



Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa

Review Article: Operational Parameters of Biomass Pyrolysis

Sri Aulia Novita^{*1}, Santosa², Nofialdi³, Andasuryani⁴, Ahmad Fudholi⁵

¹Program Doktorat Ilmu Pertanian, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

²Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

³Program Studi Agribisnis, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Andalas, Padang Indonesia

⁵Solar Energy Research Institute, University Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia

*Penulis Korespondensi

Email: sriaulianovita@gmail.com

Abstrak. Artikel ini menjelaskan definisi pirolisis dan pentingnya proses pirolisis dalam konversi termokimia biomassa menjadi bahan bakar. Teknologi pirolisis berpotensi untuk dikembangkan karena ketersediaan sumber bahan biomassa yang sangat melimpah, teknologinya mudah untuk dikembangkan, bersifat ramah lingkungan dan menguntungkan secara ekonomi. Dalam teknik pirolisis, beberapa parameter yang mempengaruhi proses pirolisis adalah perlakuan awal biomassa, kadar air dan ukuran partikel bahan, komposisi senyawa biomassa, suhu, laju pemanasan, laju alir gas, waktu tinggal, jenis pirolisis, jenis reaktor pirolisis dan final produk pirolisis. Reaktor pirolisis adalah alat pengurai senyawa-senyawa organik yang dilakukan dengan proses pemanasan tanpa berhubungan langsung dengan udara luar dengan suhu 300-600⁰C. Beberapa jenis reaktor pirolisis yang sering digunakan adalah Fixed-Bed Pyrolyzer, Bubbling Fluidized-Bed Reactors, Circulating Fluidized Bed, Ultra-Rapid Pyrolyzer, Rotating Cone, Ablative Pyrolyzer dan Vacuum Pyrolyzer. Teknik pirolisis menghasilkan tiga macam produk akhir, yaitu bio-oil, arang (biochar) dan gas.

Kata kunci: pirolisis, biomassa, parameter pirolisis

Abstract. This article describes the definition of pyrolysis and the importance of the pyrolysis process in the thermochemical conversion of biomass into fuel. Pyrolysis technology has the potential to be developed due to the availability of abundant sources of biomass material, the technology is easy to develop, environmentally friendly and economically profitable. The parameters that affect the pyrolysis process are the initial treatment of biomass, moisture content and particle size of the material, composition of biomass compounds, temperature, heating rate, gas flow rate, residence time, type of pyrolysis, type of pyrolysis reactor and final product of pyrolysis. Pyrolysis reactor is a device that decomposes organic compounds which is carried out by a heating process without oxygen at a temperature of 300-600⁰C. Several types of pyrolysis reactors that used are Fixed-Bed Pyrolyzer, Bubbling Fluidized-Bed Reactors, Circulating Fluidized Bed, Ultra-Rapid Pyrolyzer, Rotating Cone, Ablative Pyrolyzer and Vacuum Pyrolyzer. The pyrolysis technique produces three kinds of final products, namely bio-oil, charcoal (biochar) and gas.

Keywords: pyrolysis, biomass, pyrolysis parameters

1. Pendahuluan

Pirolisis merupakan teknologi yang cukup menjanjikan dalam mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar yang dapat diperbaharui. Teknologi pirolisis sangat berpotensi untuk dikembangkan karena ketersediaan sumber bahan biomassa yang sangat melimpah, teknologinya mudah untuk dikembangkan, bersifat ramah lingkungan dan menguntungkan secara ekonomi. Produk hasil pirolisis dapat dimanfaatkan untuk energi terbarukan, sumber bahan kimia, penghasil energi dan sebagainya. Salah satu teknologi yang mempunyai peluang besar untuk menghasilkan biofuel. Proses pirolisis dapat mengubah biomassa menjadi produk cair, padat dan gas. Pemanfaatan biomassa untuk energi alternatif dapat mengurangi dampak lingkungan saat ini menjadi masalah seperti peningkatan CO₂ dalam lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil (Garcia-Perez *et al.*, 2010).

