

DESAIN DAN PENGUJIAN KINERJA KOMPOR GASIFIKASI-PIROLISIS

Design and Performance Testing of Gasification – Pyrolysis Stove

Johanis R. Pangala^a, Armansyah H. Tambunan^b, Hariadi Kartodihardjo^c, Gustan Pari^d

^a Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Sekolah Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor – johnpangala.dsm@gmail.com

^b Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor

^c Departemen Manajemen Kehutanan Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor

^d Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Bogor

Abstract. This paper deals with the design and performance test of pyrolysis burning stoves that produce energy for cooking and biochar. The stove consists of two section chambers, namely combustion chamber that produces activation heat for pyrolysis process and energy for cooking, and pyrolysis chamber that produces biochar and volatile matter (syngas and tar in gas form). Volatile matter product was introduced to the combustion chamber in addition to the biomass there and replaces biomass fuel gradually to produce energy for cooking and keeping the continuous pyrolysis process (autothermal). Methode used for performance test: direct observations/measurements and Water Boiling Test (WBT). Result of performance test: the autothermal process was going well until resulting a 100% biochar for most of the biomass used. Thermal efficiency of the stove was 11.3% (before pyrolysis) and 14.72% (after pyrolysis), excluding heat to produce biochar. Time needed to boil a 5 L water was 12 minutes before pyrolysis and 6 minutes after pyrolysis. Output power ranges from 9.60 kW to 23.16 kW. The maximum temperature reached 868 °C at the pan and 860°C in combustion chamber. Input biomass capacity depending on the type of feedstock ranging from 1200 - 3000 g/process, resulting in 507-900 g biochar/process, to give biochar ratio to raw materials from 23.0% to 44.8%. All maximum conditions occurs when volatile matters produced from pyrolysis process were burned, which showed that burning volatile matters is better than burning solid biomass directly. The amount of biochar produced by this stove was three times higher compared to anila stove, with less of smoke during the biochar production.

Keywords: autothermal, biochar, biomass, gasifikasi-pirolisis stove, pyrolysis

(Diterima: 16-12-2015; Disetujui: 09-02-2016)

1. Pendahuluan

Aplikasi penggunaan kompor biomassa akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan perpindahan panas secara signifikan. Peningkatan efisiensi ini berarti mengurangi juga polusi asap yang berbahaya bagi kesehatan dan penggunaan jumlah bahan bakar biomassa juga akan berkurang. pengurangan penggunaan bahan bakar berarti mengurangi waktu/biaya mencari/membeli bahan bakar tersebut. Karena itu peningkatan efisiensi kompor dengan pendekatan keteknikan merupakan salah satu tujuan paling penting dalam desain kompor biomassa. Peningkatan efisiensi juga dapat dilakukan dengan penggunaan panas yang terbuang ke lingkungan untuk fungsi lain.

Kompor tradisional yang sering disebut juga kompor tiga batu (*three stone stove*) hanya memiliki efisiensi 5-10%, dan dengan sedikit sentuhan keteknikan dapat ditingkatkan efisiensinya dua hingga tiga kali lipat (Barnes *et al.* 1994). Karena itu berbagai desain kompor biomassa dengan sentuhan keteknikan telah dikembangkan dengan efisiensi yang baik seperti:

kompor roket atau *rocket stove*, kompor TLUD/TLUD stove (ARC 2012), Kompor Gama (Febriansyah *et al.* 2014), Kompor UB (Yuswansyah 2013), Kompor Sekam Padi (Alatas *et al.* 2008), kompor anila atau *anila stove* (Iliffe 2009) dan lain-lain. Berbagai jenis dan tipe kompor biomassa yang dikembangkan dengan prinsip-prinsip keteknikan dapat dilihat pada Roth (2011).

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kompor gasifikasi-pirolisis yang dapat menghasilkan *biochar* dan energi dengan cara yang efisien dan ramah lingkungan, serta memperbaiki output kompor anila (seperti disarankan oleh penelitian sebelumnya, Iliffe 2009). Jika dapat dihasilkan energi terbarukan yang ramah lingkungan dan *biochar* dalam jumlah yang cukup signifikan dengan sebuah kompor gasifikasi pirolisis, akan memberikan sumbangan yang nyata bagi pemenuhan energi (rumah tangga), pertanian (pangan) dan lingkungan (reduksi gas rumah kaca/GRK), akan memberikan multi manfaat (Woolfet *et al.* 2010, McElligott *et al.* 2011, Kauffman *et al.* 2012). Penggunaan *biochar* di bidang pertanian (sebagai media tanam,

Steiner dan Harttung 2014, Zhang *et al.* 2013; sebagai pembenah tanah, Xie *et al.* 2015, Zheng *et al.* 2010, Jeffery 2011, Steiner *et al.*) terbukti memberikan hasil yang positif. Selain itu penggunaan *biochar* dapat juga sebagai bahan bakar (*biocoal*), pembuatan arang aktif, pemicu pembakaran dalam kompor biomassa, sistem gasifikasi dan lain-lain. Penggunaan *biochar* sebagai media tanam dan pembenah tanah maka *biochar* juga berfungsi sebagai penyimpan karbon *carbon sequestration* (Xie *et al.* 2015, Lehmann dan Joseph 2009, Miles 2009, Lehmann *et al.* 2006), yang dapat menjadi salah satu solusi masalah pemanasan global yang diakibatkan oleh peningkatan emisi gas rumah kaca GRK (AIGore 2009, Woolf *et al.* 2010). Dengan demikian permasalahan yang perlu dijawab adalah bagaimana menghasilkan *biochar* dengan mudah dan efisien serta ramah lingkungan. Dalam skala rumah tangga khususnya di pedesaan, penggunaan kompor gasifikasi-pirolisis dapat menjadi salah satu solusi yang baik.

Berbeda dengan beberapa kompor pirolisis yang telah ada, kompor gasifikasi-pirolisis ini didesain berdasarkan prinsip-prinsip kompor anila yang dapat menghasilkan *biochar* dan kompor roket yang efisien menghasilkan energi untuk memasak. Beberapa pengujian yang dilakukan pada kompor anila dalam memproduksi *biochar* sekaligus menghasilkan energi untuk memasak masih menghasilkan beberapa masalah.

