

PIROLISIS ALANG – ALANG (*IMPERATA CILINDRICA*) SEBAGAI BIOENERGI DI PROVINSI BANTEN INDONESIA

PYROLYSIS OF ALANG – ALANG (*IMPERATA CILINDRICA*) AS BIOENERGY SOURCE IN BANTEN PROVINCE INDONESIA

(disubmit 25 April 2019, direvisi 28 Juni 2019, diterima 30 Juni 2019)

Syarif Hidayat^{1,2}, Fitriyah², Muhammad S. Abu Bakar¹, Neeranuch Phusunti³,

¹*Faculty of Integrated Technologies, Universiti Brunei Darussalam, Tungku Link, Gadong,
BE1410, Negara Brunei Darussalam*

²*Environmental Engineering Universitas Banten Jaya, Ciwaru raya No. 73, Serang – Banten
Indonesia, 42117*

³*Department of Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla,
90112, Thailand*

*Corresponding Author: hidayat231984@gmail.com

ABSTRAK

Bahan bakar fosil sumber energi memiliki keterbatasan dan tidak terbarukan, penggunaan bahan bakar fosil secara terus menerus mengakibatkan krisis energy dan lingkungan. Rumput liar pada saat ini memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai generasi kedua biomasa. Hal ini memiliki keuntungan seperti tumbuh dengan cepat, mudah tumbuh, perawatan yang minimal, dapat tumbuh pada lahan kritis dan tersedia dalam jumlah yang banyak. Dalam upaya mengembangkan generasi kedua biomasa, penelitian ini secara sistematis memberikan perspektif ekologi dan teknologi proses dalam mengembangkan bioenergi dari alang – alang di Provinsi Banten. Pada penelitian ini karakterisasi alang – alang dilakukan untuk menentukan sifat – sifat dan potensi bioenergy. Sedangkan *fixed bed* pirolisis dilakukan untuk mengidentifikasi potensi produksi bio-oil dari proses pirolisis. Sementara analisis karakterisasi bio-oil dilakukan untuk melihat potensi *chemical building block* sebagai sumber energi. Analisis sifat kimia dan fisika alang – alang dilakukan melalui *thermogravimetric analysis*, *proximate analysis*, *elemental analysis*, *compositional analysis*, *calorific value*. Sedangkan analisis potensi bio-oil di lakukan melalui *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS). Dari hasil karakterisasi mengindikasikan bahwa alang – alang memiliki nilai kalori 18,05 MJ/kg, dengan ash konten yang rendah, dan tinggi kandungan volatile. Analisis dengan GC/MS menunjukkan komponen utama dalam bio-oil dikelompokan ke dalam *furan*, *ketone*, *phenol* dan *anhydrosugar* yang merupakan *platform* yang dapat dikonversi menjadi sumber energi. *Fixed bed pyrolysis* atau *fixed bed* pirolisis alang – alang menunjukan, bahwa *yield* bio-oil meningkat sebagaimana peningkatan temperatur dan puncaknya pada suhu 500 °C dengan persentase 37,91%.

Kata Kunci: Alang - alang, Pirolisis, GC/MS, *Thermogravimetric analysis*, Bioenergi

ABSTRACT

Fossil fuel as a source of energy have limitation and are non-renewable. Continuous utilisation of fossil fuels as energy source can lead to energy crisis and environmental impact. Perennials grasses (alang – alang) are currently being developed as a suitable second-generation biofuel feedstock. It has advantages such as rapid growth rate, easy to grow, minimal maintenance and utilise marginal land without competing with food supply. Taking into account of the various challenges attributed to the transformation of second-generation biomass for energy production, this work systematically looks at the ecological perspective and the availability for bioenergy production from alang – alang in Banten Province. Biomass characterisation is carried out to determine the properties and bioenergy potential. Fixed bed pyrolysis study was conducted to predict the potential production of bio-oil from the pyrolysis process. GC/MS study is conducted to identify the potential building blocks of value-added chemicals from alang – alang. The physicochemical properties of feedstock was thoroughly evaluated using thermogravimetric analysis, proximate analysis, elemental analysis, compositional analysis, calorific value. The analysis of the potential of bio-oil was carried out through GC / MS. Characterisation results indicate that alang - alang has a calorific value of 18.39 MJ/kg, with low ash content and high percentage of volatile matter. Analysis from Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) showed that majority of the chemical groups in the bio-oil contained furan, ketone, phenol and anhydro-sugars. Phenolic and furanic were found as major compounds in bio oil. Phenolic, furanic, ketonic and anhydrosugars are promising renewable platform compounds derived from pyrolysis of alang – alang. The compounds can be further converted to chemicals or fuels. The fixed-bed pyrolysis of alang - alang showed that the yield of bio-oil increases as the temperature increases and peaks at 500°C with 38.79%.

Keywords: Alang - alang, Pyrolysis, GC/MS, Thermogravimetric analysis, Bioenergy

PENDAHULUAN

Provinsi Banten terletak antara 105° 01'11" sampai 106° 07"12" Bujur Timur, serta 05° 07'50" sampai 07° 01'01". Luas wilayah Provinsi Banten berdasarkan Undang Undang Nomor 23 Tahun 2000 adalah 8.651,20 km² (100002,312 ha). Sebagai daerah pertanian dan industri, Provinsi Banten memiliki potensi besar untuk memanfaatkan energi terbarukan sebagai sumber energi, khususnya *bio-oil*. Keamanan energi adalah kondisi yang sangat

penting untuk dipertimbangkan bagi negara manapun, termasuk Indonesia. Kondisi ini penting untuk memastikan pembangunan berkelanjutan. Sektor energi di Provinsi Banten sangat bergantung bahan bakar fosil, minyak dan gas. Banten dan Jawa barat memiliki kontribusi jejak karbon tertinggi pada 95 metrik ton CO₂ per kapita. Di antara sumber energi terbarukan, biomasa berbasis generasi kedua dianggap sumber energi yang memiliki prospek di masa yang akan datang. Keragaman yang luas dari biomasa telah

mendorong penelitian dan pengembangan teknologi yang mampu menghasilkan bahan bakar dan potensi platform kimia. Alang – alang sebagai salah satu biomasa dapat dimanfaatkan sebagai potensi sumber energi, Hal ini menunjukan memiliki kemampuan untuk tumbuh di berbagai jenis tanah tanpa perlakuan nutrisi khusus dan dapat ditemukan di berbagai habitat, padang rumput, tanaman tahunan yang dibudidayakan, perkebunan, lahan pertanian yang ditinggalkan, tanggul jalan dan kereta api, hutan pinus dan kayu keras, tempat rekreasi dan area kritis (MacDonald, 2004). Garrity et. al (1996) telah memperkirakan 4% dari total tanah di Asia yang tertutupi oleh alang – alang. Saat ini, tidak ada penelitian tentang alang – alang sebagai potensi biomassaa di Provinsi Banten. Berdasarkan Garrity et. al(1996), estimasi luas area untuk alang – alang di Provinsi Banten adalah 40000 ha.