Teknik pirolisis merupakan sebuah metode termokimia dimana limbah biomassa dikonversikan menjadi bahan bakar padat (*char*), produser gas (*syngas*), dan *liquid (bio-oil)* tanpa kehadiran oksigen dalam sebuah reaktor (Ohliger *et al.*, 2013). Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia dari material organik, yang berlangsung tanpa udara atau oksigen. (Ohliger *et al.*, 2013). Proses yang mengubah bahan organik menjadi arang, biofuel dan gas sistematik melalui dekomposisi bahan organik dengan suhu dan tekanan tinggi (Singh, 2018). Menurut Basu (2010), pirolisis biomassa umumnya berlangsung pada rentang temperatur 300 °C sampai dengan 600 °C. Teknik pirolisis lebih efisien dan fleksibel dibandingkan dengan proses konversi termokimia yang lain. Cairan yang dihasilkan dalam proses ini merupakan awal terbentuknya bio-oil, yang dalam perlakuan selanjutnya bisa menjadi biodiesel atau bioethanol.

Suhu pembakaran pirolisis biasanya berkisar 300°C, dengan temperatur optimum untuk menghasilkan bio-oil adalah 450 sampai 550°C, tergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan parameter yang mempengaruhi produksinya. Suhu yang lebih rendah dari 300°C lebih tepat digunakan untuk biomassa yang kering dan tidak dapat dijadikan sebagai awal proses pirolisis. Li *et al.* (2008) menyatakan jumlah bio-oil yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan peningkatan suhu optimal setelah itu akan menurun jika suhunya terlalu tinggi. Selain itu, minyak pirolisis mentah tidak dapat langsung digunakan dalam infrastruktur energi saat ini, karena sifat yang tidak diinginkan seperti kandungan energi yang rendah dan sifat korosif akibat kandungan oksigennya yang tinggi. Oleh karena itu, perlu ditingkatkan dan difraksinasi menjadi spesifikasi yang diinginkan (Sharifzadeh *et al.*, 2019).

Pirolisis lignoselulosa biomassa dengan fokus utama pada bahan baku yang ideal, teknologi dan reaktor yang digunakan, dan sifat akhir produk (Dhyani & Bhaskar, 2018). Salah satu keuntungan utama pirolisis adalah fleksibilitas dengan jenis bahan baku dan kondisi pengoperasiannya. Kualitas produk hasil pirolisis membuatnya lebih unggul dari teknik lainnya.

Perubahan kondisi pirolisis dapat membentuk tekstur dan karakteristik produk sesuai kebutuhan. Biaya merupakan perhatian untuk pabrik pirolisis tetapi pabrik pirolisis yang besar membuat biaya proses menjadi lebih efisien (Wang *et al.*, 2017). Produk pirolisis mengandung sulfur dan gas NO_x yang rendah sehingga ramah lingkungan, hal ini memperlambat emisi gas rumah kaca yang membantu mendapatkan atmosfer yang bersih dan membantu mengurangi pemanasan global.

Sistem pirolisis yang konvensional biasanya membutuhkan banyak energi dan kurang layak secara ekonomi. Penulisan artikel ini membahas secara komprehensif tentang parameter-parameter pirolisis, komposisi bahan baku biomassa, jenis pirolisis, reaktor pirolisis dan produk dari pirolisis.

2. Parameter Operasional Pirolisis

Dalam proses pirolisis ada beberapa parameter yang mempengaruhi tingkat keberhasilan produksi bio-oil. Parameter yang perlu dipertimbangkan adalah:

1) Jenis biomassa

Biomassa sebagai material biologis banyak digunakan sebagai sumber bahan bakar, baik secara langsung maupun diproses melalui teknik konversi energi biomassa. Sumber biomassa adalah salah satu solusi terbaik dalam energi terbarukan untuk menggantikan atau substitusi sumber daya fosil dalam berbagai aplikasi seperti: produksi energi panas, sumber tenaga, bahan bakar untuk transportasi, produksi bahan kimia dan biomaterial (Bridgwater, 2003). Pada proses pirolisis, energi panas mendorong terjadinya oksidasi sehingga molekul karbon yang kompleks terurai sebagian besar menjadi cairan, karbon atau arang. Pemanfaatan biomassa untuk energi alternatif dapat mengurangi dampak lingkungan saat ini seperti peningkatan CO₂ dalam lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil (Li *et al.*, 2008).

