

KARAKTERISTIK DAN KUALITAS BIOCHAR DARI PYROLYSIS BIOMASSA TANAMAN BIO-ENERGI WILLOW (*SALIX SP*)

C. Prayogo^(1 & 2), N D. Lestari⁽²⁾ dan K S. Wicaksono⁽²⁾

¹School of Life Science, University of Warwick, CV4 7AL- United Kingdom

²Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya Malang

Abstract

Biochar now is importance issue due to complication same meaning with “charcoal”. In development country technology convert biomass becomes energy is called “pyrolysis” to produce several gas such as bio-oil and biochar. Biochar produce from crop usually consist some importance nutrient, and called as “negative carbon emitter”. In this experiment characteristic and quality biochar is produce from Fluidized Bed Reactor to usefull biomass of *bio energy willow (Salix sp)* at different temperature 450°C, 470°C and 530°C. Evaluation was made by using LECO-2000, ICP (*Inductively Coupled Plasma*), SEM (*Scanning Electron Microscop*) and FTIR (*Fourier Transformed Infrared*). The research result showed that increased temperature “pyrolysis” from 440°C to 530°C significantly affected end product chemical composition, porous content and functional point from biochar. Adding Potassium (K) and Phosphor (P) found higher content compare the original source. On the other hand, in high temperature, all functional organic source: phenol, amine, carboxylic, aromatic and polysaccharida did not detection

Key words: biochar, pyrolysis, bio-energy, willow, fluidized bed reactor

Pendahuluan

Potensi biomassa tanaman sebagai bahan baku sumber daya alam yang terbarukan telah diakui dan secara dikenal luas (Bridgwater, 2003; Ozcimen dan Karaosmanoglu, 2004; Di Blasi, 2005; Faaij, 2006; Van de Velden *et al.*, 2008; 2010). Beberapa jenis tanaman telah diuji sebagai bahan baku energi pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik seperti diantaranya adalah: sampah hijau (Chan, 2007); *rape-seed* (Karaosmanoglu, 2000); ampas tebu (Inyang *et al.*, 2010) dan rumput-*Mischanthus* (Clifton-Brown *et al.*, 2004), termasuk diantaranya tanaman bio-energy Willow (*Salix sp*) (Volk *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2004; Valmari *et al.*, 1998).

Tanaman *bio-energy Willow (Salix sp)* memiliki tingkat pertumbuhan yang sangat cepat dan sistem rotasi panen yang pendek (4-5 th sekali sudah dapat dipanen), dapat menyerap sejumlah besar karbon dari atmosfer yang berdampak pada pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) secara cukup significant (Ayloot *et al.*, 2007; Walle *et al.*, 2007). Dalam hal produksi listrik, emisi GRK (seperti CO₂, CO dan CH₄) dari *pyrolysis* biomassa Willow telah dilaporkan secara substansial lebih rendah dari bahan-bahan baku konvensional (misalnya: batubara atau gambut organik) (Styles dan Jones, 2007). Karakteristik tanaman Willow dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Karakteristik tanaman Willow (*Salix sp*)

Biomassa tanaman Willow dapat mencapai $13,6 \text{ t ha}^{-1}$ berat kering merupakan jumlah yang besar sebagai bahan baku pembangkit listrik yang berkelanjutan (Heller *et al.*, 2003). Bahan baku ini dilaporkan memiliki nilai kalori pada $22,57 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Klasnja *et al.*, 2002), yang lebih tinggi dibandingkan bahan lainnya (misalnya: *rape-seed* ($16,37 \text{ MJ kg}^{-1}$); jerami gandum ($17,64 \text{ MJ kg}^{-1}$); kulit aprikot ($19,28 \text{ MJ kg}^{-1}$); kulit kemiri ($18,33 \text{ MJ kg}^{-1}$); biji anggur ($20,51 \text{ MJ kg}^{-1}$) atau *Mischantus* sebesar $18,5 \text{ MJ kg}^{-1}$) (Karaosmanoglu *et al.*, 2000; Ozcimen dan Mericboyu 2010; Melligan *et al.*, 2010). Nilai kalori yang lebih tinggi ini dapat menyebabkan produksi energi lebih tinggi dihasilkan selama konversi energi didalam proses *pyrolysis*.