Alang – alang adalah spesies rumput famili *Poaceae*, dan dikenal sebagai salah satu gulma paling mudah didapatkan. Ada sembilan spesies imperata di seluruh dunia dan terdistribusi secara luas ke Asia timur dan Tenggara, India, Mikronesia, Melanesia, Australia, dan Afrika timur dan selatan (MacDonald, 2004). Tumbuhan ini dapat tumbuh di ketinggian 30 - 200 cm dan

memiliki lebar daun sekitar 2 cm. Sistem reproduksi alang – alang dapat dibentuk dari fragmen rimpang sekecil 0,1 gram dengan cara direproduksi secara seksual dan juga dapat dibentuk melalui hubungan seksual melalui pembungaan dan produksi benih (A.O.Ayeni & W.B.Duke, 1985). Alang - alang paling baik diadaptasi dan tumbuh subur di bawah sinar matahari penuh dengan suhu optimal 30 °C (Brook, 1989). Alang-alang ini memiliki kemampuan untuk tumbuh di berbagai jenis tanah tanpa perlakuan nutrisi khusus dan dapat ditemukan di berbagai habitat, padang rumput, tanaman tahunan yang dibudidayakan, perkebunan, lahan pertanian yang ditinggalkan, tanggul jalan dan kereta api, hutan pinus dan kayu keras, area rekreasi dan area gundul (MacDonald, 2004). Kondisi cuaca dan habitat di Provinsi Banten dapat dianggap optimal, di mana Alang - alang sebagai tanaman C₄ akan memiliki keunggulan dibandingkan tanaman C₃. Alang - alang milik rumput abadi C₄ dan mengasimilasi CO₂ melalui jalur fotosintesis C₄ (Paul, Elmore, & others, 1984). Jalur fotosintesis C₄ akan mengubah energi dari sinar matahari menjadi energi kimia dan digunakan untuk menghasilkan senyawa organik yang merupakan blok bangunan biomasa (McKendry, 2002a). Efisiensi tinggi fiksasi CO₂ menjadi biomassaa adalah salah satu faktor

penting dalam pemilihan tanaman energi. Fotosintesis C₄ adalah bentuk fotosintesis yang paling efisien karena modifikasi penekan fotorespirasi mereka memiliki kemampuan untuk memaksimalkan fiksasi CO₂ daripada pabrik fotosintesis C₃ (Ehleringer & Cerling, 2002; Sage, Christin, & Edwards, 2011; Sage & Zhu, 2011; Taniguchi, Weber, & von Caemmerer, 2016).

Pada saat ini alang – alang digunakan untuk atap rumah tradisional (51%), tanaman obat (13%), pakan ternak (22%) dan pengendalian erosi (8%) (Chikoye, Manyong, & Ekeleme, 2000; Villaseñor & Lamadrid, 2006). Selama beberapa dekade, alang - alang telah menjadi gulma invasif bagi petani. Akan menarik untuk menggunakan alang-alang sebagai sumber tanaman energi. Investigasi dan penelitian tentang alang-alang sebagai bioenergi relatif baru, masih perlu dikembangkan. Beberapa literatur telah membahas karakterisasi dan eksplorasiannya sebagai biomassa potensial. Kamaroddin et. al (Kamaroddin, Nyakuma, Oladokun, Abdullah, & Amin, n.d.) menyelidiki sifat bahan bakar dari alang-alang, K. Promdee & T. Vitidsant (Kittiphop Promdee & Vitidsant, 2013a) menyelidiki sintesis bio-oil oleh pirolisis alang-alang dan karakteristik pirolitik dan studi kinetik diselidiki oleh Li et. al (2016) and Oladokun et al. (2016).

Proses termokimia dan biokimia adalah dua teknologi proses utama untuk konversi biomassa. Dalam beberapa tahun terakhir, ada peningkatan penggunaan teknologi termokimia yang mengubah biomassa menjadi bahan bakar dan bahan kimia yang berharga. Termokimia utama dari teknik konversi biomassa adalah pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis. Di antara proses termo-kimia, pirolisis telah mendapat perhatian khusus karena dapat mengubah biomassa langsung menjadi produk padat, cair (bio-oil) dan gas oleh dekomposisi termal biomassa tanpa adanya oksigen (McKendry, 2002b; Patel, Zhang, & Kumar, 2016). Pirolisis biomassa adalah serangkaian reaksi yang sangat kompleks, yang tergantung pada banyak variabel yang berbeda, seperti bahan baku, kadar air, waktu tinggal dan suhu. Dalam upaya menghasilkan bio-oil dengan sifat-sifat yang diinginkan, analisis karakterisasi biomassa dan GC/MS adalah teknik yang cocok untuk mencapai hal ini. Pemahaman dasar karakteristik pirolisis dari lignoselulosa utama adalah dasar dan pada dasarnya penting untuk konversi termokimia biomassa menjadi produk berharga (Mabrouki, Guedri, Abbassi, & Omri, 2016; Yang et al., 2006).

Jumlah dinding sel total sekitar 80% dari berat kering tanaman dan terutama terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin. Tanaman rumput biasanya ditandai dengan serat yang terikat longgar dan memiliki proporsi lignin yang lebih rendah, tidak seperti biomasaa kayu yang ditandai oleh pertumbuhan lambat dan terdiri dari serat terikat kuat dengan permukaan luar yang keras. Lignin adalah kopolimer amorf cross-linked yang menggabungkan dari polimerisasi acak dari tiga komponen utama p-hidroksifenil (H), unit guaiacyl (G), dan syringyl (S). Selulosa dan hemiselulosa adalah polisakarida yang memiliki lebih dari 2 struktur monosakarida yang dihubungkan bersama secara kovalen oleh hubungan glikosidik. Selulosa adalah polisakarida yang terdiri dari polimer linier unit D-glukosa yang saling terhubung melalui ikatan β -1,4-glikosidik. Hemiselulosa adalah heteropolysaccharide yang mengandung banyak monomer gula yang berbeda (terutama xylose, mannose, galactose, dan arabinose) (Galletti & Bocchini, 1995; Yu, Chua, & Wu, 2016; Zhou, Li, Mabon, & Broadbelt, 2017). Proporsi untuk menentukan sifat-sifat ini didasarkan pada jumlah selulosa, hemiselulosa, lignin dan ekstraktif yang bervariasi sebagai blok bangunan utama biomasaa. Selain itu, rumput mengandung karbohidrat dinding non-sel, seperti sukrosa,

fruktosa, glukosa dan pati (Johnson, Barbour, & Weyers, 2007; McKendry, 2002a; McLaughlin, Samson, Bransby, & Wiselogel, 1996). Akibatnya, perbedaan proporsi blok bangunan biomasa akan berkontribusi pada distribusi komposisi kimia dalam produk cair dari produk degradasi termal biomasa dan juga berkontribusi signifikan terhadap jumlah senyawa terokogenasi, campuran organik, kental, dan asam kompleks (Azeez, Meier, Odermatt, & Willner, 2010; Galletti & Bocchini, 1995).