Biomassa meliputi limbah kayu, limbah pertanian, perkebunan, hasil hutan, komponen organik dari industri dan rumah tangga. Menurut Basu (2010), jenis-jenis biomassa diantaranya adalah:

- a. Limbah tanaman yang tumbuh didaratan yaitu biomassa hasil hutan, rumput-rumputan, tanaman energi dan biomassa dari tanaman yang dibudidayakan
- b. Tanaman air yaitu algae dan lumut
- c. Limbah residu hutan seperti: kulit kayu, daun, dahan, ranting dan perakaran
- d. Limbah industri seperti: serbuk gergaji, limbah minyak dan lemak dan kayu sisa pemotongan
- e. Limbah perkotaan seperti: limbah padat perkotaan, limbah gas dan sampah tempat pembuangan akhir
- f. Limbah padat pertanian seperti: kotoran ternak, pupuk kandang dan sisa hasil pertanian

Biomassa umumnya mempunyai tiga senyawa yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin dengan komposisi yang berbeda. Proses termokimia biomassa tergantung pada komposisi senyawa biomassa dan kandungan organik lainnya. Biomassa terdiri dari 38–50% selulosa, 23–32%

hemiselulosa, 15–25% lignin dan komponen lainnya (anorganik dan ekstraktif) dengan persentase total 5–13 (Madadi & Abbas, 2017).

Pirolisis biomassa telah terbukti menjadi jalur konversi biokimia yang layak karena kemampuannya untuk meningkatkan nilai kimia dan kalor dari bahan baku biomassa (Zhao *et al.*, 2017). Metode konversi ini dapat menghasilkan bio-oil 70 – 95% dari berat bahan (Mohan *et al.*, 2006). Suhu pembakaran pirolisis biomassa berkisar antara 300 – 1000 °C (Zhang *et al.*, 2017).

2) Analisis komposisi senyawa biomassa

Untuk mengetahui komposisi senyawa dalam biomassa, biasanya dilakukan analisis *proximate* dan *ultimate* terhadap bahan baku biomassa. Analisis proksimat dilakukan untuk menentukan kadar air, bahan mudah menguap (*volatile*), karbon tetap, fraksi biomassa yang tidak mudah menguap, kadar abu dan residu anorganik yang tersisa setelah pembakaran. Biomassa dengan fraksi bahan yang mudah menguap tinggi memiliki konversi tertinggi dibandingkan biomassa dengan karbon tetap tinggi. Secara teoritis, biomassa dengan fraksi *volatile* yang tinggi lebih tepat digunakan untuk produksi bio-oil, sedangkan biomassa dengan karbon tetap yang tinggi, lebih sesuai untuk produksi *bio-char* (Vassilev *et al.*, 2010).

Uji analisis *ultimite* menghasilkan data yang lebih komprehensif daripada analisis proksimat. Uji ini menentukan jumlah karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur dan oksigen (CHNSO) dalam material. Rasio elemen-elemen yang diperoleh dari analisis akhir memberikan perbandingan yang lebih baik di antara bahan baku, yang dapat digunakan untuk penentuan nilai kalor dari bahan (Vassilev *et al.*, 2010). Beberapa analisis *proximate* dan *ultimate* yang dilakukan terhadap limbah biomassa dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi dasar dan sifat fisik biomassa (Vassilev *et al.*, 2010)