Pyrolysis adalah proses dekomposisi *thermal* dari substrat organik atau biomassa dalam ketiadaan agen oksidasi (oksigen :

O_2), atau dengan pasokan yang terbatas selama proses pembakaran biomassa. Proses ini biasanya dapat dibagi menjadi 3 jenis yang berbeda (misalnya: *pyrolysis* lambat, menengah dan cepat) (Bridgwater, 2006). Dalam *pyrolysis* cepat (suhu tinggi (600°C) dan waktu pemanasan singkat (<5 menit)) produk paling dominan yang dihasilkan adalah dalam bentuk cairan (bio-oil/minyak), *gasifikasi* (suhu lebih tinggi ($>800^\circ\text{C}$) untuk memaksimalkan produksi gas, sedangkan *pyrolysis* lambat (suhu rendah (400°C) : waktu pemanasan lama (>15 menit)) adalah untuk produksi *biochar* dalam bentuk padatan (Sohi *et al.*, 2009). Ketiga proses *pyrolysis* tersebut akan menghasilkan komposisi produk akhir yang berbeda beda pula. Proporsi komponen produk akhir pada masing proses *pyrolysis* disajikan di Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi produk yang dihasilkan pada berbagai kondisi pyrolysis (diadopsi dari Sohi *et al.*, 2009).

Proses	Cairan (bio-oil)	Padatan (biochar)	Gas (syngas)
<i>Pyrolysis cepat:</i> Suhu tinggi (600-700°C), waktu pemanasan singkat (<5 menit)	75% (25% air)	12%	13%
<i>Pyrolysis menengah:</i> Suhu sedang (500-600°C), waktu pemanasan sedang (5-15 menit)	50% (50% air)	25%	25%
<i>Pyrolysis lambat:</i> Suhu rendah (400-500°C), waktu pemanasan lama (>15 menit)	30% (70% air)	35%	35%
<i>Gasifikasi:</i> Suhu sangat tinggi (>800°C), waktu pemanasan lama	5% (5% air)	10%	85%

Proses selama *pyrolysis* menentukan struktur fisiokimiawi dari *biochar*, selain tergantung kepada bahan baku yang digunakan dan kondisi pada saat pembentukannya (misalnya: suhu, tekanan dan waktu pemanasan) (IEA, 2007; Spokas *et al.*, 2009; Czimeczik dan Masiello, 2007). Kondisi ini dapat dimodifikasi sedemikian rupa untuk menghasilkan *biochar* dengan karakteristik tertentu (misalnya: luas permukaan yang besar, tingkatan kelas kondensasi yang rendah, atau untuk mendapatkan ukuran partikel yang lebih kecil) (Titirici *et al.*, 2007). Meskipun *pyrolysis* diakui sebagai teknologi penting dalam konversi energi dari biomassa tanaman, namun saat ini sebagian besar uji coba yang dilakukan telah skala kecil atau skala laboratorium (Liu *et al.*, 2010; Karaosmanoglu *et al.*, 1999; Durenkamp *et al.*, 2010; Inyang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010), sedangkan informasi rinci dari hasil percobaan serta penelitian skala besar sangatlah kurang dan jarang diinformasikan.

Fluidized bed reactor adalah salah satu model *pyrolysis* lambat skala industri yang melibatkan suhu pemanasan rendah sampai sedang (dari 450 ke 650°C) dalam proses konversi biomassa menjadi energi atau menghasilkan produk turunan kimiawi lainnya (Sohi *et al.*, 2009). Model reaktor ini mentargetkan produksi *biochar* sebagai produk utama, namun penerapan *pyrolysis* lambat ini dalam menghasilkan *biochar* menggunakan bahan baku tanaman tanaman *bio-energy* seperti Willow (*Salix sp*) masih sangat jarang dipelajari dan atau dilaporkan dipenelitian-penelitian sebelumnya. Keuntungan dari *pyrolyzer fluidized bed* adalah karena kemudahan operasionalnya dan desainnya yang sederhana, yang memungkinkan sistem ini untuk memproduksi *biochar* dalam jumlah yang lebih besar (Liu *et al.*, 2010; Bridgwater dan Peacocke, 2000). Selain daripada itu *fluidized bed reactor* adalah teknologi yang fleksibel, memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi, dan dampak negatif terhadap lingkungan yang rendah

(Scala *et al.*, 2003). Untuk lebih menjelaskan potensi penggunaan Willow sebagai bahan baku untuk produksi *biochar*, penilaian rinci dari pengaruh suhu rendah pada sifat dan kualitas *biochar* yang dihasilkan menggunakan *fluidized bed reactor* pada berbagai tingkatan suhu pemanasan sangatlah diperlukan.