Table 1. Platform bahan kimia itu bisa didapatkan melalui pirolisis spesies rumput (Banks, Nowakowski, & Bridgwater, 2014; Greenhalf et al., 2012; Imam & Capareda, 2012; Kim, Oh, Hwang, Moon, & Choi, 2014; Lee, Tsai, Tsai, & Lin, 2010; Park et al., 2012; K Promdee & Vitidsant, 2013)

Platform Chemicals	Possible Derivatives
Acetic acid	Acetic anhydride, Ethyl acetate, Vinyl acetate, Terephthalic acid
Furfural	Furan, Tetrahydrofuran, Furfuryl alcohol, Maleic anhydride, 2-(5H)-Furanone, Methyl furan, 2-Hydroxymethyl-5-vinyl furan, Maleic acid, Levulinic acid, Tetrahydrofurfuryl alcohol
1,4-Butanediol	Tetrahydrofuran, Adipic acid, γ -Butyrolactone,
Levoglucosan	5-Hydroxymethylfufural, Furfural, Acetic acid, 1,6-Anhydro-beta-D-glucofuranosa, 1,4:3,6-

	dianhydro- α -D-glucopyranose
5-Hydroxymethylfurfural	2,5-Furan dicarboxylic acid, 5-Hydroxymethylfuroic acid, Furandialdehyde, 2,5-Dihydroxymethylfuran, 2,5-Dihydroxymethyltetrahyd rofuran
Benzene	Styrene, Phenol, Cumene, Cyclohexane, Cyclohexanone
Toluene	Benzoic acid, dinitrotoluene, Toluene diisocyanate, Diaminotoluene
Xylene	Terephthalic acid, Isophthalic acid
Phenol	Cyclohexanone, Cyclohexanol, Bisphenol A, Nitrophenols
Guaiacyl	Propyl guaiacol, Eugenol, Iso-eugenol, Methoxyhydroxy phenyl glycol, Guaiacol, Creosol, Vanillin, Vanillic acid, Vanillyl alcohol, Coniferyl alcohol, Ferulic acid,
Syringyl	Syringeugenol, Syringol, Syringyl Creosol, Syringyl alcohol, Syringaldehyde,

Tidak ada studi menyeluruh tersedia pada produksi bioenergi dari alang - alang di Provinsi Banten. Makalah ini membahas pemanfaatan sumber daya alang - alang untuk potensi biomasa dan produksi bio - oil di Provinsi Banten melalui pirolisis dalam hal karakterisasi dan identifikasi bahan kimia yang memiliki bernilai tambah. Tinjauan potensi deskripsi singkat potensi alang alang sebagai

tanaman bio-energi di Provinsi Banten dan penyelidikan eksperimental dalam hal karakterisasi, identifikasi produk-produk berharga melalui GC / MS dan sintesis minyak bio melalui fixed bed pirolisis.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat penelitian

Penelitian ini dilakukan di Biomasa Laboratorium di Universiti Brunei Darussalam, Brunei Darussalam, Lab. Terpadu Universitas Lampung, Indonesia dan Lab. Faculty of Science, *Prince of Songkla University*, Thailand. Waktu penelitian ini dimulai tanggal 1 Desember 2018 sampai dengan 31 Januari 2019.

Preparasi Biomasa dan Karakterisasi

Sampel alang - alang yang digunakan dalam percobaan diperoleh dari Kota Serang, Provinsi Banten. Sampel ditumbuk dan diayak dengan ukuran partikel kecil dengan kisaran 0,125 mm - 0,25 mm dan kemudian dikeringkan pada 45 °C selama 24 jam. Analisis *Ultimate* dilakukan menggunakan *CE Instruments Flash EA 1112 Series CHNS-O analyzer* (*Thermo Quest Italy*). Analisis *proximat* menentukan kadar air, kadar abu, bahan mudah menguap dan karbon tetap sesuai dengan metode uji standar ASTM D3173,

ASTM D3174, ASTM D3175 masing-masing. Komposisi unsur (C, H, N, O, dan S) diperoleh secara kering. Nilai kalor (HHV) ditentukan menggunakan bom kalorimeter berdasarkan metode uji standar ASTM D2015. Untuk memastikan reproduktifitas dan pengulangan data, percobaan diulang lima kali. Nilai percobaan HHV dibandingkan dengan korelasi menggunakan data yang diperoleh dari analisis unsur. Korelasi dikembangkan oleh Ayse Ozyuguran, et.al (2018).

$$\text{HHV} = 0.2791\text{N} + 0.3984\text{C} + 0.4030\text{H} - 1.8644\text{S} - 0.03153\text{O}$$

Compositional analysis dilakukan dengan metode NREL. Untuk mendapatkan jumlah ekstraktif, 100 mL air distilate ditambahkan untuk 1 g sampel dan kemudian dipanaskan pada 105 °C selama 2 jam. Sampel disaring dan dicuci dengan air destilasi dan dikeringkan pada suhu 105 °C selama 12 jam. Perbedaan berat sebelum dan sesudah hidrolisis dihitung sebagai jumlah ekstraktif. 100 mL larutan 0,5 M H₂SO₄ ditambahkan ke residu sampel dan dipanaskan pada suhu 105 °C selama 2 jam. Campuran disaring dan dicuci dengan air suling sampai pH netral dan kemudian sampel dikeringkan pada 105 °C selama 12 jam. Perbedaan antara berat sampel sebelum dan sesudah perawatan dengan 0,5 M H₂SO₄ dihitung sebagai konten hemiselulosa. Selain

itu, 10 mL H₂SO₄ 72% ditambahkan dan disimpan selama 4 jam pada suhu kamar. 100 mL air suling ditambahkan dan dipanaskan pada suhu 105 °C selama 2 jam. Campuran disaring dan dicuci dengan air destilasi sampai pH netral. Residunya dikeringkan pada suhu 105 °C selama 12 jam. Perbedaan berat residu antara sebelum dan sesudah penambahan dengan 72% H₂SO₄ berkorelasi dengan jumlah selulosa. Selanjutnya, residu dipanaskan pada 600 °C selama 2 jam. Konten lignin sesuai dengan perbedaan antara berat abu dan berat residu. Persentase ekstraktif, hemiselulosa, selulosa dan lignin didasarkan pada kadar air dan bebas abu.

Thermogravimetric analysis (TGA)

Analisis termogravimetri dilakukan dengan penganalisis termogravimetrik Perkin Elmer Pyris 1 TGA. Sampel dipanaskan pada laju pemanasan 25 °C/menit dari 40 °C hingga 900 °C di bawah atmosfer nitrogen dengan laju aliran 20 mL/menit.

Gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS)

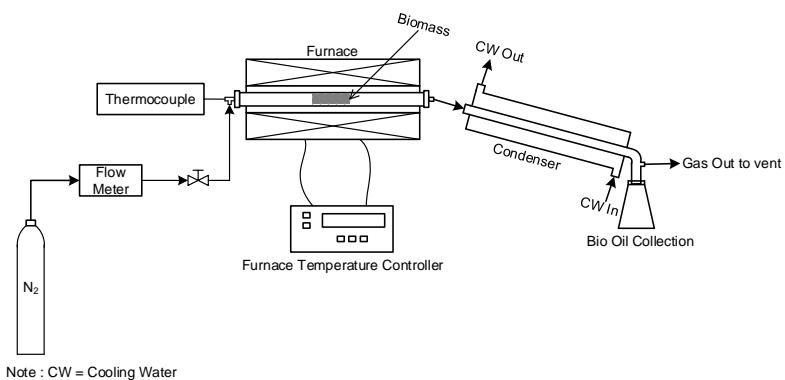
Analisis GC-MS dari bio-oil menggunakan *Varian CP-3800 Gas Chromatograph* dan digabungkan *Varian Saturn 2200 MS detector*. Pemisahan kromatografi dilakukan dalam

kolom VF 5 MS kolom kapiler semi polar (5% fenil-95% dimetilpolisilosana, 30 mx 0,25 mm ID. Ketebalan film 0,25-mm). Helium (99,9999%) digunakan sebagai gas pembawa dengan aliran konstan 1,0 mL / menit. Program suhu oven dimulai pada suhu 40 °C selama 1 menit hingga 300 °C pada tingkat pemanasan 5 °C/menit dan ditahan pada suhu 300 °C selama 7 menit. Sebelum analisis, pengenceran bio-minyak dalam aseton sebagai pelarut digunakan dan volume 1 mL larutan mengandung 5% bio. Volume sampel 0,1 mL diinjeksikan dengan rasio split 1:50. Kisaran m/z dari 40 hingga 650 dipindai untuk operasi MS dalam mode ionisasi elektron. Komponen identifikasi puncak GC-MS didasarkan pada perpustakaan spektra massa NIST.

Fixed Bed Pirolisis

Pirolisis biomasa dilakukan dalam reaktor unggul tetap *stainless steel* (ID 2,68 cm dan panjang 50 cm) yang dimasukkan ke dalam *furnace* horisontal (Carbolite Gero 300 - 3000 Tungku Listrik). Reaktor unggul tetap dipanaskan oleh tungku, yang memiliki unit pengontrol suhu. Sisi saluran masuk reaktor telah dipasang termokopel untuk memantau suhu di dalam reaktor dan konektor untuk saluran masuk gas N₂. Aliran gas nitrogen (99,9995% dari kemurnian N₂) dikontrol oleh *flow meter* dan uap pirolisis dari reaktor

dialirkan melalui kondensor. Tabung transisi bersama-sama dengan kepala reaktor tertinggal untuk meminimalkan kondensasi uap pirolisis. Kondensor menggunakan campuran air-es yang dipertahankan antara 10 hingga 15 °C. Reaktor diisi dengan 25 g sampel untuk semua percobaan. Pirolisis dilakukan pada tiga suhu; 400, 500 dan 600 °C dan suhu reaktor dinaikkan pada 25 °C / menit ke suhu akhir pirolisis (400, 500 dan 600 °C) dan laju pemanasan konsisten untuk semua percobaan. Proses pirolisis dijalankan sampai tidak ada bio-minyak yang dikumpulkan, mengambil sekitar 40 - 60 menit setelah suhu akhir tercapai. Produk akhir dari arang yang tersisa di dalam reaktor dan minyak-bio dari kondensor dikumpulkan dalam labu *Erlenmeyer*. Produk gas dari pirolisis dihitung berdasarkan keseimbangan massa umpan biomasa. Gambar 1 menunjukkan diagram skematik dari set percobaan yang digunakan dalam pekerjaan ini.



Gambar 1. Rangkaian proses fixed bed pirolisis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proximate and ultimate analysis

Hasil analisis proksimat, HHV dan analisis akhir sampel tercantum pada Tabel 2. Ini dibandingkan berbagai sampel dari literatur (Abu Bakar & Titiloye, 2013; De Conto, Silvestre, Baldasso, & Godinho, 2016; Imam & Capareda, 2012; Oladokun et al., 2016; K Promdee & Vitidsant, 2013). Alang – alang memiliki kandungan volatil 67.92% yang dapat dianggap sebagai bahan baku yang diinginkan untuk produksi energi melalui proses pirolisis dan menunjukkan produksi hasil cair yang tinggi. Kadar abu lebih rendah dibandingkan dengan sekam padi (14,83%) (Abu Bakar & Titiloye, 2013), rumput gajah (8,26%) (De Conto et al., 2016) dan *switchgrass* (4,5 - 10,5%) (Lewandowski, Scurlock, Lindvall, & Christou, 2003). Rumput gajah dalam referensi menunjukkan kadar abu yang tinggi tetapi memiliki bahan bahan mudah menguap yang sama seperti alang – alang.

Beberapa literatur telah melaporkan (De Conto et al., 2016; Mohammed et al., 2015; Strezov, Evans, & Hayman, 2008) bahwa rumput gajah memiliki kandungan fosfor dan potassium yang lebih tinggi dibandingkan rumput lainnya, dan kandungan mineral yang lebih tinggi di rumput gajah meningkatkan kadar abu meskipun

memiliki bahan mudah menguap yang serupa dengan alang – alang. Dalam proses konversi biomasaa, kandungan mineral yang tinggi akan berdampak signifikan terhadap kadar abu tinggi yang memiliki efek buruk pada produk bio-minyak, pengotoran, erosi dan slagging selama pirolisis. Hasil analisis akhir menunjukkan kandungan N dan S yang rendah, yang diinginkan karena rendahnya emisi NOx dan SOx toksik selama proses konversi.

Rasio H/C dan O/C hasil eksperimen dan bahan bakar padat dari berbagai literatur (Abu Bakar & Titiloye, 2013; Barta-Rajnai et al., 2016; Cao et al., 2016; De Conto et al., 2016; Duan, Sun, Jiang, Anthony, & Zhao, 2016; Greenhalf et al., 2012; Greenhalf, Nowakowski, Harms, Titiloye, & Bridgwater, 2013; Lin, Li, Zhang, & Wang, 2016; Lyubchik, Benoit, & Béguin, 2002; Mazlan, Uemura, Osman, & Yusup, 2015; Muthuraman, Namioka, & Yoshikawa, 2010; Pattiya, Titiloye, & Bridgwater, 2008; Silaen & Wang, 2012; Zanatta et al., 2016) dibandingkan dalam diagram Van Krevelen pada Gambar 2 di bawah ini. Dapat dilihat bahwa biomasaa memiliki karakteristik rasio O/C dan H/C yang lebih besar dibandingkan dengan batubara. Hasil percobaan IC ($H/C = 1.54$; $O/C = 0.94$) yang terletak di

wilayah biomasa menunjukkan bahwa ia memiliki rasio H/C dan O/C terendah dibandingkan dengan rumput gajah, sekam padi, rimpang singkong, singkong ampas tebu, dan ampas tebu. Rasio O/C dan H/C menggambarkan kandungan energi biomasa berdasarkan ikatan oksigen-karbon dan hidrogen-karbon yang terkandung dalam

bahan. Rasio O/C dan H/C yang lebih rendah menunjukkan kandungan energi biomasa yang lebih tinggi dan menempatkan biomasa lebih dekat ke batubara, yang digunakan sebagai bahan bakar padat (McKendry, 2002a).