Jenis Biomassa	C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	N (wt%)	S (wt%)	Ash (wt%)	Moisture (wt%)	HHV (MJ/kg)
Sekam padi	48,36	5,13	32,79	0,72	0,31	12,50	6,80	16,79
Tongkol jagung	49,32	5,35	44,7	0,63	–	1,49	7,36	16,66
Kayu birch	48,45	5,58	45,46	0,20	–	0,30	5,26	17,02
Kulit kenari	50,58	6,41	41,21	0,39	–	1,40	8,11	19,20 ^a
<i>Safflower</i>	59,05	8,87	26,72	3,03	–	2,33	6,04	23,86 ^a
Batang wijen	48,62	5,65	37,89	0,57	–	7,26	9,53	19,10 ^a
Bungkil kedelai	52,46	6,17	26,51	8,72	–	6,15	9,15	23,23
Campuran kayu	47,58	5,87	42,10	0,20	0,03	2,10	7,76	–
Kayu karet	49,50	6,10	44,60	–	–	–	–	–
Jerami	36,89	5,00	37,89	0,40	–	19,80	–	16,78
Tempurung kelapa	47,97	5,88	45,57	0,30	–	0,50	–	19,45
Kayu pinus	45,92	5,27	48,24	0,22	–	0,35	7,99	18,98
Kulit almond	47,63	5,71	44,48	–	–	2,18	–	–
Serbuk kayu beech	50,8	5,9	42,9	0,3	0,02	0,4	6	–
<i>Olive husks</i>	50,90	6,30	38,60	1,37	0,03	2,80	8,50	–
Kayu timber	47,72	5,54	44,85	0,89	–	1,00	–	–
Pinus	50,33	6,21	43,07	0,34	0,05	0,26	5,49	–
Biji jatropha	55,8	4,78	31,13	7,35	0,93	4,7	8,1	–
Biji jarak	29,28	3,91	29,84	–	0,03	2,2	37,37	–
Limbah kopi	46,1	5,6	29,1	5,2	–	2,5	11,3	–

Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat komposisi senyawa yang terdandung dalam berbagai jenis biomassa. Komposisi senyawa C, H, N, O, S, kadar abu dan kadar air pada bahan biomassa akan menentukan nilai *higher heating value* (HHV). Energi panas yang dilepaskan selama proses pembakaran yang mempunyai nilai kalori biomassa disebut dengan *Higher Heating Value* (HHV), sedangkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air disebut *Low Heat Value* (LHV).

Dekomposisi biomassa tergantung kepada kadar air bahan (lebih kecil dari 8%), ukuran partikel bahan (lebih kecil dari 5 mm), kerapatan bahan (ρ), kadar abu, komposisi lignoselulosa dan nilai kalor bahan. Beberapa penelitian yang memperlihatkan pengaruh ukuran partikel bahan, kadar air, suhu, *heat rate temperature* terhadap jumlah biooil dan arang yang dihasilkan seperti yang terlihat di Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran biomassa, kadar air dan suhu untuk pirolisis sekam padi dan tongkol jagung

Jenis Bahan	Ukuran Partikel (mm)	Kadar Air (% berat)	Suhu ($^{\circ}$ C)	Heating Rate ($^{\circ}$ C/min)	Bio-oil (%)	Biochar (%)	Ref
Tongkol jagung	0,425 – 0,6	7,36	400 – 450	7 – 40	7,99–21,05	67,84 – 72,8	(Chintala <i>et al.</i> , 2017)
Tongkol jagung	0,5 – 2,2	19,4 – 36,6	676,85	10 K/s	-	45,5 – 65,7	(Demirbas, 2004)
Sekam padi	1,68 – 3,36	6	500 – 600	10	18 – 30,4	30 – 38,5	
Sekam padi	90–600 μ m	7,7	465	10	56	24	(Huang <i>et al.</i> , 2018)
Sekam padi	0,63 – 1	6	450	10	70	28	(Ji-lu, 2007)

Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa ukuran partikel, suhu dan kadar air bahan mempengaruhi jumlah biooil yang dihasilkan, akan tetapi data diatas belum dapat dijadikan sebagai rujukan yang tepat karena harus dilakukan pengembangan penelitian lebih lanjut.

Menurut Huang *et al.*, (2018), komposisi senyawa tongkol jagung adalah hemiselulosa 29,9%, sellulosa 33,8%, lignin 30,7%, karbon 17% dan Volatile 80,9% (Demirbas, 2004). Sekam padi memiliki kandungan 24,3% hemiselulosa, 34,4% selulosa, dan 19,2% lignin, senyawa *volatile* 70,5% dan *fixed carbon* 16,6% (Alvarez *et al.*, 2014).

