatif lebih besar dibandingkan dengan literatur pembanding dikarenakan tingginya persentase atom C yang terkandung di dalamnya.

Kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) dan zat terbang (*volatile matter*) dari analisis proksimat akan berpengaruh pada kandungan energi biomassa. Semakin besar perbandingan antara karbon tetap dan zat terbang, semakin besar pula energi kimia yang dapat dilepaskannya. Sementara itu, kadar air dan kadar abu adalah komponen-komponen yang dapat mempengaruhi kualitas bahan bakar (Silva *et al.* 2012).

Tabel 4. Persamaan regresi linear dan laju pemanasan pirolisis cangkang kelapa sawit.

Suhu pirolisis (°C)	Titik pengukuran	Regresi linear	Laju pemanasan (°C/me
300	T1	$y = 3.923x - 227.0$	$dy = 3.92$
	T2	$y = 1.410x + 106.3$	$dy = 1.41$
	T3	$y = 0.964x + 173.0$	$dy = 0.96$
	T4	$y = 40.43x + 23.27$	$dy = 40.43$
400	T1	$y = 9.988x - 503.8$	$dy = 9.99$
	T2	$y = 3.425x + 59.68$	$dy = 3.43$
	T3	$y = 1.937x + 211.0$	$dy = 1.94$
	T4	$y = 45.18x + 6.897$	$dy = 45.18$
500	T1	$y = 19.32x - 793.3$	$dy = 19.32$
	T2	$y = 6.444x + 54.11$	$dy = 6.44$
	T3	$y = 2.898x + 280.8$	$dy = 2.90$
	T4	$y = 45.60x - 8.885$	$dy = 45.60$
600	T1	$y = 17.30x - 529.2$	$dy = 17.30$
	T2	$y = 11.52x - 0.966$	$dy = 11.52$
	T3	$y = 6.190x + 225.0$	$dy = 6.19$
	T4	$y = 44.60x + 13.80$	$dy = 44.60$

Tabel 5. Persamaan regresi linear dan laju pemanasan pirolisis TKKS.

Suhu pirolisis (°C)	Titik pengukuran	Regresi linear	Laju pemanasan (°C/menit)
300	T1	$y = 9.004x - 16.34$	$dy = 9.00$
	T2	$y = 3.319x + 169.7$	$dy = 3.32$
	T3	$y = 1.790x + 238.6$	$dy = 1.79$
	T4	$y = 48.53x + 25.97$	$dy = 48.53$
400	T1	$y = 25.74x - 160.7$	$dy = 25.74$
	T2	$y = 27.58x - 62.99$	$dy = 27.58$
	T3	$y = 42.90x - 106.6$	$dy = 42.90$
	T4	$y = 55.58x - 2.218$	$dy = 55.58$
500	T1	$y = 38.41x - 142.9$	$dy = 38.41$
	T2	$y = 28.72x - 24.34$	$dy = 28.72$
	T3	$y = 40.04x - 69.89$	$dy = 40.04$
	T4	$y = 52.78x + 20.69$	$dy = 52.78$
600	T1	$y = 42.09x - 247.4$	$dy = 42.09$
	T2	$y = 49.33x - 238.1$	$dy = 49.33$
	T3	$y = 38.01x - 56.30$	$dy = 38.01$
	T4	$y = 48.91x + 23.44$	$dy = 48.91$

Pirolisis Cangkang dan Tandan Kosong Kelapa Sawit

Proses pirolisis telah dilakukan dan berlangsung pada suhu 300°C, 400°C, 500°C dan 600°C dengan menggunakan bahan cangkang dan TKKS. Sumber panas yang digunakan dalam proses pirolisis berasal dari *heater*. Panas dari *heater* listrik mengalir secara konduksi dengan arah horizontal melalui dinding reaktor yang kemudian dialirkan ke biomassa berupa cangkang dan TKKS.

Persamaan regresi linear dan laju pemanasan pirolisis cangkang dan tandan kelapa sawit ditunjukkan oleh Tabel 4 dan 5 pada titik T1, T2 dan T3. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa pirolisis

yang terjadi pada cangkang kelapa sawit secara umum lebih lambat dibandingkan pirolisis TKKS. Hal ini dapat terlihat dari laju pemanasan yang kurang dari 10°C/menit, sementara pada pirolisis TKKS, laju pemanasan yang terjadi diatas 10°C/menit. Perbedaan laju pemanasan yang terjadi bergantung pada karakteristik bahan dan suhu yang diaplikasikan pada bahan.