Tabel 2. Hasil proksimat dan ultimatum analisis serta hasil dari berbagai literatur

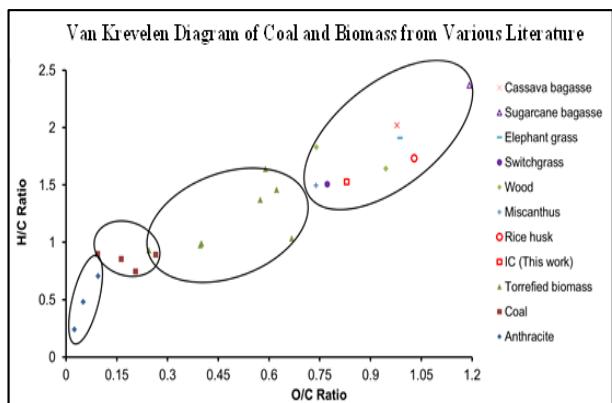
Parameter	Percobaan ini IC	Biomasa				
		IC (Oladokun et al., 2016)	IC (K Promdee & Vitidsant, 2013)	Literatur EG (De Conto et al., 2016)	SG (Imam & Capareda, 2012)	RH (Abu Bakar & Titiloye, 2013)
Proksimat Analisis* (wt. %)						
Moisture	7.14	7.50	9.30	10.63	8.40	8.43
VM	67.92	76.58	64.30	72.54	84.20	68.25
FC	16.68	15.09	16.10	19.20	11.90	16.92
Ash	8.26	0.83	10.30	8.26	3.90	14.83
Ultimat Analisis* (wt. %)						
C	41.49	43.19	41.9	39.63	42.00	39.48
H	5.32	5.92	6.20	6.31	6.10	5.71
N	1.00	0.59	1.60	1.70	0.40	0.665
O	52.06	50.17	39.8	52.16	47.40	21.1
S	0.13	0.14	0.19	0.20	0.10	< 0.1
O/C**	0.94	0.87	0.71	0.99	0.85	1.03
H/C**	1.54	1.64	1.78	1.91	1.74	1.74
Nilai Panas* (MJ/kg)						
HHV	18.05	17.03	-	15.77	19.8	17.34
HHV _{correlation}	18.47	17.91	18.03	16.79	17.62	17.36
Analisis Komposisi* (wt. %)						
Hemicellulose	25.62	-	31.42	31.31	19.20	14.04
Cellulose	48.13	-	27.96	30.37	32.00	41.52
Lignin	18.71	-	39.45	26.02	18.80	33.67
Extractives	7.54	-	-	14.86	18.50	10.77

*based on dry basis, ** molar ratio

^aby difference

VM = Volatile matter, FC = Fixed Carbon,

SG = Switchgrass, IC = Imperata cylindrica, RH = Rice husk, EG = Elephant grass



Gambar 2. Van Krevelen diagram untuk batu bara dan berbagai biomasa (Anthracite (Duan et al., 2016; Lyubchik et al., 2002), Indonesian Coal (Lin et al., 2016; Muthuraman et al., 2010; Silaen & Wang, 2012), Torrefied biomasa (Barta-Rajnai et al., 2016; Cao et al., 2016), Rice husk (Abu Bakar & Titiloye, 2013), Miscanthus (Greenhalf et al., 2013), Switchgrass (Greenhalf et al., 2012), Wood (Mazlan et al., 2015), Cassava rhizome (Pattiya et al., 2008), Elephant grass (De Conto et al., 2016), Sugarcane bagasse (Zanatta et al., 2016), Cassava bagasse (Zanatta et al., 2016), *I.cylindrica*)

Nilai HHV diperoleh dari percobaan 18,05 MJ/kg memiliki nilai yang sama dengan HHV dari korelasi 18,47 MJ/kg. Nilai kalor yang lebih tinggi (HHV) menunjukkan bahwa alang – alang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan biomasaa lainnya seperti ampas singkong dengan 15,27 MJ/kg (Zanatta et al., 2016), ampas tebu dengan 16,10 MJ/kg (Zanatta et al., 2016), rumput gajah dengan 15,77 MJ/kg (De Conto et al., 2016) dan sekam padi dengan 17,34 MJ/kg. Nilai kalor yang diperoleh secara eksperimental sedikit lebih tinggi

dibandingkan dengan literatur. Beberapa literatur (Azduwin, Ridzuan, Hafiz, & Amran, 2012; Oladokun et al., 2016) melaporkan nilai HHV dari alang – alang 17,03 MJ/kg dan 16,50 MJ/kg dengan O/C dan rasio H/C sekitar 2,3 dan 1,3, yang mungkin menunjukkan bahwa O/C dan H/C lebih tinggi. rasio dalam biomasaa sesuai dengan penurunan nilai kalornya. Korelasi juga diamati oleh Huang et. al., yang menyebutkan bahwa nilai HHV meningkat seiring dengan peningkatan konten C dan H, tetapi menurun dengan peningkatan konten N (Huang, Han, Yang, & Liu, 2009). Sheng dan Azevedo (Sheng & Azevedo, 2005) telah melaporkan bahwa HHV menurun dengan peningkatan kadar abu dan tren meningkat antara HHV dan konten yang mudah menguap.

Analisis komposisi alang – alang dari tabel 2 menunjukkan memiliki 7.54 % ekstraktif, 48,13% selulosa, 25,62% hemiselulosa dan 18,71% lignin. Alang - alang menunjukkan kandungan lignin lebih rendah dibandingkan dengan sekam padi (Abu Bakar & Titiloye, 2013) dan rumput gajah (De Conto et al., 2016). Perbedaan dalam analisis komposisi antara *I.cylindrica* eksperimental dan *I.cylindrica* literatur akan menghasilkan varian produk kimia pirolisis.

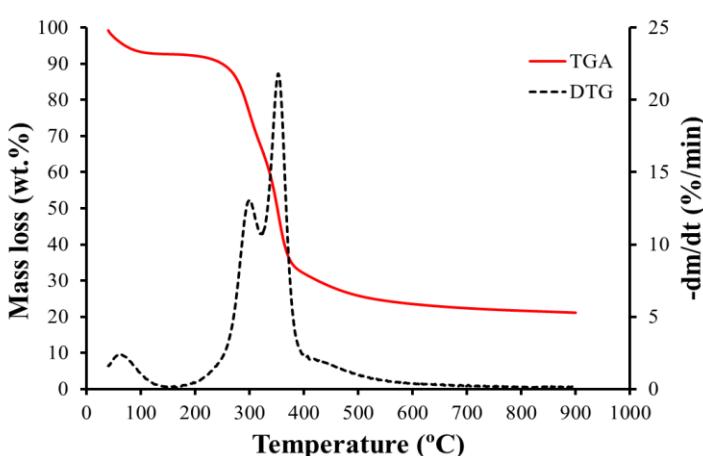
Thermogravimetric analisis

Hasil TGA/DTG dalam kisaran suhu 40 °C hingga 900 °C pada tingkat pemanasan 25 °C/menit disajikan pada gambar 3. Kurva TGA/DTG dapat dijelaskan dalam tiga tahap: penghilangan uap air, devolatisasi utama dan degradasi kecil terus menerus. Selama tahap awal, kadar air dalam biomassa dihilangkan pada kisaran 40 °C - 105 °C. Pada tahap kedua, degradasi utama terjadi dan volatil maksimum

berkembang antara 105 °C hingga 500 °C. Puncak laju degradasi adalah 21,82% / mnt dan suhu yang sesuai dengan puncak laju degradasi adalah 352,59 °C. Pada tahap ketiga, penurunan berat badan yang lebih kecil yang diamati di atas 500 °C berhubungan dengan devolatisasi struktur kimia yang lebih berat, yang juga dapat diamati selama dekomposisi termal sebelumnya. Suhu akhir adalah 900 °C yang memberikan sisa berat 21,11%