3) *Pretreatmen* biomassa

Perlakuan awal (*pretreatmen*) terhadap biomassa sangat dibutuhkan sebelum dilakukan proses pirolisis untuk meningkatkan kualitas dan keseragaman bio-oil yang dihasilkan. Perlakuan terhadap biomassa yang mempengaruhi kecepatan kenaikan suhu adalah proses pengecilan ukuran bahan dan pengeringan bahan. Limbah biomassa yang digunakan dalam beberapa penelitian biasanya diberikan perlakuan untuk memudahkan dalam proses selanjutnya, perlakuan tersebut adalah:

- a. Bahan baku dikeringkan dengan mesin pengering sehingga kadar airnya 5-8%
- b. Penggilingan bahan dengan berbagai ukuran 2-5 mm, Sekam zaitun, tongkol jagung dan ampas teh Sampel digiling dan diayak sehingga didapatkan ukuran partikel antara lebih

kecil dari 0,5 mm dan lebih besar dari 2,2 mm (Demirbas, 2004).

Ukuran partikel bahan yang biasanya digunakan setelah pemotongan bahan adalah 10-30 mm dan penggilingan adalah 0,3-1,5 mm (Cheng & Zhao, 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Shen *et al.* (2009) yang menyatakan bahwa ukuran partikel bahan yang lebih kecil yaitu 0,3-1,5 mm, dapat meningkatkan jumlah bio-oil yang dihasilkan. Pengeringan biomassa untuk mengurangi kadar air dengan menggunakan aliran udara panas dengan suhu 150 °C (Wang *et al.*, 2017). Peningkatan suhu secara signifikan akan mempercepat pengurangan kadar air pada bahan (Demirbas, 2004). Pengaruh rendahnya kadar air pada bahan dapat meningkatkan jumlah biooil yang dihasilkan dan senyawa penting seperti fenol selama proses pirolisis. El-barbary *et al.* (2009) menyatakan bahwa *pretreatment* biomassa yang dilakukan pada proses *fast* pirolisis telah terbukti mengubah struktur dan komposisi kimia biomassa yang menyebabkan perubahan mekanisme dekomposisi termal biomassa.

4) Suhu pirolisis

Suhu merupakan faktor yang sangat mempengaruhi dalam proses pirolisis untuk memberikan hasil yang optimal. Fungsi suhu dalam proses pirolisis adalah untuk memberikan panas yang dibutuhkan untuk menguraikan ikatan kimia dari biomassa. Efisiensi konversi biomassa meningkat, karena meningkatnya suhu untuk memutus ikatan biomassa. Banyak penelitian menunjukkan bahwa suhu 450 – 550°C, memberikan hasil bio-oil yang tinggi, tetapi nilai ini berubah tergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan variabel proses lainnya (Guedes *et al.*, 2018). Tabel 3 menjelaskan tentang tentang beberapa penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh suhu dan jenis biomassa terhadap jumlah bio-oil yang dihasilkan.

Tabel 3. Jenis Biomassa dan Suhu Terhadap Hasil Bio-Oil

Biomassa	Suhu (°C)	Sumber
Rice husk	400 – 500 >500 – 800	Tsai <i>et al.</i> (2007) 40
Mango seed almond	650	Lazzari <i>et al.</i> (2016)
Bamboo sawdust	350 – 450 510	Jung <i>et al.</i> (2008) 61
Rice husk	450	Alvarez (2014)
Waste of palm	500	
Cynara cardunculus L	400	Encinar <i>et al.</i> (1996)
Olive bagasse	600	Encinar <i>et al.</i> (1996)
Sugarcane bagasse	475	Islam <i>et al.</i> (2010)
Cassava rhizome	472	Pattiya & Suttibak (2012)
Cassava stalk	469	61,39
Jatropha seed shell	470	48
Pistachio shell	550	20,5
Poplar	455	69

5) Laju Pemanasan (*Heating rate*)

Laju pemanasan memiliki peran penting dalam menentukan produk akhir dari proses pirolisis karena mempengaruhi sifat dan komposisi produk akhir. Laju pemanasan yang rendah akan mengurangi reaksi pirolisis dan mencegah pemecahan termal biomassa yang lebih banyak menghasilkan arang dibandingkan dengan bio-oil. Sebaliknya laju pemanasan yang tinggi akan mempercepat proses dekomposisi senyawa biomassa sehingga lebih banyak menghasilkan bio-oil dan gas (Belotti *et al.*, 2014).