Laju pemanasan pada pirolisis dan suhu perlakuan dapat mempengaruhi hasil pirolisis. Laju pirolisis yang lebih cepat dan suhu perlakuan yang tinggi akan meningkatkan jumlah cairan dan gas pada hasil pirolisis, sementara laju pirolisis yang lebih lambat dan suhu perlakuan yang rendah akan

Tabel 6. Karakteristik arang hasil pirolisis cangkang kelapa sawit.

Suhu (°C)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Nilai Kalor (kJ/g)
300	4.32	6.07	25.64
400	3.20	7.45	27.96
500	3.66	4.81	29.60
600	1.63	33.86	29.19

meningkatkan jumlah arang.

Terdapat dua fase dalam laju pemanasan yaitu fase pengeringan bahan dan laju pirolisis itu sendiri. Laju pemanasan pada Tabel 4 dan 5 adalah laju pemanasan pada fase pirolisis. Dikarenakan posisi T3 paling dekat dengan sumber panas maka selama fase pengeringan, bahan yang berada di titik T3 mengalami peningkatan suhu lebih tinggi yang berdampak pada penguapan *volatile matter* lebih banyak dibandingkan bahan pada titik T1 dan T2 sehingga pada saat fase pirolisis, laju pemanasan titik T3 lebih rendah dibandingkan yang lain. Sementara pada pirolisis tandan kelapa sawit dengan suhu yang lebih tinggi, laju pemanasan cenderung lebih merata bahkan semakin rata pada suhu yang semakin tinggi. Hal ini dikarenakan karakteristik tandan yang lebih lunak ditandai dengan lebih rendahnya kadar lignin yang terkandung serta porositas yang lebih tinggi sehingga perambatan kalor dari heater semakin mudah.

Karakteristik Hasil Pirolisis Limbah Kelapa Sawit

Fraksi massa dari proses pirolisis cangkang dan TKKS pada kondisi pemanasan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 3. Fraksi massa arang, cairan dan gas hasil pirolisis cangkang kelapa sawit secara berturut-turut adalah 34.99 - 63.78%, 22.76 - 43.28% dan 13.47 - 21.73%. Fraksi massa arang, cairan dan gas hasil pirolisis TKKS secara berturut-turut adalah 30.66 - 64.76%, 16.25 - 29.16% dan 18.98 - 44.49%.

Penggunaan bahan baku yang berbeda serta jenis pirolisis dapat mempengaruhi persentase

Tabel 7. Karakteristik arang hasil pirolisis tandan kelapa sawit.

Suhu (°C)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Nilai Kalor (kJ/g)
300	7.22	6.40	25.63
400	5.45	11.60	26.92
500	5.24	5.25	27.86
600	5.30	13.15	24.50

produksi arang, cairan dan gas pada proses pirolisis tersebut. Gambar 3 menunjukkan bahwa persentase produksi cairan pada pirolisis cangkang lebih banyak daripada persentase produksi cairan pada pirolisis TKKS namun kebalikannya pada persentase produksi gas. Pada persentase produksi arang, pirolisis cangkang menghasilkan arang yang lebih sedikit dibandingkan pirolisis tandan kosong pada suhu 300°C dan 400°C sedangkan pada suhu 500°C dan 600°C terjadi sebaliknya.

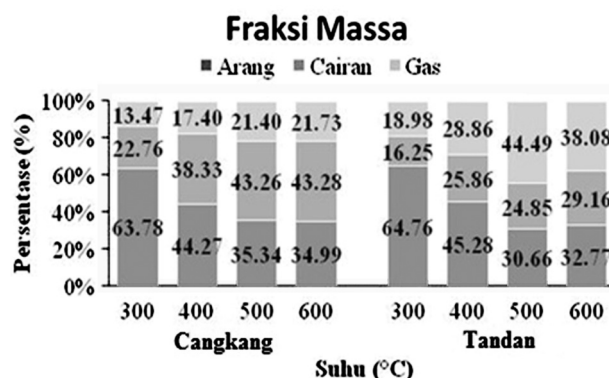
Laju pemanasan yang lebih lambat pada pirolisis cangkang kelapa sawit berdampak pada lebih tingginya persentase arang yang diperoleh dari hasil pirolisis dibandingkan dengan pirolisis TKKS, sementara itu persentase gas TKKS lebih besar dibandingkan persentase gas yang diperoleh pada pirolisis cangkang kelapa sawit.