Tabel 3. Hasil fixed bed pirolisis alang - alang

Sampel	Jenis Reaktor	Temperatur Pirolisis (°C)	Yield produk pirolisis (%)			Ref
			bio-minyak	char	Non-condensable gas	
<i>Imperata Cylindrica</i>	Fixed-bed	400	33.84	31.91	34.25	percobaan yang dilakukan
		500	37.91	26.59	35.50	
		600	36.25	26.74	37.01	
<i>Imperata Cylindrica</i>	Fixed-bed	400	25.00	25.00	50.00	(Kittiphop Promdee & Vitidsant, 2013a)
		500	33.67	14.33	52.00	
<i>Cogongrass and Manillagrass</i>	<i>Twin screw (350 rpm)</i>	400 - 550	53.56	27.35	19.09	(Kittiphop Promdee & Vitidsant, 2013b)
<i>Imperata Cylindrica</i>	Fixed-bed	450 – 600	3.25 – 20.88	22.63 – 30.00	74.13 – 49.13	(Azduwin et al., 2012)



Gambar 3. TGA dan DTG curve alang – alang

Fixed Bed Pyrolysis

Hasil produk dari pirolisis dan perbandingan dari literatur dapat ditemukan pada tabel 3 di bawah ini. Dengan meningkatnya suhu, hasil arang menurun dan hasil gas dan bio-minyak

meningkat. Hasil bio-minyak memuncak pada 500 ° C dengan 37.91%, dan akan sedikit berkurang pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh perengkahan sekunder dari bio-oil menjadi gas pada suhu yang lebih tinggi, seperti yang dilaporkan dalam literatur lain (Azduwin et al., 2012; Imam & Capareda, 2012; Kittiphop Promdee & Vitidsant, 2013a, 2013b). Meskipun produk belum sepenuhnya terkarakterisasi, trend ini dapat dipahami dari degradasi tiga komponen dasar biomassa.

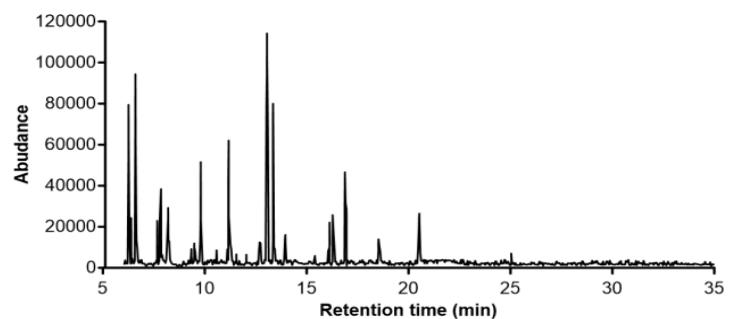
Hasil bio-char dari pirolisis alang-alang menurun dari 32% menjadi 26% karena suhu

meningkat dari 400 menjadi 600 °C, masing-masing. Hasil serupa dilaporkan oleh T. Imam (Imam & Capareda, 2012).

Secara umum, produk gas meningkat dengan peningkatan suhu seperti ditunjukkan hasilnya, meningkat dari 34,25% menjadi 37,01%. Ini karena pelepasan bahan volatil dan dekomposisi sekunder bio-oil akan meningkat seiring peningkatan suhu (Collard & Blin, 2014; Qu, Guo, Shen, Xiao, & Zhao, 2011).

GC/MS analysis bio-minyak

Suhu adalah salah satu parameter yang mempengaruhi produk pirolisis dari komponen utama biomassa. Ada 27 puncak yang terdeteksi dalam kromatogram GC-MS pada suhu optimum produksi bio-oil (500 °C) seperti yang ditunjukkan kromatogram GC-MS pada gambar 4.



Gambar 4. kromatogram bio-oil dari alang – alang pada suhu 500 °C

Bio-oil komponen tercantum pada tabel 4, nama kimia, formula kimia dan berat molekul.

Tabel. 4 Identifikasi komponen bio-oil alang – alang dengan GC/MS

No	Compound	Formula	BM (gr/mol)	Group	% peak area
1	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂	98	Furan	8.63%
2	2-Butanone	C ₄ H ₈ O	72	Ketone	2.64%
3	Acetic anhydride	C ₄ H ₆ O ₃	102	Acid	10.25%
4	2-Methyl-2-cyclopentenone	C ₆ H ₈ O	96	Ketone	2.49%
5	Acetyl furan	C ₆ H ₆ O ₂	110	Furan	2.19%
6	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂	84	Furan	2.90%
7	dihydro-2(3H)-Furanone	C ₄ H ₆ O ₂	86	Furan	4.17%
8	2-Hydroxy-2-cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O ₂	98	Ketone	3.17%
9	5-Methylfurfural	C ₆ H ₆ O ₂	110	Furan	0.99%
10	2,4-Dimethylfuran	C ₆ H ₈ O	96	Furan	1.30%
11	Phenol	C ₆ H ₆ O	94	Phenol	5.60%
12	2-Methylpropanoic acid anhydride	C ₈ H ₁₄ O ₃	158	Acid	0.93%
13	2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	C ₆ H ₈ O ₂	112	Other	6.74%
14	2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one	C ₇ H ₁₀ O	110	Other	0.71%
15	m-Cresol / 3-Methylphenol	C ₇ H ₈ O	108	Phenol	0.70%
16	p-Cresol / 4-Methylphenol	C ₇ H ₈ O	108	Phenol	1.35%
17	2-methoxy-Phenol / Guaiacol	C ₇ H ₈ O ₂	124	Phenol	12.41%
18	1-Methyl-2-propenol	C ₄ H ₈ O	72	Alcohol	14.97%
19	3-Ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	C ₇ H ₁₀ O ₂	126	Other	1.74%
20	2-Ethylphenol	C ₈ H ₁₀ O	122	Phenol	0.63%
21	4-Methylguaiacol / p-Creosol	C ₈ H ₁₀ O ₂	138	Phenol	2.40%
22	1,2-Benzenediol / Catechol	C ₆ H ₆ O ₂	110	Other	2.79%
23	1,4:3,6-Dianhydro- α -d-glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄	144	Anhydrosugars	5.06%
24	2,3-Dihydrobenzofuran	C ₈ H ₈ O	120	Furan	0.11%
25	4-Ethylguaiacol	C ₉ H ₁₂ O ₂	152	Phenol	1.51%
26	2,6-Dimethoxy phenol/Syringol	C ₈ H ₁₀ O ₃	154	Phenol	2.87%
27	4-Hydroxy-3-methoxyphenyl acetone / Guaiacylacetone	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	180	Ketone	0.76%

Suhu optimal memberikan puncak maksimum untuk komponen *asetat anhidrida, dihidro-2(3H)-Furanone, 5-Methylfurfural dan 4-Ethylguaiacol*. Selain itu, 30% dari produk

pirolisis tercantum dalam tabel 4 dalam bentuk senyawa fenolik, yang diyakini berasal dari kelompok struktur lignin. Senyawa furanic memberi sekitar 20% area puncak yang

terdeteksi. Selain itu komponen lain yang terdapat dalam bio-oil adalah 2-*Furanmethanol*, 2-*Butanone*, *Acetic anhydride*, *Dihydro-2(3H)-furanone*, *m-Cresol*, *p-Cresol*, 2-*Ethylphenol*, 4-*Methylguaiacol*, 1,4:3,6-*Dianhydro-a-d-glucopyranose*, 2,3-*Anhydro-d-mannosan* dan *Syringol*.