Ditemukan juga sejumlah permasalahan penting saat dilakukan rekonstruksi desain kompor anila sebelum penelitian ini dilakukan, (tidak dipublikasikan), seperti kebutuhan bahan bakar yang cukup besar untuk menghasilkan *biochar* dan kesulitan menghasilkan kualitas 100% *biochar*. Terjadi proses *autothermal* (kondisi dimana gas hasil dari ruang pirolisis terbakar menghasilkan energi untuk memasak dan juga mempertahankan berlangsungnya proses pirolisis), tetapi proses *autothermal* ini belum mampu untuk mengkonversi semua biomassa dalam ruang pirolisis menjadi *biochar*. Oleh sebab itu dibutuhkan bahan bakar tambahan dalam jumlah yang cukup signifikan pada ruang pembakaran untuk mencapai hasil ini, dan waktu yang diperlukan juga relatif lebih lama. Permasalahan lain yang ditemukan adalah sistem aliran udara kompor anila kadang tertutup oleh abu hasil pembakaran bahan bakar yang menyebabkan nyala api padam atau kecil dan berasap. Jumlah *biochar* yang dihasilkan menurut pengujian yang dilakukan oleh Iliffe (2009) hanya sekitar 175 g/proses atau sekitar 500 g/hari dengan asumsi tiga kali memasak dalam satu hari. Iliffe (2009) juga menyarankan untuk aplikasi mendatang perlu dilakukan perbaikan (redesain) agar dapat dihasilkan *biochar* yang kontinyu dengan hasil yang lebih banyak dengan performa yang lebih baik. Hingga penelitian ini dilakukan belum ditemukan laporan mengenai perbaikan yang dilakukan berdasarkan desain kompor anila.

Desain kompor gasifikasi-pirolisis ini diharapkan dapat menjawab beberapa permasalahan penting dalam kompor anila. Beberapa perbaikan yang ingin dicapai adalah hasil *biochar* yang lebih banyak, lebih efisien dan efektif dengan berbagai bahan baku biomassa, proses *autothermal* yang merupakan proses paling

penting kompor pirolisis dapat dicapai dengan baik. Selain itu, kompor hasil rancangan dapat memenuhi kebutuhan energi masak suatu rumah tangga dan dapat diaplikasikan pada desa-desa di Indonesia.

2. Material dan Metode

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Pembuatan kompor gasifikasi-pirolisis dilakukan di Bengkel Sentosa Teknik Bogor. Pengujian performa kompor dilakukan di Laboratorium Pindah Panas dan Massa Departemen Teknik Mesin dan Biosistem serta Laboratorium Lapangan Siswadi Soepardjo IPB Kampus Dramaga.

Waktu penelitian dilaksanakan mulai bulan Oktober 2014 hingga Juli 2015 meliputi studi literatur, pembuatan desain, konstruksi dan revisi desain serta pengujian.

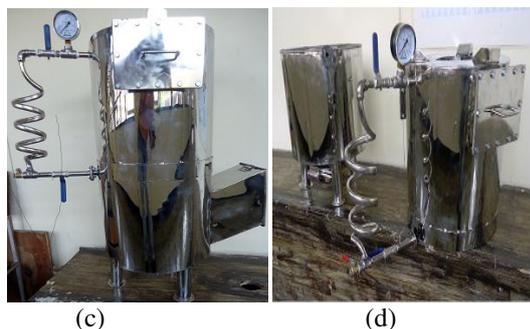
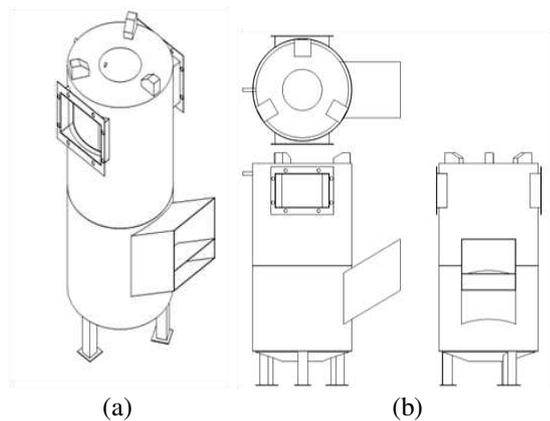
2.2. Deskripsi Kompor Gasifikasi-Pirolisis Hasil Desain

Pada Gambar 1 diperlihatkan rancangan kompor dalam bentuk tampilan tiga dimensi (a) dan dua dimensi (b), serta foto bagian ruang pirolisis (c) dan bagian pembakaran (d) hasil rancangan.

Kompor Gasifikasi-pirolisis terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian bawah sebagai tungku pembakaran, yang berbentuk seperti kompor roket dan bagian atas sebagai ruang pirolisis yang berbentuk seperti kompor anila. Pada bagian pembakaran terdapat ruang untuk memasukan bahan bakar dan ruang pembakaran biomassa dengan volume 14,345 cm³ atau 14,345 L. Ruang pembakaran ini terdiri atas tempat untuk bahan bakar dengan volume 8.607 L dan sisanya ruang udara dan abu pada bagian bawahnya. Berat total bagian pembakaran adalah 6.942 kg menggunakan *stainless steel* tebal 2 mm.

Bagian atas adalah ruang pirolisis dengan sistem *batch* yang dilengkapi dengan tempat untuk memasukan dan mengeluarkan bahan yang dibuat menjadi *biochar* dengan diameter 12 cm dan dua buah pipa berukuran 0.64 cm (seperempat inchi) dan 1.27 cm (setengah inchi) yang berfungsi sebagai penghubung antara ruang pirolisis dengan ruang pembakaran untuk pembakaran zat terbang/*volatile matter*. Kedua pipa ini dilengkapi dengan katup yang dapat dibuka-tutup. Volume ruang pirolisis adalah 17.215 L dan pada bagian tengahnya terdapat ruang kosong berbentuk tabung tanpa penutup yang terhubung ke bagian ruang pembakaran yang berfungsi sebagai pengarah api menuju wadah tempat masak dan sekaligus sebagai penyalur panas bagi ruang pirolisis. Berat total bagian pembakaran adalah 10.480 kg. Bahan yang digunakan baik bagian pirolisis maupun bagian pembakaran menggunakan *stainless steel* tebal 2 mm. Bagian input output bagian pirolisis menggunakan pipa dengan penutup sistem ulir.

Untuk mengurangi kehilangan panas ke lingkungan, terdapat ruang yang berfungsi sebagai lapisan kedua sekaligus sebagai panyalut udara yang akan menggunakan panas yang terbuang sebagai pemanas udara input/*preheated air* (Karamarkovic dan Karamarkovic 2010). Pada bagian input-output biomassa digunakan bahan *rock wool* untuk menghindari kebocoran zat terbang melalui ulir. Fungsi *rockwool* juga sebagai isolator panas menghindari suhu mendekati titik embun (*dew point*) pada bagian ini agar tidak terbentuk tar dari zat terbang.



Gambar 1. Rancangan kompor gasifikasi-pirolisis: (a) Tampilan tiga dimensi, (b) Tampilan dua dimensi, (c) Foto hasil rancang bangun, (d) Bagian atas ruang pirolisis dan bagian bawah ruang pembakaran.

2.3. Alat dan Bahan

Pengujian kinerja kompor gasifikasi-pirolisis hasil rekayasa dilakukan dengan metode pengamat/pengukuran langsung dan *Water Boiling Test* (WBT), memerlukan peralatan seperti panci *stainless* volume 7 liter, *stop watch*, timbangan digital hingga 30 kg dengan ketelitian 1 gram, pengukur kadar air *handheld* digital, dua buah *thermocouple K type* dan *hybrid recorder* sederhana, multimeter digital dengan pelengkap pengukur suhu dan detektor gas CO hingga 1 ppm.