Zhang *et al.* (2017) menyatakan bahwa pirolisis *Microcystis sp* dengan menggunakan suhu dari 300 °C sampai 700 °C, menunjukkan jumlah maksimum bio-oil yang dihasilkan adalah 59% pada suhu 500 °C. Pada laju pemanasan tinggi pirolisis sekunder membantu pembentukan komponen gas. Pengaruh laju pemanasan yang rendah dapat terlihat pada hasil arang yang lebih banyak (Ayllon *et al.*, 2012). Tsai *et al.* (2007) mempelajari tentang pirolisis sekam padi dengan menggunakan *fixed bed reactor*, merubah laju pemanasan dari 100 °C/min sampai 500 °C/min dan jumlah hasil bio-oil maksimum pada *heating rate* 200 °C/min dan tetap konstan pada suhu yang lebih tinggi.

Uzun *et al.* (2006) meneliti tentang pirolisis bungkil kacang kedelai dengan *fixed bed reactor*, diperoleh hasil yang menyatakan bahwa laju pemanasan yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan jumlah bio-oil yang lebih tinggi. Kenaikan *heating rate* dari 5-700 °C/min meningkatkan hasil bio-oil sebesar 23,36%. Sensoz *et al.* (2006) melakukan pirolisis pada ampas zaitun dengan *fixed bed reactor*, dengan laju pemanasan yang rendah yaitu 10 °C/min, jumlah bio-oil yang dihasilkan sekitar 3,4–8,4% lebih tinggi dibandingkan dengan laju pemanasan 50 °C/min. Sensoz & Angin (2008) menyatakan bahwa pengaruh dari *heating rate* 10 °C; 30 °C to 50 °C/min dari pirolisis *safflower*, hasilnya analisis menunjukkan komposisi kimia dari bio-oil ditentukan oleh perbedaan kondisi yang mirip satu dengan yang lain.

6) Laju aliran gas (*Gas flow rate*)

Laju aliran gas adalah parameter penting lain yang mempengaruhi distribusi kecepatan aliran udara pada proses pirolisis. Aliran gas dapat menghilangkan uap yang dihasilkan ketika mengalir melalui reaktor pirolisis. Aliran udara efektif mengurangi waktu tinggal uap yang dapat meningkatkan hasil bio-oil dan mengurangi jumlah arang. Jika uap yang dihasilkan selama pirolisis biomassa tidak dibersihkan, uap tersebut dapat terlibat dalam reaksi sekunder yang menyebabkan perubahan sifat dan komposisi produk pirolisis (Kan, 2016). Ada beberapa literatur yang meneliti tentang pengaruh laju aliran gas pembawa pada distribusi produk pirolisis.

7) Waktu tinggal (*Residence time*)

Faktor yang mempengaruhi jumlah dekomposisi bahan padatan biomassa menjadi minyak dan gas adalah waktu tinggal bahan dalam suatu reaktor. Suhu rendah menyebabkan waktu tinggal

uap lebih lama sehingga produk arang yang lebih tinggi (Encinar *et al.*, 1996). Repolimerisasi komposisi kimia biomassa dapat ditingkatkan jika waktu tinggal asap lebih lama sehingga dapat memberikan waktu lebih untuk bereaksi. Repolimerisasi senyawa biomassa tidak sempurna dan jumlah arang yang dihasilkan dapat dikurangi (Park *et al.*, 2008). Pada fast pirolisis kayu poplar, jumlah arang yang dihasilkan meningkat sesuai dengan waktu tinggal (Kim *et al.*, 2011) dan yellow brown coal (Yeasmin *et al.*, 1999).