Banyak metode yang sudah dikembangkan untuk menilai karakteristik dan kualitas *biochar* dan menilai kandungan sifat kimiawinya seperti: IR (*Infra Red spectroscopy*) dan NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*). Namun metode FTIR (*Fourier Transform Infra Red spectroscopy*) lebih dikenal sebagai metode dengan pendekatan yang lebih sederhana dan lebih cepat mengamati perubahan gugus fungsional dari komponen organik, dibandingkan dengan teknik lanjut (seperti: NMR). NMR membutuhkan waktu persiapan lebih lama, lebih mahal biaya analisa dan kebutuhan bahan kimianya, dan membutuhkan teknisi terampil untuk mengoperasikan peralatan dan menginterpretasikan hasil yang didapatkannya. Selain itu, pemanfaatan mikroskop elektron (SEM : *Scanning Electron Microscope*) untuk memeriksa sifat visual *biochar* yang digabungkan dengan aplikasi teknologi difraksi sinar-X serta pemeriksaan luas permukaan menggunakan *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) telah dapat mengidentifikasi sifat dan karakteristik *biochar* dari *switchgrass* (Boateng, 2007). Tekanan yang berbeda selama proses *pyrolysis* telah dilaporkan mempengaruhi karakteristik visual dari *switchgrass biochar* bawah pencitraan SEM (Boateng, 2007). Menggunakan teknik yang sama, Luo *et al.* (2011) mencatat bahwa struktur *biochar* sel tanaman dari *Mischantus* mengalami pengkerutan dan perubahan bentuk ketika dipanaskan sampai 750°C apabila dibandingkan dengan *biochar* yang diproduksi pada suhu rendah (350°C).

Selanjutnya, komposisi kimia dari *biochar* dari tanaman Willow yang di

pyrolysis pada suhu 550°C telah dapat diidentifikasi dengan GC/MS (Gas Chromatography–Mass Spectrometry) yang diproduksi dalam reaktor skala laboratorium (Ingemarson *et al.*, 1999). Alternatifnya, penggunaan peralatan LECO-2000, ICP (*Inductively Coupled Plasma*) sangat bermanfaat dalam mengidentifikasi kandungan unsur makro dan mikro suatu bahan.

Dengan menggunakan IR *spectroscopy* Mulligan *et al.* (2009) dapat melihat perbedaan dan intensitas puncak gugus fungsional bahan organik dalam *biochar* dari jerami gandum yang dihasilkan pada suhu 500°C dan 1.000°C apabila dibandingkan dengan bahan baku awal. Data IR jerami gandum ini didominasi oleh puncak *spectrum* panjang gelombang di wilayah dari 1030 cm^{-1} yang merupakan *alkohol primer* atau *ether* dalam struktur *lignin* atau yang mewakili gugus *polysakarida*. Intensitas yang lebih rendah dari puncak ini ditemukan pada 500°C bila dibandingkan dengan bahan baku jerami gandum dan sinyalnya hilang pada suhu 1000°C. Pola yang serupa juga tercatat untuk intensitas puncak pada panjang gelombang : 3300, 1420, 1368, 1620, 1514 dan 1730 cm^{-1} (Mulligan *et al.*, 2009). Secara berturut turut gugus fungsional bahan organik dalam *biochar* ini mewakili gugus -OH pada *cellulose*, C-O atau deformasi OH dari *carboxylate*, deformasi, C-H dari *phenolic (lignin)*, C = O dari amide, C=C dari *lignin* atau struktur aromatis lainnya atau *aliphatic carboxylate*, dan C = O dari COOH atau COOR (Artz *et al.*, 2008). Rasio antara intensitas serapan 2490 cm^{-1} (C-H *aliphatic*) dan 1600 cm^{-1} (C = C *aromatic*) menurun 1.18 menjadi 0.80 ketika *biochar* dari *Mischantus* diproduksi pada suhu 350°C dan 750°C. Hal ini menunjukkan bahwa adanya kontribusi pengaruh suhu pemanasan terhadap karakteristik *biochar*, dimana terjadi peningkatan struktur *aromatic* pada produk *biochar* yang dihasilkan pada suhu