Bahan yang digunakan untuk pembuatan *biochar* adalah batok kelapa, sekam dan jerami padi, potongan kayu campuran, tandan kosong sawit, dan potongan bambu. Bahan bakar utama adalah batok kelapa dan arang batok kelapa, kayu bakar dari senggon dan tanda kosong sawit.

2.4. Metode

Parameter yang diukur/dihitung untuk pengujian dengan metoda pengamatan/pengukuran langsung dan WBT adalah:

1. Waktu mendidihkan air.
2. Laju pembakaran (*burning rate*).
3. Daya output kompor
4. Efisiensi termal
5. Suhu di ruang bakar
6. Suhu di titik panci
7. Suhu di ruang pirolisis
8. Rasio pembakaran (fraksi bahan bakar yang terbakar secara tuntas di ruang bakar).
9. Jumlah bahan untuk memicu tercapainya suhu pirolisis dan proses autothermal
10. Lamanya proses *autothermal*
11. Jumlah *biochar* yang dihasilkan per proses
12. Rasio *biochar* terhadap bahan baku yang digunakan
13. Waktu yang perlukan menghasilkan *biochar*
14. Gas CO yang dihasilkan

2.4.1. Metoda Water Boilling Test (WBT)

WBT yang dilakukan hanya pada pada fase 1 (sebelum pirolisis), mendidihkan air dari proses penyalaan kompor hingga air mendidih dan fase 2 (sesudah pirolisis), mendidihkan kompor pada kondisi kompor telah menyala stabil melanjutkan posisi pada fase 2. Pengujian WBT menggunakan air sebanyak 5 kg (5 L).

Parameter yang dicari dalam WBT adalah waktu yang diperlukan untuk mendidihkan air, jumlah bahan bakar yang digunakan dalam waktu tersebut, jumlah air yang menguap. Data-data tersebut dipakai untuk menghitung daya output (*power*), laju bahan bakar dan efisiensi, menggunakan persamaan (1) – (3) (Febriansyah 2014).

Daya output/Power kompor (P):

$$P = \frac{\Delta Mf \cdot B}{\Delta t} \quad (1)$$

P adalah power dalam (kW), ΔMf adalah massa bahan yang digunakan, B adalah nilai kalor LHV (*lower heating value*) bahan bakar yang digunakan dalam kJ/kg dan Δt adalah waktu dalam detik. Laju bahan bakar ($\dot{\phi}$) dihitung dengan persamaan:

$$\dot{\phi} = P/B \quad (2)$$

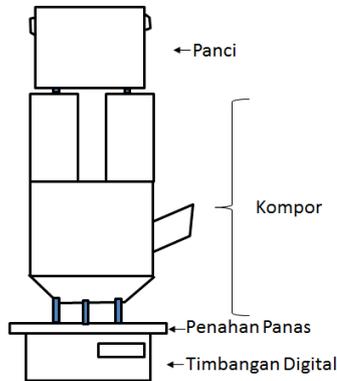
Laju bahan bakar ($\dot{\phi}$) dalam Kg/Jam. Efisiensi kompor menyatakan ukuran penggunaan energi yang dikonversi menjadi panas untuk masak di panci:

$$\eta = \frac{Mw(TB-Ti)Cp + MeH}{MfB} \cdot 100\% \quad (3)$$

η adalah efisiensi termal dalam persen, Mw massa air awal dalam kg, TB titik didih air ($^{\circ}C$), Ti suhu awal air/suhu lingkungan ($^{\circ}C$), Cp panas spesifik air yaitu 4.186 kJ/KgK, Me massa air menguap (kg), H panas laten penguapan air yaitu 2257 kJ/Kg, Mf massa bahan

bakar yang terpakai dalam pengujian, dan B adalah LHV bahan bakar (kJ/kg).

Pengukuran laju dan jumlah bahan bakar dapat diukur langsung karena dilakukan pengukuran langsung seperti diperlihatkan Gambar 2. Perubahan dan jumlah biomassa yang dibakar dan berubah menjadi gas dapat diukur secara langsung. Juga dapat diamati penggunaan bahan bakar secara spesifik.



Gambar 2. Formasi pengujian WBT dengan penimbangan laju pembakaran dan perubahan biomassa selama pengujian.

2.4.2. Deteksi Gas CO

Deteksi gas CO dilakukan dengan menggunakan Gas CO detektor. Prinsip kerja gas CO detektor adalah melakukan *scanning* terhadap kehadiran gas CO menggunakan sinar. Jika jumlah gas CO lebih dari 25 ppm (lebih dari batas ambang) maka detektor akan berbunyi dan akan semakin keras jika jumlahnya semakin banyak. Untuk itu dilakukan *scanning* pada sekitar kompor dan atas kompor pada pembakaran awal, saat belum terjadi pirolisis dan setelah terjadi pirolisis dengan jarak sekitar 30 cm dari titik api.

2.4.3. Rasio Pembakaran, Ouput Biochar dan Rasio Biochar

Kompore *gasifikasi-pirolisis* pada bagian pembakaran tujuannya adalah menghasilkan pembakaran yang menunjang terjadinya proses pirolisis dan pada waktu yang sama menghasilkan energi untuk memasak. Oleh sebab itu pembakaran di ruang bakar menjadi faktor penting. Salah satu cara mengukur performa suatu kompor bakar adalah mengukur rasio pembakaran (RP) yang merupakan rasio antara bahan yang tersisa dengan berat awal bahan bakar:

$$RP = \frac{\text{berat sisa pembakaran}}{\text{Berat input biomassa pada ruang bakar}} \quad (4)$$

Output *biochar* yang dihasilkan ditimbang secara langsung dengan melakukan pengurangan berat perangkat pirolisis dan *biochar* dikurangi berat perangkat pirolisis dan juga dilakukan penimbangan hasil *biochar* setelah dingin dan dikeluarkan dari ruang pirolisis. Rasio *biochar* (RB) yang dihasilkan dihitung dengan rumus:

$$RB = \frac{\text{berat output biochar}}{\text{Berat input biomassa pada ruang pirolisis}} \quad (5)$$

2.4.4. Temperatur Pirolisis, Jumlah Bahan bakar yang dibutuhkan dan Autothermal

Tempertaurnpirolisis diukur dalam ruang pirolisis saat tercapai output gas dari ruang pirolisis ke ruang bakar mulai terbakar dan juga dicatat waktunya. *Autothermal* diukur pada saat sistem kompor telah mencapai suhu pirolisis dan dapat menghasilkan pembakaran yang menopang berlangsungnya proses pirolisis secara mandiri serta menghasilkan juga energi untuk memasak.

Jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk memicu terjadinya proses pirolisis dan mendukung proses *autothermal* memiliki karakter berbeda untuk tiap bahan yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan menggunakan bahan yang sama yaitu batok kelapa dan diperlakukan sama. Dari jumlah bahan bakar yang dibutuhkan dapat dikonversi menjadi jumlah energi yang dibutuhkan dengan rumus:

$$\text{Jumlah Energi} = \text{Jumlah biomassa} \times \text{LHV biomassa} \quad (6)$$

2.4.5. Pengukuran Temperatur Titik Panci, Ruang Pirolisis dan Ruang Bakar

Pengukuran suhu titik panci, ruang pirolisis dan ruang bakar dilakukan dengan menggunakan *thermocouple* tipe K. Pengukuran titik panci dilakukan untuk mencari suhu tertinggi pada saat belum terjadi pembakaran pirolisis dan saat pirolisis. Pengukuran suhu ruang pirolisis dan ruang bakar untuk melihat karakteristik temperatur pirolisis, *autothermal*, dan kondisi lain yang terjadi, sehingga diukur secara kontinyu.

3. Hasil dan Pembahasan

Desain awal kompor dilakukan beberapa perbaikan untuk mencapai tujuan dari desain kompor. Perbaikan yang dilakukan yaitu diameter awal pipa penghubung ruang pirolisis dan ruang bakar seperempat inchi, diganti dengan setengah inchi dan pada bagian ujungnya dibuat lebih besar. Pergantian ini memberikan hasil waktu dan kualitas pembentukan *biochar* menjadi lebih cepat dan juga masalah sumbatan diakibatkan oleh tar menjadi lebih baik dan lebih mudah dalam pembersihannya. Permasalahan tar dapat teratasi jika menggunakan pipa berdiameter lebih besar. Permasalahan tar dapat juga diperkecil dengan mencegah zat terbang mencapai atau lebih rendah dari titik embunnya (*dew point*) sehingga tidak membentuk tar (Neubauer 2011). Penggunaan dua lapis dinding pada ruang pirolisis dengan mengalirkan udara panas dari dinding ruang bakar cukup efektif setelah lubang pembatas aliran udara diperbesar. Proses pirolisis dalam menghasilkan *autothermal* berjalan dengan baik. Kebocoran pada bagian input output ruang pirolisis dapat diatasi dengan menggunakan bahan *rockwool* yang juga berfungsi sebagai isolator suhu. Penggunaan tempat tatanan kompor gas berbentuk bulat dapat memperbaiki masalah api yang besar dan memperbaiki luas per-

mukaan pembakaran yang pada akhirnya memperbaiki efisiensi kompor.

3.1. Kadar Air Bahan Bakar

Hasil pengujian bahan baku (batok kelapa) yang telah dianginkan dan bahan baku yang baru diambil dari pasar digunakan pada tes 1, tes 2 dan tes 3 WBT. Hasil pengujian kandungan air (*water content*) diperlihatkan pada Gambar 3. Pengujian menunjukkan bahwa kadar air hanya berpengaruh pada pengujian *cold start*, sedangkan pada pengujian *hot start* tidak berbeda secara signifikan. Waktu untuk mendidihkan air pada bahan dengan kadar air lebih tinggi menjadi lebih lama dibandingkan dengan yang lebih rendah. Pengamatan visual juga memperlihatkan bahwa bahan dengan kadar air lebih tinggi akan menghasilkan asap yang lebih banyak pada awalnya. Kadar air tidak berpengaruh pada pada tes sesudah pirolisis. Hal ini dapat dijelaskan seperti yang digambarkan oleh Roth (2011) pada Gambar 4. Pada awal pembakaran, yang pertama terjadi adalah proses pengeringan yang membutuhkan panas. Pada saat pengujian sesudah pirolisis, proses pengeringan sudah selesai dan prosesnya langsung pada tahap pirolisis sehingga kadar air pada tahap sesudah pirolisis tidak berpengaruh.

3.2. Kinerja Kompor

Waktu yang diperlukan untuk mendidihkan 5 L air pada uji sebelum pirolisis dan sesudah pirolisis berbeda secara signifikan. Waktu mendidihkan air sebelum pirolisis berkisar dari 12 – 23 menit sedangkan sesudah pirolisis hanya 6-12 menit. Dengan menggunakan bahan bakar batok kelapa dengan LHV = 20,860 kJ/kg, pengukuran penggunaan bahan bakar sebanyak 0.221 kg dalam waktu 8 menit (480 detik) sebelum pirolisis, dan sesudah pirolisis bahan bakar yang digunakan 1.066 kg dalam waktu 16 menit (960 detik). Dengan menggunakan persamaan (1) maka diperoleh daya kompor sebelum pirolisis adalah 9.60 kW dan sesudah pirolisis adalah 23.16 kW. Perbedaan dengan *range* yang besar disebabkan oleh laju penggunaan bahan bakar antara sebelum pirolisis dan sesudah pirolisis berbeda cukup besar. Dengan menggunakan persamaan (2) maka diperoleh laju penggunaan bahan bakar (rata-rata) sebelum pirolisis adalah 1.66 kg/jam dan sesudah pirolisis adalah 4.00 kg/jam.

Sumber bahan bakar kompor sebelum pirolisis dan sesudah pirolisis berbeda. Sebelum pirolisis bahan bakar yang terbakar (berkurang) hanyalah bahan bakar yang terdapat di bagian ruang bakar sedangkan setelah pirolisis yang terbakar adalah zat terbang yang dihasilkan dari ruang pirolisis. Pada saat suhu di ruang pirolisis mencapai seratus derajat Celsius atau lebih maka yang pertama-tama terjadi adalah pengeringan yaitu kadar air keluar dari bahan biomassa. Selama rentang ini gas yang keluar dari ruang pirolisis belum terbakar karena mengandung sebagian besar uap air. Setelah pengeringan maka biomassa yang terdiri dari tiga komponen utama; hemiselulosa, selulosa dan lignin

mulai terurai. Penelitian sebelumnya terkait penguraian biomassa dengan komponen-komponen tersebut menggunakan suhu yang berbeda-beda diperoleh bahwa hemiselulosa terurai pada suhu antara 200-260 (Park 2008), sementara selulosa terurai antara suhu 240-350 °C (Park 2008). Lignin mulai terurai pada suhu 160-170 °C dan terus terurai dengan laju yang lambat hingga suhu 900 °C (Lehmann dan Joseph 2009) sedang menurut Park 2008 lignin terurai pada suhu 280-500 °C. Menurut Zheng *et al.* 2010 sebagian besar biomassa dalam proses pirolisis terurai pada temperatur antara 200-400 °C.

Test-1		Instrument reading (% dry basis)		
		1	2	3
Piece 1		14.7%	14.1%	16.9%
Piece 2		17.0%	14.3%	13.2%
Piece 3		13.5%	13.4%	17.0%
Average moisture content (%)				
dry-basis		15%	wet-basis 13%	

Test-2		Instrument reading (% dry basis)		
		1	2	3
Piece 1		14.2%	17.3%	13.1%
Piece 2		13.4%	13.5%	24.2%
Piece 3		14.3%	16.3%	17.0%
Average moisture content (%)				
dry-basis		16%	wet-basis 14%	

Test-3		Instrument reading (% dry basis)		
		1	2	3
Piece 1		27.5%	26.5%	31.5%
Piece 2		27.7%	36.4%	26.1%
Piece 3		27.7%	17.6%	21.5%
Average moisture content (%)				
dry-basis		27%	wet-basis 21%	

Gambar 3. Hasil Uji Kadar Air (Moisture Content) bahan yang digunakan.