Kesimpulan

Berbagai analisis karakterisasi, TGA dan GC/MS dari alang – alang telah dilakukan untuk menyelidiki karakterisasi dan analisis bahan kimia yang memiliki nilai tambah dari pirolisis alang – alang. Produk yang dihasilkan dari identifikasi GC/MS berlimpah dengan senyawa *furanic*, *guaiacyl lignin*, *p-hydroxyphenyl lignin*, *syringyl lignin*, hidrokarbon aromatik, senyawa ketonik, senyawa asam organik dan hidrokarbon lain-lain. Suhu pada 500 ° C telah menunjukkan hasil yang baik dalam hal jumlah optimal komponen yang terdeteksi dan persentase area puncak asetat anhidrida, *dihidro-2 (3H) -Furanone*, *5-Methylfurfural* dan *4-Methylguaiacol* telah menunjukkan persentase area puncak yang lebih tinggi dan berpotensi sebagai bahan kimia yang kimia yang memiliki nilai tambah. Fixed bed pirolisis atau Fixe bed pyrolysis *imperata cylindrica* menunjukkan

bahwa hasil puncak bio-minyak pada 500 °C dengan 37,91%.

Referensi

- A.O.Ayeni, & W.B.Duke. (1985). The influence of rhizome features on subsequent regenerative capacity in speargrass (*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 13(3–4), 309–317. [http://doi.org/10.1016/0167-8809\(85\)90018-0](http://doi.org/10.1016/0167-8809(85)90018-0)
- Abu Bakar, M. S., & Titiloye, J. O. (2013). Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 362–368. <http://doi.org/10.1016/j.jaat.2012.09.005>
- Azduwin, K., Ridzuan, J. M., Hafiz, S. M., & Amran, T. (2012). Slow pyrolysis of *Imperata cylindrica* in a fixed bed reactor. *International Journal of Biological, Ecological, and Environment Science*, 176–180.
- Azeez, A. M., Meier, D., Odermatt, J., & Willner, T. (2010). Fast Pyrolysis of African and European Lignocellulosic Biomasaes Using Py-GC/MS and Fluidized Bed Reactor. *Energy & Fuels*, 24(3), 2078–2085. <http://doi.org/10.1021/ef9012856>
- Banks, S. W., Nowakowski, D. J., & Bridgwater, A. V. (2014). Fast pyrolysis processing of surfactant washed Miscanthus. *Fuel Processing Technology*, 128, 94–103. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.005>
- Barta-Rajnai, E., Jakab, E., Sebestyén, Z., May, Z., Barta, Z., Wang, L., ... Czégény, Z. (2016). Comprehensive Compositional Study of Torrefied Wood and Herbaceous Materials by Chemical Analysis and Thermoanalytical Methods. *Energy &*

- Fuels, 30(10), 8019–8030.
<http://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01030>
- Brook, R. M. (1989). Review of literature on Imperata cylindrica (L.) Raeuschel with particular reference to South East Asia. *Tropical Pest Management*, 35(1), 12–25.
<http://doi.org/10.1080/09670878909371312>
- Cao, L., Yuan, X., Jiang, L., Li, C., Xiao, Z., Huang, Z., ... Li, H. (2016). Thermogravimetric characteristics and kinetics analysis of oil cake and torrefied biomasa blends. *Fuel*, 175, 129–136.
<http://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.089>
- Chikoye, D., Manyong, V. M., & Ekeleme, F. (2000). Characteristics of speargrass (*Imperata cylindrica*) dominated fields in West Africa: crops, soil properties, farmer perceptions and management strategies. *Crop Protection*, 19(7), 481–487.
[http://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00044-2](http://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00044-2)
- Collard, F.-X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomasa constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594–608.
- De Conto, D., Silvestre, W. P., Baldasso, C., & Godinho, M. (2016). Performance of rotary kiln reactor for the elephant grass pyrolysis. *Bioresource Technology*, 218, 153–160.
<http://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.082>
- Duan, L., Sun, H., Jiang, Y., Anthony, E. J., & Zhao, C. (2016). Partitioning of trace elements, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn and Pb, in a 2.5MWth pilot-scale circulating fluidised bed combustor burning an anthracite and a bituminous coal. *Fuel Processing Technology*, 146, 1–8.
<http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.003>
- Ehleringer, J. R., & Cerling, T. E. (2002). C3 and C4 photosynthesis. *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 2, 186–190.
- Galletti, G. C., & Bocchini, P. (1995). Pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry of lignocellulose. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 9(9), 815–826.
<http://doi.org/10.1002/rcm.1290090920>
- Garrity, D. P., Soekardi, M., van Noordwijk, M., de la Cruz, R., Pathak, P. S., Gunasena, H. P. M., ... Majid, N. M. (1996). The Imperata grasslands of tropical Asia: area, distribution, and typology. *Agroforestry Systems*, 36(1–3), 3–29.
<http://doi.org/10.1007/BF00142865>
- Greenhalf, C. E., Nowakowski, D. J., Bridgwater, A. V., Titiloye, J., Yates, N., Riche, A., & Shield, I. (2012). Thermochemical characterisation of straws and high yielding perennials grasses. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 449–459.
<http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.025>
- Greenhalf, C. E., Nowakowski, D. J., Harms, A. B., Titiloye, J. O., & Bridgwater, A. V. (2013). A comparative study of straw, perennials grasses and hardwoods in terms of fast pyrolysis products. *Fuel*, 108, 216–230.
<http://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.075>
- Huang, C., Han, L., Yang, Z., & Liu, X. (2009). Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management*, 29(6), 1793–1797.
<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.027>
- Imam, T., & Capareda, S. (2012). Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93,