tinggi (Luo *et al.*, 2011). Namun identifikasi dari pengaruh pemanasan terhadap kualitas dan karakteristik *biochar* dari tanaman *bio-energy* willow belum pernah dipublikasikan. Untuk lebih memahami dari kualitas *biochar* yang akan dihasilkan, pengaruh kondisi operasi (suhu pemanasan) terhadap hasil akhir menjadi fokus utama dari penelitian ini. Hal ini dapat dicapai melalui analisis perubahan status dan konsentrasi unsur hara makro dan mikro di *biochar* pada suhu 440, 470 dan 530°C. Disamping itu, perubahan intensitas puncak panjang gelombang yang mewakili berbagai gugus

fungsional bahan organik di dalam *biochar* juga diamati.

Metode Penelitian

Biochar ini diproduksi melalui proses *pyrolyser* di fasilitas biokonversi di *School of Life Science – University of Warwick – United Kingdom*. Suhu *pyrolysis fluidized bed reactor* untuk menghasilkan *biochar* diatur pada berbagai suhu pemanasan: 440, 470 dan 530°C dengan waktu pemanasan masing-masing selama 15 menit. Peralatan *pyrolysis* yang dipergunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Unit slow pyrolysis fluidized bed reactor

Analisis kandungan karbon dan nitrogen dari *biochar* dilakukan dengan menggunakan alat analisa LECO (CB-2000, LECO Cooperation, Michigan, USA), sedangkan pengukuran konsentrasi unsur makro dan mikro dengan menggunakan *Induktif Coupled Plasma (ICP) spektrofotometer* juga dilakukan di tempat yang sama. Sebelum analisis, *biochar* disamakan ukurannya dengan dihancurkan menggunakan *ball mill* dan dilakukan pengayakan setelahnya. Faktor pengkayaan (*enricment factor*) atau *recovery index* dari masing masing unsur hara

dihitung berdasarkan formula yang telah dikembangkan oleh Hossain, (2011).

Gugus fungsional yang terdapat di dalam *biochar* tersebut yang dideteksi oleh *Fourier Transformasi Infrared (FTIR) spectrometer* (Perkin Elmer-100). Analisis gugus fungsional organik dalam *biochar* berdasarkan Arts *et al.*,(2008). Sedangkan karakteristik visual dicitrakan dan diidentifikasi dengan menggunakan mikroskop elektron: SEM (Scanning Cambridge S200 EM). Luas permukaan spesifik dari sampel *biochar* diukur dengan

Micromeritics, Tristar II 3020 analisa seperti yang telah diuraikan oleh Jones *et al.*, (2011).

Hasil dan Pembahasan

Pada suhu tinggi 530°C rata-rata biochar yang dihasilkan sebesar 190 g kg⁻¹, setara dengan 19% dari bahan baku awal. Hasil *biochar* rata-rata pada suhu 440°C dan 470°C adalah 407 g kg⁻¹ dan 273 g kg⁻¹, setara dengan 40.7% dan 27.3 % (Tabel 2). Hubungan antara hasil dan suhu ditemukan *kinetika degradasi exponential*. Degradasi *biochar* dari willow ini lebih cepat dari yang tercatat dalam studi sebelumnya menggunakan biomassa pinus (Chan *et al.*, 2008) atau rape-seed (Karaosmanoglu *et al.*, 2000). Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 440°C ke 530°C menyebabkan penurunan hasil *biochar* sebesar 60%. Hal ini disebabkan oleh hilangnya senyawa *volatile* dari bahan biomassa willow selama pembakaran. Penurunan eksponensial dalam hasil *biochar* juga diamati pada studi sebelumnya oleh Hossain *et al.*, (2011) dan Nguyen dan Lehman (2009).