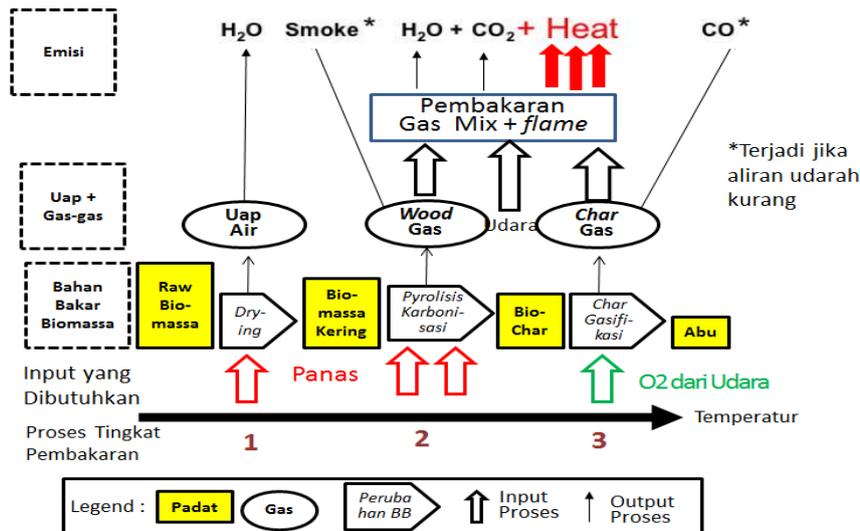
Jadi laju biomassa terdegradasi dengan cepat menjadi zat terbang terjadi dalam rentang suhu tersebut (Zheng *et al.* 2010), dan di atas suhu 400 °C reaksi utama yang terjadi adalah proses aromatisasi dengan laju massa yang lambat (Lehmann dan Joseph 2009).

Hasil pengukuran laju pembakaran (perubahan berat dan selisih perubahan berat) dengan menggunakan bahan batok kelapa (ruang bakar dan ruang pirolisis) diperlihatkan pada Gambar 5, dimana pirolisis mulai terjadi pada menit ke-13. Laju perubahan biomassa pada saat pirolisis lebih besar jika dibandingkan dengan sebelum pirolisis. Menjelang berakhirnya proses pirolisis, laju perubahan menurun hingga praktis tidak ada lagi perubahan (semua biomassa di ruang pirolisis telah menjadi *biochar*). Kondisi ini juga ter-

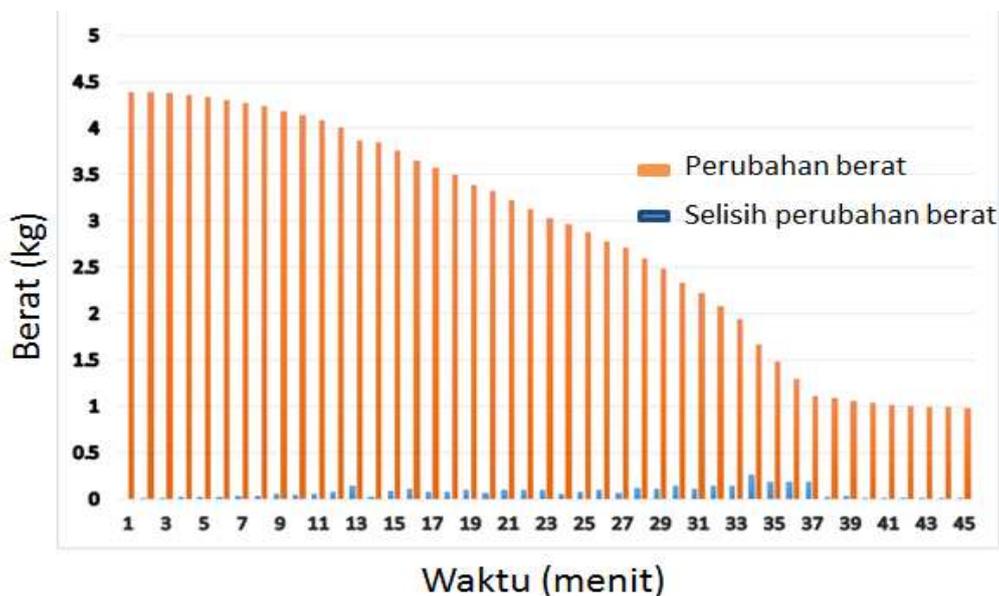
lihat dari zat terbang yang terbakar semakin kecil hingga padam.

Efisiensi termal kompor diukur dan dihitung menggunakan Persamaan (3) dengan massa awal air $M_w = 5$ kg, titik didih air di lokasi penelitian 98°C , suhu awal air (T_i) = 28°C , panas spesifik air (C_p) = 4.186 kJ/Kg, massa air menguap (M_e) 0.272 kg, panas laten penguapan air (H) = $2,257$ kJ/Kg, LHV bahan bakar/batok kelapa (B) = $20,860$ (kJ/kg), massa bahan bakar yang terpakai dalam pengujian (M_f) untuk sebelum pirolisis adalah = 0.527 kg dan sesudah pirolisis = 0.677 kg, maka diperoleh efisiensi kompor = 11.31%

sebelum pirolisis dan 14.72% setelah pirolisis. Efisiensi sebelum pirolisis lebih rendah dari sesudah pirolisis karena pada awal penyalaan (*cold start*) sebagian energi panas yang dihasilkan masih rendah dan juga dipergunakan untuk memanaskan badan kompor, ruang bakar dan ruang pirolisis. Disamping itu pembakaran gas mampu bakar hasil pirolisis lebih efisien dibandingkan dengan pembakaran langsung biomassa sebelum pirolisis. Hal ini dapat juga dilihat dari warna api dan pengukuran suhu pada titik panci sebelum dan sesudah pirolisis.



Gambar 4. Proses tingkat pembakaran biomassa (Roth 2011).



Gambar 5. Hasil pengukuran laju pembakaran biomassa dan proses pirolisis dengan menggunakan bahan baku batok kelapa.

Efisiensi termal dalam perhitungan di atas belum memasukan penggunaan panas untuk memicu terjadinya proses pirolisis dan mempertahankan proses pirolisis tersebut. Jika ini diperhitungkan maka nilai efisiensinya seharusnya lebih tinggi baik sebelum

maupun sesudah pirolisis. Dalam sistem kompor ini penambahan efisiensi tersebut hanya disebut sebagai keuntungan sistem dimana dapat dihasilkan *biochar* secara cuma-cuma.