Peningkatan suhu pirolisis menurunkan persentase produksi arang yang diakibatkan oleh devolatilisasi lanjutan dari volatile matter yang tersisa pada arang. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan Sukiran *et al.* (2009) dan Abnisa *et al.* (2011). Sebaliknya, peningkatan suhu pirolisis meningkatkan produksi cairan dan gas karena adanya penambahan devolatilisasi zat terbang dari arang.

Karakteristik Arang dan Gas-Gas Hasil Pirolisis

Tabel 6 dan 7 menunjukkan karakteristik arang hasil pirolisis cangkang dan TKKS pada kisaran suhu 300°C – 600°C. Peningkatan suhu pirolisis pada cangkang kelapa sawit berdampak pada meningkatnya nilai kalor arang. Hal ini juga berlangsung pada pirolisis tandan kelapa sawit kecuali pada suhu 600°C dimana nilai kalor arang lebih rendah dibandingkan dengan nilai kalor arang pada suhu perlakuan yang lain. Peningkatan nilai kalor arang yang beriringan dengan peningkatan suhu pirolisis dapat diakibatkan karena peningkatan suhu pirolisis meningkatkan penguapan volatile matter sehingga mengakibatkan penurunan kadar air dan menyisakan karbon pada arang sehingga berakibat pada peningkatan nilai kalor arang tersebut. Penurunan nilai kalor arang pada pirolisis TKKS suhu 600°C terjadi karena *volatile matter* yang terkandung mengalami devolatilisasi lanjutan dan lebih banyaknya lignin yang terdekomposisi.

Hasil perhitungan nilai kalor spesifik gas hasil pirolisis cangkang dan tandan kelapa sawit



Gambar 3. Grafik fraksi massa hasil pirolisis cangkang dan TKKS.

Tabel 8. Nilai kalor spesifik gas hasil pirolisis cangkang kelapa sawit.

Suhu (°C)	CO (g)	CH ₄ (g)	CO (kJ)	CH ₄ (kJ)	Total nilai kalor (kJ)	Nilai kalor Cangkang (kJ/g)	Nilai Kalor Gas (kJ/g gas)*
300	3.85	1.28	39.17	63.76	102.92	19.15	20.05
400	24.62	4.94	250.12	246.51	496.63		16.80
500	39.41	3.15	400.43	157.04	557.48		13.10
600	36.07	1.93	366.43	96.26	462.69		12.18

Tabel 9. Nilai kalor spesifik gas hasil pirolisis TKKS.

Suhu (°C)	CO (g)	CH ₄ (g)	CO (kJ)	CH ₄ (kJ)	Total nilai kalor (kJ)	Nilai kalor Cangkang (kJ/g)	Nilai Kalor Gas (kJ/g gas)*
300	2.17	0.37	22.07	18.44	40.50	18.71	15.94
400	3.59	0.25	36.49	12.59	49.08		12.77
500	8.14	0.87	82.68	43.53	126.21		14.01
600	17.98	0.87	182.69	43.15	225.84		11.98

ditunjukkan oleh Tabel 8 dan 9. Dari nilai kalor spesifik gas yang diperoleh, hanya pirolisis cangkang kelapa sawit pada suhu 300°C yang melebihi nilai kalor biomassa yang digunakan, sedangkan pada perlakuan lainnya tidak ada nilai kalor spesifik gas yang melebihi nilai kalor biomassa. Hal ini disebabkan karena gas H₂ yang tidak terukur sehingga nilai kalor spesifik gas yang dihitung bukan nilai kalor spesifik gas yang sebenarnya. Hasil penelitian Ginting (2014) menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis TKKS meningkatkan konsentrasi gas H₂ dengan rentang 0.5% - 21.46% sehingga diasumsikan bahwa nilai kalor spesifik gas akan lebih tinggi dibandingkan nilai kalor biomassa yang digunakan. Pelepasan gas H₂ sendiri disebabkan oleh terurainya komponen selulosa dan lignin yang terjadi pada suhu yang lebih tinggi. Selulosa terurai pada suhu 315°C – 400°C dan lignin pada suhu 150°C – 900°C (Basu, 2010). Peningkatan suhu pirolisis cangkang kelapa sawit mengakibatkan peningkatan konsentrasi gas CO pada rentang 2.86% - 18.42% sementara konsentrasi gas CH₄ meningkat pada suhu 400°C namun menurun kembali dengan rentang 0.89% - 2.84%. Peningkatan suhu pirolisis TKKS meningkatkan konsentrasi gas CO dan CH₄ pada rentang 3.81% - 15.74% dan 0.29% - 0.76%.