Peningkatan suhu dari 440°C ke 530°C, secara dramatis meningkatkan nilai pH sampai hampir 2 kali lipat (pH = 10), jika dibandingkan dengan pH bahan baku awal (pH = 5.8). Hal ini dapat dikaitkan dengan fakta bahwa di dalam *biochar* terjadi peningkatan konsentrasi sejumlah kation seperti: (K, Mg, P, Cu, Mn, Na dan Zn). Nilai pH *biochar* pada suhu 530°C dalam penelitian ini lebih tinggi dari yang diperoleh dari tebu ampas tebu yang *dipyrolyses* pada suhu 600°C (pH = 7.7)

(Inyang *et al.*, 2010) atau sekam padi (pH = 8.6) (Knoblauch *et al.*, 2010). Dapatlah diambil kesimpulan bahwa *biochar* Willow tepat digunakan untuk perbaikan pH tanah, serta memberikan sejumlah nutrisi penting bagi tanah dan tanaman. Oleh karena itu dapatlah disarankan bahwa *biochar* Willow dapat digunakan untuk aplikasi pada tanah asam (pH < 3 atau 4). Karbon (C) adalah elemen dominan di dalam *biochar* diikuti dengan kalsium (Ca) dan nitrogen (N), sedangkan konsentrasi kalium (K) ditemukan hampir dua kali lipat dari suhu *pyrolysis* dari 440°C ke 530°C, peningkatan ini juga ditemukan pada unsur fosfor (P). Total N di dalam biochar menurun jauh pada suhu yang lebih tinggi, demikian pula dengan unsur lainnya seperti sulfur (S) yang hanya setengah dari jumlah konsentrasi di bahan baku awal. Ini menunjukkan bahwa unsur N dan S mudah menguap selama pembakaran. Pada percobaan lain, perlakuan dengan peningkatan suhu 300°C 600°C atau meningkatkan jumlah unsure mikro Fe dalam biochar dari residu biomassa jagung dari 500 mg kg⁻¹ menjadi 800 mg kg⁻¹ dan 30 menjadi 1300 mg kg⁻¹ pada biochar yang diproduksi dari kayu oak (Nguyen dan Lehman, 2009). Konsentrasi unsur makro dan mikro willow biochar dalam kisaran hasil penelitian dari Nguyen dan Lehman, (2009). Terdapat pengkayaan unsur hara di dalam produk akhir *biochar* yang diindikasikan dengan nilai > 1. Hal ini menunjukkan bahwa kadar unsur hara di dalam *biochar* lebih tinggi dari kadar unsur yang ada di dalam bahan baku awal.

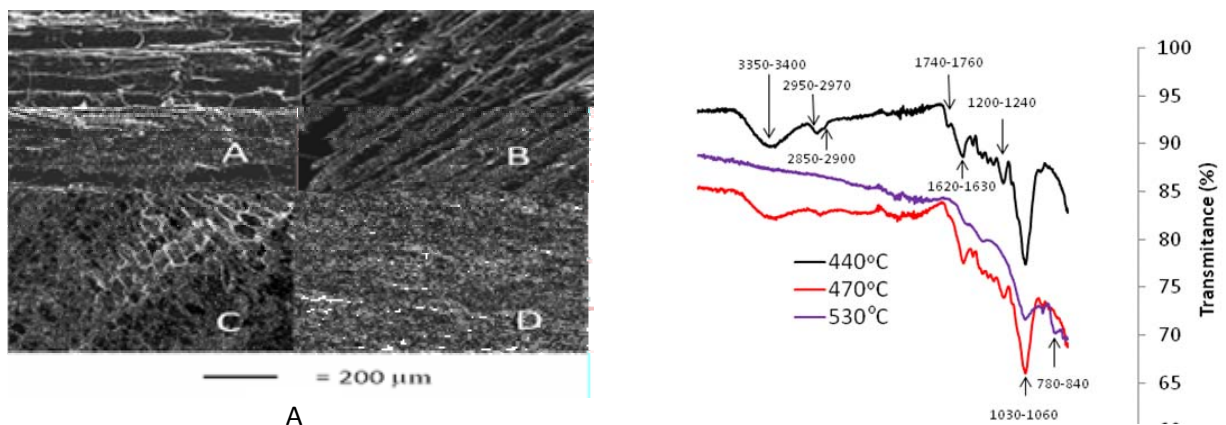
Tabel 2. Kandungan unsur hara dalam biochar pada berbagai suhu pyrolysis