Penimbangan hasil akhir abu dan bahan bakar tersisa setelah kompor padam pada ruang bakar menghasilkan berat abu dan arang = 28 g, input bahan bakar 1,200 g, sehingga rasio pembakaran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4), yaitu sebesar 2.3 %. Hal ini menunjukkan bahwa aliran udara ke ruang bakar dan suhu panas dalam ruang bakar dengan batok kelapa, membakar hampir semua bahan bakar yang dimasukkan, dan hanya tersisa abu dalam jumlah kecil.

Deteksi gas CO pada awal pembakaran tinggi, saat ruang pembakaran semakin panas maka deteksi CO menunjukkan penurunan. Pada saat sudah menyala dengan baik tetapi belum terjadi pembakaran gas pirolisis dapat dicapai emisi gas CO yang rendah dibawah 0.25 ppm. Saat terjadi pirolisis emisi gas CO dibawah 18 ppm bahkan sering tidak terdeteksi. Emisi CO lebih rendah setelah terjadi pirolisis atau dengan kata lain pembakaran zat terbang (*volatile matter*) menghasilkan emisi CO lebih rendah jika dibandingkan pembakaran langsung biomassa.

Kapasitas input bahan baku tergantung jenis bahan baku karena memiliki volume yang berbeda-beda per satuan berat (berat jenis). Untuk batok kelapa dengan potongan seperti dari pasar, kapasitas maksimum input adalah 3 kg/proses, sedangkan sekam padi maksimum 1.5 kg, jerami padi 1.2 kg (kondisi kering), tandan kosong sawit 1.8 kg/proses (kondisi kering), potongan bambu kering 3 kg/proses (kondisi kering) dan potongan kayu campuran kering 3 kg/proses (kondisi kering). Output *biochar* yang dihasilkan dengan input maksimal adalah batok kelapa 700 – 900 g, sekam padi 672 g, jerami padi 535 g, tandan kosong sawit 507 g, potongan bambu 834 g dan potongan kayu campuran 726 g. Jika keseluruhan biomassa tersebut dijumlahkan dihitung nilai rata-rata *biochar* yang dihasilkan per proses maka diperoleh hasil rata-rata 679 g/proses.

Dengan mempergunakan persamaan (5) maka perhitungan rasio *biochar* yang dihasilkan diperlihatkan pada Tabel 1. Jika keseluruhan hasil rasio *biochar* pada Tabel 1 dijumlahkan dan dibagi dengan jumlah jenis biomassa tersebut maka akan diperoleh rasio rata-rata *biochar* yang diuji yaitu sebesar 34.6%.

Hasil pengukuran di atas memperlihatkan bahwa dalam proses pirolisis yang menghasilkan *biochar* dapat dihasilkan surplus energi yang dapat dipakai untuk berbagai aplikasi, dalam kasus kompor gasifikasi pirolisis ini untuk memenuhi kebutuhan energi memasak. Menghasilkan energi terbarukan dari biomassa menghasilkan jejak karbon yang netral, tetapi menghasilkan energi terbarukan dan *biochar* yang dipakai sebagai penyimpan karbon dapat membalik perubahan iklim dengan jejak karbon negatif (Lehmann 2007). Juga dapat diperlihatkan bahwa menghasilkan energi dan *biochar* dapat dilakukan dengan cara yang ramah lingkungan (emisi yang rendah).

3.3. Pengukuran Temperatur Titik Panci, Ruang Pirolisis dan Ruang Bakar

Pengukuran temperatur pada titik pertemuan api - panci (*pan surface point*) terdekat, yang selanjutnya disebut titik panci, memperlihatkan bahwa sejak api menyala pada ruang bakar maka dengan cepat suhu pada titik panci meningkat. Suhu tertinggi yang dicapai sebelum terjadi pirolisis adalah berkisar 770 – 792 °C, sedangkan pada saat pirolisis terjadi dan autothermal berlangsung suhu tertinggi berkisar 826 – 868 °C. Hal ini memperlihatkan bahwa pembakaran dengan menggunakan zat terbang (gas pirolisis) menghasilkan suhu lebih tinggi dibandingkan pembakaran biomassa di ruang pembakaran. Hal ini dapat juga diamati dari warna api, dimana pembakaran gas pirolisis memiliki warna api kekuningan, sementara pada pembakaran biasa warna apinya antara merah dan kuning. Jika suhu titik panci belum tinggi maka akan muncul jelaga yang membuat panci menjadi hitam. Pada saat terjadi pirolisis maka panci tidak menjadi hitam lagi asal pada bagian atas panci terjadi pembakaran yang lebih sempurna yaitu tersedia aliran udara yang cukup.

Pengukuran suhu dalam ruang pirolisis memberikan data-data pada suhu berapa mulai terjadi pirolisis dan proses autothermal. Gambar 6 memperlihatkan bahwa suhu tertinggi yang dapat dicapai dalam beberapa percobaan berkisar 455 – 468 °C dengan menggunakan batok kelapa. Pada percobaan lainnya dengan menggunakan kayu campuran suhu ruang pirolisis mencapai 579 °C. Pada Gambar 6a, pengukuran suhu ruang pirolisis dengan batok kelapa dilakukan hanya sampai menit ke-33, pada waktu tersebut proses autothermal telah berhenti dan gas pirolisis telah berhenti menyala. Pada menit ke-34 dan selanjutnya adalah proses pendinginan, *biochar* yang dihasilkan mencapai 100%. Pada Gambar 6b dengan percobaan yang lain diperlihatkan hasil pengukuran suhu ruang pirolisis dimana pengukuran dilakukan hingga proses pendinginan dalam ruang pirolisis.

Pada proses pendinginan yang dimulai dari menit ke-34 sejak gas pirolisis telah berhenti dan padam, terlihat bahwa terjadi proses pendinginan yang berlangsung secara logaritmik. Dari beberapa pengalaman jika suhu ruangan masih di atas 100 °C maka jika ruang pirolisis dibuka maka *biochar* yang telah jadi akan membara jika bersentuhan dengan udara luar. Oleh sebab itu ruang pirolisis baru dibuka pada saat suhu dibawah 100 °C. Suhu yang aman untuk membukan ruang pirolisis adalah sekitar 70 °C.

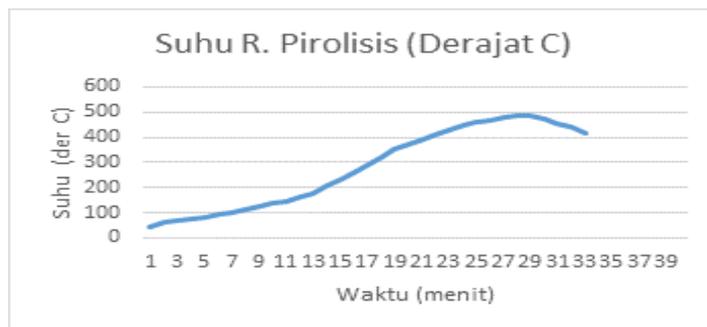
Gambar 7 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan secara paralel. Suhu ruang pirolisis dengan suhu ruang pembakaran. Tingginya suhu pada ruang bakar tidak akan langsung membuat suhu ruang pirolisis tinggi. Kenaikan suhu dalam ruang pirolisis berlangsung hampir membentuk garis lurus. Yang diperlukan dalam ruang pirolisis adalah menjaga *trend* kenaikan suhu hingga mulai terbentuk proses pirolisis. Pengukuran dalam ruang bakar hanya dilakukan hingga menit ke-30.