Simpulan

Pirolisis cangkang menghasilkan fraksi massa arang, cairan dan gas pada rentang 34.99 - 63.78%, 22.76 - 43.28% dan 13.47 - 21.73%. Pirolisis TKKS menghasilkan fraksi massa arang, cairan dan gas pada rentang 30.66 - 64.76%, 16.25 - 29.16% dan 18.98 - 44.49%. Peningkatan suhu pirolisis pada cangkang dan TKKS mengakibatkan peningkatan nilai kalor arang yang dihasilkan kecuali pada pirolisis TKKS pada suhu 600°C yaitu dengan kisaran antara 25.64 – 29.60 kJ/g untuk cangkang

kelapa sawit dan 24.50 – 27.86 kJ/g untuk TKKS. Sementara itu nilai kalor spesifik gas mengalami penurunan seiring peningkatan suhu pirolisis yang diakibatkan tidak terukurnya gas H₂ yang dihasilkan proses pirolisis cangkang dan TKKS dengan rentang 12.18 – 20.05 kJ/ g gas dan 11.98 – 15.94 kJ/ g gas untuk pirolisis cangkang dan TKKS secara berturut-turut. Berdasarkan nilai kalor spesifik hasil pirolisis untuk menghasilkan arang maka suhu pirolisis terbaik untuk cangkang dan TKKS adalah 500°C, sedangkan untuk menghasilkan gas suhu pirolisis terbaik untuk cangkang dan tandan kelapa sawit adalah 300°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 : 074/ IT3.11/LT/2014 tanggal 2 Juni 2014.

Daftar Pustaka

- Abdullah, N. dan H. Gerhauser. 2008. Bio-oil derived from empty fruit bunches. *Fuel* Vol. 87:2606–2613.
- Abnisa, F., W.M.A.W. Daud, W.N.W. Husin dan J.N. Sahu. 2011. Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass and Bioenergy* Vol. 35(5):1863–1872.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design*. Elsevier. Oxford
- Ginting, A.S. 2014. Rancang bangun dan analisis termodinamis kompor gasifikasi dengan bahan bakar tandan kosong kelapa sawit. (Tesis). Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB. Bogor.

- Idris, S.S., N.A. Rahman dan K. Ismail. 2012. Bioresource technology combustion characteristics of malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). Bioresource Technology Vol. 123:581–591.
- Klass, D.L. 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Elsevier. California.
- Law, K.N., W.R.W. Daud dan A. Ghazali. 2007. Morphological and chemical nature of fiber strands of oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). Bioresources Vol. 2(3):351-362.
- Lee, Y., J. Park, C. Ryu, K.S. Gang, W. Yang, Y. Park dan S. Hyun. 2013. Bioresource technology comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. Bioresource Technology Vol. 148:196–201.
- Ma, A.N. dan B. Yousuf. 2005. Biomass energy from palm oil industry in malaysia. Ingenieur Vol. 27:18-25.
- Mohammed, M.A.A., A. Salmiaton, W.A.K.G.W. Azlina dan M.S.M. Amran. 2012. Bioresource technology gasification of oil palm empty fruit bunches : A characterization and kinetic study. Bioresource Technology Vol. 110:628–636.
- Omar, R., A. Idris, R. Yunus, K. Khalid dan M.I.A. Isma. 2011. Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis. Fuel Vol. 90(4):1536–1544.
- Razuan, R., Q. Chen, X. Zhang, V. Sharifib dan J. Swithenbank. 2010. Pyrolysis and combustion of oil palm stone and palm kernel cake in fixed-bed reactors. Bioresource Technology Vol. 101(12):4622–4629.
- Silva, L.S., D.S. Gonzales, P. Villasenor, J. Sanchez, L. Valverde. 2012. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis. Bioresource Technology Vol. 109:163-172.
- Sukiran, M.A. 2008. Pyrolysis of empty oil palm fruit bunch using the quartz fluidized-fixed bed reactor. (Tesis). University of Malaya. Kuala Lumpur.
- Sukiran, M.A., C.M. Chin dan N.K.A. Bakar. 2009. Bio-oils from pyrolysis of oil palm empty fruit bunches. American Journal of Applied Sciences Vol. 6(6):869–875.
- Yang, H., R. Yan, H. Chen, D.H. Lee, D.T. Liang dan C. Zheng. 2006. Pyrolysis of palm oil wastes for enhanced production of hydrogen rich gases. Fuel Processing Technology Vol. 87:935–942.