Berat (%)	Biomassa Willow	Kadar biochar (440°C)	Faktor pengkayaan (440°C)	Kadar biochar (470°C)	Faktor pengkayaan (470°C)	Kadar biochar (530°C)	Faktor pengkayaan (530°C)
	100	40.7	-	27.3	-	19.0	-
pH	5.8	6.5	-	9.1	-	10	-
<i>Unsur makro (%)</i>							
C	51.5	51.3	0.41	54.6	0.29	43.7	0.16
N	1.5	1.0	0.27	1.0	0.18	0.8	0.10
Ca	2.4	1.0	0.17	2.3	0.26	1.9	0.15
K	0.1	0.8	3.26	1.5	4.10	1.1	2.09
Mg	0.2	0.2	0.41	0.4	0.55	0.4	0.38
P	0.1	0.2	0.81	0.6	1.64	0.5	0.95
S	0.1	0.1	0.41	0.1	0.27	0.1	0.19
<i>Unsur mikro (mg kg⁻¹)</i>							
Na	0.0	0.0	0.00	0.1	0.00	0.1	0.00
B	39.3	24.2	0.25	48	0.33	35.4	0.17
Cu	9.9	11.6	0.48	24.7	0.68	27.8	0.53
Fe	366.3	242.1	0.27	439.9	0.33	601.7	0.31
Mn	445.3	173.8	0.16	397.7	0.24	320.5	0.14
Zn	345.1	212.7	0.25	476.8	0.38	438.5	0.24

Kondisi ini dijumpai pada unsur kalium (K) pada *biochar* Willow (440°C : 3.26), *biochar* Willow (470°C : 4.10), dan *biochar* Willow (530°C : 2.09). Selain itu kondisi serupa dijumpai pada unsur phosphor (P) di dalam *biochar* Willow yang diproduksi pada suhu 470°C (1.64).

Struktur dari *biochar* dihasilkan pada temperatur yang berbeda, disajikan pada

Gambar 3a. SEM dapat mengidentifikasi perbedaan struktur dan morfologi dari bahan baku dan *biochar* diproduksi. Bahan baku Willow memiliki pori-pori besar sedangkan *biochar* dihasilkan memiliki luas permukaan yang lebih luas dengan ukuran pori lebih kecil.



Gambar. 3a SEM biochar : (A) willow (bahan baku), (B) biochar v (440°C), (C) biochar willow (470°C) dan (D) biochar willow (530°C); 3b. Analisis gugus fungsional di dalam biochar menggunakan IR spectroscopy

SEM juga menunjukkan kronologis kenaikan luas permukaan dengan makin kecilnya ruang pori struktur sel dari sekitar 100-200 μm di bahan baku (A) menjadi 10-50 μm di *biochar* Willow yang diproduksi pada suhu tertinggi (530°C). Pori ini lebih besar lima kali lipat dari *biochar* yang diproduksi dari tongkol jagung dengan rata ukuran mencapai 5 sampai 10 μm (Fuertes *et al.*, 2010).

Karakteristik dan kualitas *biochar* dapat pula diidentifikasi dari signal gugus fungsional komponen organik menggunakan FTIR. Setiap puncak panjang gelombang identik dengan kelompok fungsional tertentu. Secara garis besar, spektrum dari *biochar* dihasilkan pada temperatur yang berbeda-beda sangatlah kontras (Gambar 3b). Peningkatan suhu *pyrolysis* dari 440°C ke 470°C menurunkan intensitas beberapa signal dari gugus fungsional antara lain: -OH dari *cellulose* pada 3350-3400 cm^{-1} , *ester* pada 1740-1760 cm^{-1} dan gugus *alkil aliphatic* pada 2850-2900 cm^{-1} .

Dalam studi ini, efek dari suhu *pyrolysis* yang lebih tinggi (530°C) dapat menghilangkan kelompok fungsional *lignoselulose* (misalnya: -OH dari *cellulose*, *polysacharida*, *ester*, *alkil aliphatic*, CO-dan-OH, C=C, *amine* dan *carboxylic*), bersama dengan peningkatan kehadiran struktur *aromatic*. Suhu tinggi menimbulkan reaksi kuat dalam melepaskan beberapa senyawa *volatile* (mudah menguap) yang dapat dikaitkan dengan hilangnya sejumlah unsur makro seperti C, N dan S. Hal ini sejalan dengan pengamatan oleh Chen *et al.*, (2008) yang telah mengamati perubahan spektral IR *biochar* dari pinus dan Ozcimen dan Karaosmanoglu, (2004) yang memonitor perubahan karakteristik dan kualitas *biochar* dari *rape-seed*.