- 170–177.
<http://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.010>
- Johnson, J. M.-F., Barbour, N. W., & Weyers, S. L. (2007). Chemical composition of crop biomasa impacts its decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 155–162.
- Kamaroddin, M. F. A., Nyakuma, B. B., Oladokun, O. A., Abdullah, T. A. T., & Amin, N. A. S. (n.d.). Characterization of the fuel properties of Imperata cylindrica grass for thermal applications.
- Kim, J. Y., Oh, S., Hwang, H., Moon, Y. H., & Choi, J. W. (2014). Assessment of miscanthus biomasa (*Miscanthus sacchariflorus*) for conversion and utilization of bio-oil by fluidized bed type fast pyrolysis. *Energy*, 76, 284–291. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.010>
- Lee, M. K., Tsai, W. T., Tsai, Y. L., & Lin, S. H. (2010). Pyrolysis of napier grass in an induction-heating reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 88(2), 110–116. <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.03.003>
- Lewandowski, I., Scurlock, J. M. O., Lindvall, E., & Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomasa and Bioenergy*, 25(4), 335–361. [http://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](http://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
- Li, L. L., Fu, X. B., Wang, X. N., Tian, Y. Y., & Qin, S. (2016). Pyrolytic characteristics and kinetic studies of agricultural wastes—Four kinds of grasses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(8), 1156–1162.
- Lin, H., Li, K., Zhang, X., & Wang, H. (2016). Structure Characterization and Model Construction of Indonesian Brown Coal. *Energy & Fuels*, 30(5), 3809–3814. <http://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02696>
- Lyubchik, S. ., Benoit, R., & Béguin, F. (2002). Influence of chemical modification of anthracite on the porosity of the resulting activated carbons. *Carbon*, 40(8), 1287–1294. [http://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00288-3](http://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00288-3)
- Mabrouki, J., Guedri, K., Abbassi, M. A., & Omri, A. (2016). Simulation of the fast pyrolysis of Tunisian biomasa feedstocks for bio-fuel production. *Comptes Rendus Chimie*, 19(4), 466–474. <http://doi.org/10.1016/j.crci.2015.09.020>
- MacDonald, G. E. (2004). Cogongrass (*Imperata cylindrica*)—Biology, Ecology, and Management. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(5), 367–380. <http://doi.org/10.1080/07352680490505114>
- Mazlan, M. A. F., Uemura, Y., Osman, N. B., & Yusup, S. (2015). Fast pyrolysis of hardwood residues using a fixed bed drop-type pyrolyzer. *Energy Conversion and Management*, 98, 208–214. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.102>
- McKendry, P. (2002a). Energy production from biomasa (part 1): overview of biomasa. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- McKendry, P. (2002b). Energy production from biomasa (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- McLaughlin, S. B., Samson, R., Bransby, D., & Wiselogel, A. (1996). Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuels. In *Proc. Bioenergy* (Vol. 96, pp. 1–8).
- Mohammed, I. Y., Abakr, Y. A., Kazi, F. K.,

- Yusup, S., Alshareef, I., & Chin, S. A. (2015). Comprehensive Characterization of Napier Grass as a Feedstock for Thermochemical Conversion. *Energies*, 8(5), 3403–3417.
<http://doi.org/10.3390/en8053403>
- Muthuraman, M., Namioka, T., & Yoshikawa, K. (2010). A comparative study on co-combustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology*, 91(5), 550–558.
<http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.12.018>
- Oladokun, O., Ahmad, A., Abdullah, T. A. T., Nyakuma, B. B., Bello, A. A.-H., & Al-Shatri, A. H. (2016). Multicomponent devolatilization kinetics and thermal conversion of Imperata cylindrica. *Applied Thermal Engineering*, 105, 931–940.
<http://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2016.04.165>
- Ozyuguran, A., Akturk, A., & Yaman, S. (2018). Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. *Fuel*, 214, 640–646.
<http://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.10.082>
- Park, H. J., Park, K. H., Jeon, J. K., Kim, J., Ryoo, R., Jeong, K. E., ... Park, Y. K. (2012). Production of phenolics and aromatics by pyrolysis of miscanthus. *Fuel*, 97, 379–384.
<http://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.075>
- Patel, M., Zhang, X., & Kumar, A. (2016). Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1486–1499.
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.070>
- Pattiya, A., Titiloye, J. O., & Bridgwater, A. V. (2008). Fast pyrolysis of cassava rhizome in the presence of catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81(1), 72–79.
<http://doi.org/10.1016/j.jaat.2007.09.002>
- Paul, R., Elmore, C. D., & others. (1984). Weeds and the C4 syndrome. *Weeds Today*, 15(1), 3–4.
- Promdee, K., & Vitidsant, T. (2013a). Bio-oil synthesis by pyrolysis of cogon grass (*Imperata cylindrica*). *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 49(4), 287–292.
- Promdee, K., & Vitidsant, T. (2013). Preparation of biofuel by pyrolysis of plant matter in a continuous reactor. *Theoretical and Experimental Chemistry*, 49(2), 126–129.
- Promdee, K., & Vitidsant, T. (2013b). Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor. *Coke and Chemistry*, 56(12), 466–469.
- Qu, T., Guo, W., Shen, L., Xiao, J., & Zhao, K. (2011). Experimental study of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(18), 10424–10433.
- Sage, R. F., Christin, P.-A., & Edwards, E. J. (2011). The C4 plant lineages of planet Earth. *Journal of Experimental Botany*, 62(9), 3155–3169. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/err048>
- Sage, R. F., & Zhu, X.-G. (2011). Exploiting the engine of C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 62(9), 2989–3000. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/err179>
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomasa and Bioenergy*, 28(5), 499–507.
<http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>
- Silaen, A., & Wang, T. (2012). Investigation of the Coal Gasification Process Under

- Various Operating Conditions Inside a Two-Stage Entrained Flow Gasifier. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 4(2), 21006–21011. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1115/1.4005603>
- Strezov, V., Evans, T. J., & Hayman, C. (2008). Thermal conversion of elephant grass (*Pennisetum Purpureum Schum*) to bio-gas, bio-oil and charcoal. *Bioresource Technology*, 99(17), 8394–8399. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.039>
- Taniguchi, M., Weber, A. P. M., & von Caemmerer, S. (2016). Future Research into C4 Biology. *Plant and Cell Physiology*, 57(5), 879–880. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1093/pcp/pcw082>
- Villaseñor, I. M., & Lamadrid, M. R. A. (2006). Comparative anti-hyperglycemic potentials of medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*, 104(1–2), 129–131. <http://doi.org/10.1016/J.JEP.2005.08.067>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Zheng, C., Lee, D. H., Liang, D. T., ... Liang. (2006). In-depth investigation of biomasa pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy & Fuels*, 20(1), 388–393. <http://doi.org/10.1021/EF0580117>
- Yu, Y., Chua, Y. W., & Wu, H. (2016). Characterization of Pyrolytic Sugars in Bio-Oil Produced from Biomasa Fast Pyrolysis. *Energy & Fuels*, 30(5), 4145–4149. <http://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00464>
- Zanatta, E. R., Reinehr, T. O., Awadallak, J. A., Kleinübing, S. J., dos Santos, J. B. O., Baricatti, R. A., ... da Silva, E. A. (2016). Kinetic studies of thermal decomposition of sugarcane bagasse and cassava bagasse. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125(1), 437–445. <http://doi.org/10.1007/s10973-016-5378-x>
- Zhou, X., Li, W., Mabon, R., & Broadbelt, L. J. (2017). A Critical Review on Hemicellulose Pyrolysis. *Energy Technology*, 5(1), 52–79. <http://doi.org/10.1002/ente.201600327>