Tabel 1. Jumlah maksimum input, hasil output *biochar* dan rasio *biochar* beberapa bahan biomassa dengan kompor gasifikasi pirolisis

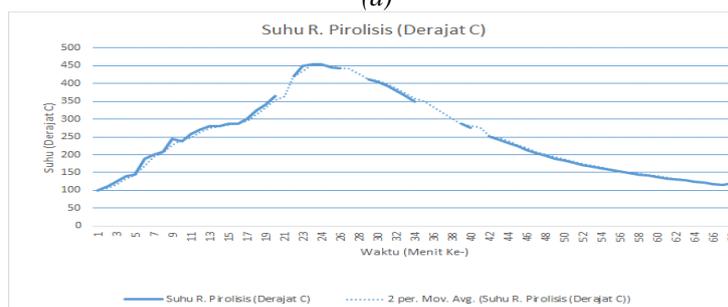
Jenis Biomassa	Input (g)/proses	Output (g)/proses	Rasio (%)	Keterangan
Batok kelapa	3.000	700 – 900	23 – 30	5 kali pengujian
Sekam padi	1.500	672	44.8	1 kali pengujian
Jerami padi	1.200	535	44.6	1 kali pengujian
Potongan kayu campuran	3.000	726	24.2	1 kali pengujian
Tandan kosong sawit	1.500	507	28.2	1 kali pengujian
Potongan bamboo	3.000	834	27.8	1 kali pengujian

Tabel 2. Karakteristik pirolisis (temperatur pirolisis, waktu mulai pirolisis dan *autothermal*) jumlah dan jenis bahan bakar yang digunakan di ruang bakar.

Jenis Biomassa	Temperatur Pirolisis (°C)	Waktu Mulai Pirolisis (Menit)	Jumlah & Jenis Bahan Bakar yang Digunakan (Ruang Pembakaran)	Lama Waktu Autothermal (Menit)	Keterangan
Batok kelapa	160 - 586	15	- 500 g batok kelapa - 280 g kayu sengon - 75 g arang batok kelapa - 80 g tandan kosong sawit	13	Nyala api besar dan stabil
Sekam padi	140 - 415	12	- 500 g batok kelapa - 280 g kayu sengon - 75 g arang batok kelapa - 100 g tandan kosong sawit	7	Nyala api pembakaran gas pirolisis lebih kecil nyala api bahan batok kelapa
Jerami padi	135 - 386	11	- 500 g batok kelapa - 280 g kayu sengon - 75 g arang batok kelapa - 100 g tandan kosong sawit	5	Nyala api pembakaran gas pirolisis lebih kecil nyala api bahan sekam
Tandan kosong sawit	145 - 564	8	- Tandan kosong sawit 423 g - 100 g arang batok kelapa	19	Nyala api sama baik dengan bahan batok kelapa.
Potongan bambu	155-513	12	- 500 g batok kelapa - 280 g kayu sengon - 75 g arang batok kelapa - 80 g tandan kosong sawit	11	Nyala api sedikit lebih kecil dari bahan batok kelapa
Potongan kayu	160 - 597	7	- 500 g batok kelapa - 280 g kayu sengon - 75 g arang batok kelapa - 80 g tandan kosong sawit	24	Nyala api sama baik dengan bahan batok kelapa



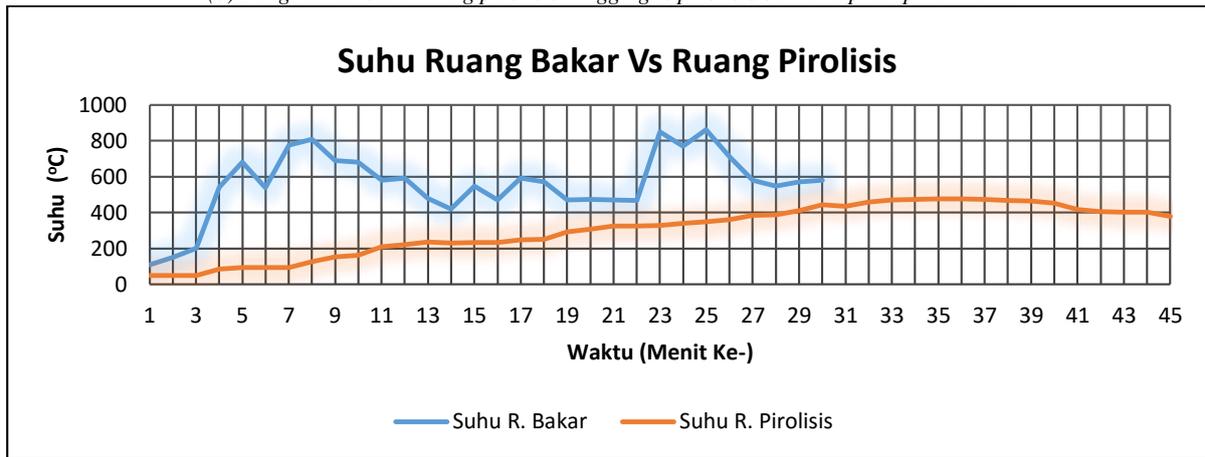
(a)



(b)

Gambar 6.(a) Pengukuran suhu ruang pirolisis hingga gas pirolisis berhenti pada pada menit ke-33.

(b) Pengukuran suhu ruang pirolisis hingga gas pirolisis berhenti pada pada menit



Gambar 7. Hasil pengukuran temperatur ruang bakar dibandingkan dengan temperatur ruang pirolisis, fluktuasi suhu ruang bakar tidak terlalu berpengaruh terhadap suhu ruang pirolisis. Diperlukan pemanasan untuk mempertahankan konsistensi suhu dalam ruang pirolisis agar proses pirolisis tetap terjaga.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Kompur gasifikasi-pirolisis hasil desain dapat menghasilkan energi untuk memasak (seperti kompor ICS lainnya) dan *biochar* dengan input berbagai bahan biomassa. Produksi *biochar* dengan kompor ini tidak menghasilkan asap (minimal) dan pembuatan *biochar* dapat dilakukan dalam waktu yang singkat (kurang dari satu jam) dengan berbagai biomassa. Uji performa dengan WBT menghasilkan waktu untuk mendidihkan 5L air sebelum proses pirolisis adalah 12 menit dan sesudah pirolisis adalah 6 menit, laju pembakaran /perubahan biomassa sebelum pirolisis 1.66 kg/jam dan sesudah pirolisis 4.00 kg/jam dengan efisiensi 11.31 % sebelum pirolisis dan 14.72 % sesudah pirolisis. Kompur hasil desain menghasilkan output yang lebih baik dari kompor Anila dalam hal: jumlah output *biochar*, waktu pembuatan *biochar*, kualitas *biochar*, polusi asap dan proses *autothermal*. *Biochar* yang dihasilkan rata-rata 679 g/proses atau jika dipakai tiga kali sehari dapat dihasilkan *biochar* rata-rata 2,037 g/hari. Rasio *biochar* yang dihasilkan dengan berbagai biomassa rata-rata adalah 34.6%. Kompur ini memiliki output *biochar* tiga kali lebih banyak dari kompor anila

dengan waktu menghasilkan *biochar* lebih cepat dan emisi asap yang lebih sedikit.