Kesimpulan

1. Suhu pemanasan dalam proses *pyrolysis biochar* dari tanaman *bio-energy*

Willow mempengaruhi karakteristik dan kualitas produk akhir yang dihasilkan, meskipun secara *visual* (kasat mata) tidak terdapat perbedaan yang mencolok. Perbedaan ini dapat diidentifikasi dari status unsur yang tertinggal di dalam *biochar*, signal panjang gelombang gugus fungsional organik (spektrum IR) atau dengan detail identifikasi ruang pori atau luas permukaan *biochar* menggunakan mikroskop electron.

2. Kualitas *biochar* dari tanaman *bio-energy* Willow yang terbaik dihasilkan pada suhu 470°C dengan lama pemanasan selama 15 menit. Hal ini disebabkan terdapatnya pengkayaan sejumlah unsur hara penting Kalium (K) dan Phospor (P) didalam produk akhir yang dihasilkan. Selain itu pula beberapa signal panjang gelombang gugus fungsional organik masih dapat dideteksi keberadaanya.

Daftar Pustaka

- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Robertsso, A.H.J., Potts, J.M., Defarge, F.L, Gogo, S., Comont, L., Disnar, J.N. and Francez, A.J. 2008. FTIR spectroscopy can be used a screening tool for organic matter quality in generating cutover peat lands. *Soil Biology and Biochemistry*. 40. p 515-527.
- Ayloot M.J, Casella, E., Tubby, I., Street N.R., Smith, P. and Taylor, G. 2008. Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short rotation coppice in the UK. *New Phytologist*. 178. p 358-370.
- Boateng, A. A. 2007. Characterization and thermal conversion of charcoal derived from fluidized bed fast *pyrolysis* oil production of switchgrass. *Industrial Engineering Chemistry*. 46. 8857-8862.
- Bridgwater, A.V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*. 91. p 87-102.
- Bridgwater, A.V. and Peacocke, G. V. C. 2000. *Fast Pyrolysis Processes for Biomass*.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews. 4. p 1-73.
- Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. and Joseph, S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. 45. 629–634.
- Chen, B., Zhou, D. and Zhu L. 2008. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental Science Technology*. 42. p 5137-5143.
- Czimczik, C.I. and Maseillo, C. A. 2007. Control on black carbon storage in soils. *Global Biochemical Cycle*. 21.B3005.
- Di Blasi C. 2005. Kinetics and modeling of biomass pyrolysis. In: Bridgwater AV, editor. *Fast Pyrolysis of Biomass: a Handbook Volume 3*, Newbury: CPL Press. p. 121-146
- Faaij, A. P. C. 2006. Bio-energy in Europe: Changing technology choices. *Energy Policy*. 34. p 322-342.
- Fuertes, A.B., Arbestain, C., Sevilla, M., Macia-Agullo, J.A., Fiol, S., Lopez, R., Smernik, R.J., Aitkenhead, W.P., Arce, F. and Macias, F. 2010. Chemical and structural properties of carbonaceous product obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonization of corn stover. *Australian Journal of Soil Research*. 48. p 618-626.
- Heller, M.C., Keolian, G.A. and Volk, T.A. 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*. 25. p 147-165.
- Hossain, K.M., Strezov, V., Chan K.Y., Ziolkowski, A. and Nelso, P.F. 2011. *Journal of Environmental Management*. 92. p 223-228.
- International Energy Agency (IEA) Bioenergy. 2007. Biomass Pyrolysis. IEA Bioenergy <<http://www.ieabioenergy.com>>.
- Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W. and Zimmerman, A.R. 2010. Biochar from an anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresources Technology*. 101. p 8868-8872.
- Ingemarsson, A., Nilsson, M., Pedersen, J. R. and Olsson, J.O. 1999. Slow pyrolysis of willow (*Salix sp*) studied with GC/MS and GC/FTIR/FID. *Chemosphere*. 39. p 103.112.
- Jones, D.L., Murphy, D.V., Khalid, M., Ahmad, W., Edwrad-Jones, G. and DeLuca, T.H. 2011. Short-term biochar-induced increase in CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biology and Biochemistry*. 43. p 1723-1731.
- Karaosmanoglu, F., Ergudenler, A.I. and Sever, A. 2000. Biochar from the straw stalk of rapeseed plant. *Energy and Fuels*. 14. p 336-339.
- Knoblauch, C., Maarifat, A.A., Pfeiffer, E.M. and Haefele, S. M. 2011. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 43. p 1768-1778.
- Klasnja, B., Kopitovic, S. and Orlovic, S. 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass and Bioenergy*. 23. p 427-432.
- Lehman, J., Da Silva, J.P.J., Rondon, M., Da Silva, C.M., Greenwood J., Nehls T., Steiner C. and Glaser, B. 2002. Slash and Char : a feasible alternative for soil fertility management in the Central Amazon ?. Paper on 17th WCSS Symposium, 14-21 August 2002. Thailand
- Liu, R., Deng, C. and Wang, J. 2010. Fast pyrolysis of corn straw for bio-oil production in a bench scale fluidized bed reactor. *Energy Sources*. 32. p 10-19.
- Luo, Y., Durenkamp, M., De Nobili, M., Lin, Q. and Brookes, P.C. 2011. Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH. *Soil Biology and Biochemistry*. 43. p 2304–2314.
- Mulligan, C.J., Strezov, L. and Strezov, V. 2010. Thermal decomposition of wheat straw and malle residue under pyrolysis conditions. *Energy Fuels*.
- Nguyen, B. and Lehmann, J. 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*. 40. p 846–853.
- Ozcimen, D. and Karaosmanoglu, F. 2004. Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake. *Renewable Energy*. 29. p 779-787.

- Ozcimen, D. and Mericboyu, A. E. 2010. Characterization of biochar and bio-oil sample obtained from carbonization of various materials. *Renewable Energy*. 35. p 1319-1324.
- Park, B.B., Yanai, R.D., Sahm J.M., Lee D.K. and Abrahamson L.P. 2004. Wood ash effect on plant and soil in a willow bioenergy plantation. *Water, Air and Soil Pollution*. 159. p 209-224.
- Scala F., Chirone, R. and Salation, P. 2003. The influence of fine char particles burnt of bed agglomeration during the fluidized bed combustion of biomass fuel. *Fuel Processing Technology*. 84. p 229-241.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E, Krull, E. and Bol, R. 2009. Biochar, climate change and soil : A review to guide future research. CSIRO Land and water Science Report Series. ISSN : 1834-6618.
- Spokas, K. A., Koskinen, W. C., Baker, J. M. and Reicosky, D. C. 2009. Impact of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicide in Minnesota soil. *Chemosphere*. 77. p 574-581.
- Titirici M.M., Thomas, A. and Antoinette, M. 2007. Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO₂ problems?. *New Journal of Chemistry*. 31. p 787-789.
- Valmari, T., Kaupinnen, E.I., Kurkela, J., Jokiniemi, J.K., Sfris, S. and Revitser, H. 1998. Fly ash formation and bed deposition during fluidized bed combustion of willow. *Journal Aerosol Science*. 29. p 445-459.
- Van de Velden, M., Baeyens, J. and Boukis, I. 2008. Modeling CFB biomass pyrolysis reactors *Biomass and Bioenergy*. 2008: 32 2. p 128-139
- Van de Velden, M., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B. and Dewil, R. 2010. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction *Renewable Energy*. 35. p 232-242
- Volk, T. A., Verwijt, T., Tharakan, P.J., Abrahamson, L.P. and White, E.H. 2004. Growing fuel : A sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontier in Ecology and the Environment*. 2. p 411-418.
- Walle, I.V., Van Camp, N., Van de Castele, L., Verheyen, K. and Lemeur, R. 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I – biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy*. 31. p 267–275.
- Zhang, M., Chen, H.P., Gao, Y., He R.X., Yang, H.P., Wang X.H. and Zhang, S.H. 2010. Experimental study on bio-oil pyrolyses/gasification. *Bioresources*. 5. p 135-146.