4.2. Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan berbagai biomassa yang ada, termasuk penggunaan bahan plastik yang dapat dikembangkan untuk menghasilkan bahan bakar cair atau produk lainnya dan juga mengatasi permasalahan limbah padat khususnya plastik. Perlu dilakukan perhitungan lebih detail potensi energi, ekonomi dan reduksi GRK dalam bentuk *Life Cycle Assessment* (LCA) seperti yang dilakukan oleh Robert *et al.* 2009 jika kompor gasifikasi-pirolisis ini hendak diaplikasikan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang sudah mendukung penelitian ini dalam program penelitian Hibah Kompetensi: 157/SP2H/PL/DI.LITA-BMAS /2/2015 tanggal 5 Pebruari 2015

Daftar Pustaka

- [1] [ARC] Aprovecho Research Center, Shell Foundation United States Environmental Protection Agency. 2012. Test Results of Cook Stove Performance. Partnership for Clean Indoor Air
- [2] Al Gore. 2009. Our Choice, A Plan to Solve the Climate Crisis. Melcher Media, New York.
- [3] Alatas, I. H., H. Darmasetiawan, A. Yani, Musri-ran. 2008. Development of Cooking Stove from Waste (Rice Husk). Institut Pertanian Bogor, De-partment of Physics, FMIPA IPB, Kampus IPB Dramaga.
- [4] Barnes, D., K. Openshaw, K. Smith, R. Van der Plas, 1994. What makes people cook with im-proved biomass stoves? a comparative interna-tional review of stove programs. World Bank Technical Paper pp. 242.
- [5] Febriansyah, H., A. A. Setiawan, K. Suryoprato-mo, A. Setiawan, 2014. Gama stove: biomass stove for palm kernel shells in indonesia. confe-rence and exhibition indonesia renewable energy & energy conservation Energy Procedia, Pub-lished by Elsevier. [terhubung berkala] <http://www.sciencedirect.com>. [2013]
- [6] Iliffe, R., 2009. Is the biochar produced by an anila stove likely to be abenefial soil additive?. Advaned Enviromental and Ener-

- gy Studies, Centre for Alternative Technology. [terhubung berkala]. [http:// www.biochar.org.uk](http://www.biochar.org.uk).
- [7] Jeffery, S., F. G. A. Verheijen, M. van der Velde, A. C. Bastos, 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ.* 144, pp. 175–187.
- [8] Karamarkovic, R., V. Karamarkovic, 2010. Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures. *Journal Energy* 35, pp. 537–549.
- [9] Kauffman, N., J. Dumortier, D. J. Hayes, R. C. Brown, D. A. Laird, 2012. Producing energy while sequestering carbon? The relationship between biochar and agricultural productivity. *Biomass and Bioenergy* 63, pp. 167 – 176. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.049.
- [10] Lehmann, J., J. Gaunt, M. Rondon, 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, pp. 403–427. doi: 10.1007/s11027-005-9006-5.
- [11] Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, pp. 381-387.
- [12] Lehmann, J., S. Joseph, 2009. *Biochar For Environmental Management: An Introduction*. Earth-scan, UK and USA.
- [13] Mc Elligott, K., D. Page Dumroese, C. Mark, 2011. *Bioenergy Production Systems And Bio-char Application In Forests: Potential For Renewable Energy, Soil Enhancement, And Carbon Sequestration*. Fort Collins CO, US. pp. 14
- [14] Miles, T., 2009. Use of biochar (charcoal) to replenish soil carbon pools, restore soil fertility and sequester CO₂. The United Nations Convention to Combat Desertification 4th Session of the Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action under the Convention, Poznan 1-10 December 2008.
- [15] Neubauer, Y., 2011. Strategies for tar reduction in fuel-gases and synthesis-gases from biomass gasification. *Journal of Sustainable Energy & Environment Special Issue* pp. 67-71.
- [16] Park, W. C., 2008. *A Study of Pyrolysis of Char-ring Materials and Its Application to Fire Safety and Biomass Utilization*. Disertasi. Mechanical Engineering, University of Michigan, Michigan.
- [17] Roberts, K. G., B. Gloy, S. Joseph, N. R. Scott, J. Lehmann, 2009. Life Cycle Assessment of Bio-char Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental Science & Technology* 2 (44), pp 827–833. doi:10.1021/es902266r ©
- [18] Roth, C., 2011. *Micro Gasification: Cooking with Gas from Biomass*. GIZ HERA Poverty-oriented Basic Energy Service.
- [19] Steiner, C., W. G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J. L. V. Macedo, W. E. H. Blum, W. Zech, 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291, pp. 275-290.
- [20] Steiner, C., T. Harttung, 2014. Biochar as a growing media additive and peat substitute. *Solid Earth* 5, pp. 995–999. doi:10.5194/se-5-995-2014 ©.
- [21] Woolf, D., J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, S. Joseph, 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 56, doi:10.1038/ncomms1053.
- [22] Xie, T., B. Y. Sadasivam, K. R. Reddy, C. Wang, K. Spokas, 2015. Review of the effects of biochar amendment on soil properties and carbon sequestration. *American Society of Civil Engineers*. DOI:10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000293. ©
- [23] Yuswansyah, E. Y. A. Haryanto, L. B. Tamrin, 2013. Potensi penerimaan masyarakat terhadap kompor biomassa UB-03. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* 1(2), pp. 77-84.
- [24] Zhang, J. W., N. Mohammed, P. Cote, S. Dalpe, G. Dufresne, 2013. Greenhouse trials on biochar as the growth media for cucumber, tomato and pepper hydroponic vegetable production. Final Report. Alberta Agriculture and Rural Development Greenhouse Branch/Crop Research and Extension Division 301 Horticultural Station Road EastBrooks, [terhubung berkala] <https://www.google.co.uk/#q=biochar+as+a+growing+medium+zheng+et+>. [2 November 2015]
- [25] [ARC] Aprovecho Research Center, Shell Zheng, W., B. K. Sharma, N. Rajagopalan, 2010. Using biochar as a soil amendment for sustainable agriculture. Illinois Sustainable Technology Center University of Illinois at Urbana Campaign.