Mohamed *et al.* (2013) and Tsai *et al.* (2007) menyatakan bahwa waktu tinggal sangat mempengaruhi komposisi senyawa bio-oil dan gas yang dihasilkan dari proses pirolisis, tetapi tidak mempengaruhi hasil arang secara signifikan. Waktu tinggal mempengaruhi kualitas dan karakteristik arang dengan memperluas pori-pori permukaan arang (Tsai *et al.*, 1997). Telah diamati bahwa pada suhu tinggi, peningkatan waktu tinggal meningkatkan hasil biochar sementara pada suhu rendah; peningkatan waktu tinggal mengurangi hasil biochar. Pengaruh waktu tinggal seringkali didominasi oleh suhu, laju pemanasan dan parameter lainnya. yang membuatnya sangat menantang untuk memberikan gambaran langsung tentang peran waktu tinggal dalam produksi biochar (Fassinou *et al.*, 2009).

Semakin lama waktu yang digunakan dalam proses pirolisis maka jumlah produk yang dihasilkan juga semakin meningkat (Damanhuri, 2010). Repolimerisasi komponen biomassa tidak sempurna dan produk arangnya sedikit akibat dari waktu tinggal uap yang sangat pendek (Tripathi *et al.*, 2015). Parameter yang paling mempengaruhi waktu tinggal adalah suhu, laju pemanasan dan laju aliran gas.

3.3 Jenis-Jenis Pirolisis

Berdasarkan tingkat pemanasannya, pirolisis dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1) Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*)

Slow pirolisis yang menggunakan suhu yang rendah dari 400 °C, dengan waktu yang lama untuk menghasilkan jumlah maksimal biochar. Proses ini digunakan terutama untuk produksi arang dan dipecah menjadi dua jenis yaitu karbonisasi dan konvensional. Produk hasil dari *slow* pirolisis adalah biochar 35%, bio-oil 30% dan gas 35%. Pirolisis lambat dapat memberikan manfaat lingkungan yang lebih besar karena menghasilkan lebih banyak biochar yang dapat diterapkan pada tanah untuk meningkatkan kualitasnya dan untuk menyerap karbon. Namun, pirolisis cepat memiliki keuntungan ekonomi yang lebih baik karena produksi produk bernilai lebih tinggi. Pirolisis lambat secara umum dikenal sebagai cara produksi minyak nabati yang tidak tepat karena menghasilkan cairan yang rendah ± 30% wt (Qureshi *et al.*, 2019).

Arang yang dihasilkan dari proses *slow* pirolisis menggunakan tingkat laju pemanasan yang rendah (0.1–0.8 °C/s) (Hornung, 2014) dan waktu tinggal yang lebih panjang (5-30 menit) pada suhu 300–550 °C. Suhu pirolisis, laju pemanasan dan komposisi senyawa penyusun

biomassa berperan sangat penting dalam menentukan jumlah arang dan bio-oil yang dihasilkan (Howe *et al.*, 2015).

2) Pirolisis Cepat (*Fast pyrolysis*)

Jenis pirolisis ini digunakan terutama untuk produksi *bio-oil* dan gas, adalah dua jenis utama yaitu flash dan ultra-cepat. *Fast* pirolisis yang dilakukan pada sekam padi menggunakan suhu 400-600 °C, dengan menggunakan pirolisis kontiniu dengan reaktor berbentuk kerucut dan pembuangan arang secara langsung. Rendemen *bio-oil* yang paling tinggi adalah pada suhu 450 °C yaitu 70% karena kapasitas bahan dan perpindahan panas yang terjadi didalam alat (Alvarez *et al.*, 2014). Pirolisis cepat adalah metode termokimia yang memproduksi bahan bakar yang bisa diperbaharui dan komponen kimia dari biomassa dan limbah lainnya. Kajian tekno-ekonomi menunjukkan bahwa biooil dari pirolisis cepat mungkin kompetitif dengan bahan bakar minyak bumi di masa mendatang, namun saat ini hanya ada sedikit pabrik yang beroperasi secara komersial (Perkins *et al.*, 2018). Selain itu, minyak pirolisis mentah tidak dapat langsung digunakan dalam infrastruktur energi saat ini, karena sifat yang tidak diinginkan seperti kandungan energi yang rendah dan sifat korosif akibat kandungan oksigennya yang tinggi. Oleh karena itu, perlu ditingkatkan dan difraksinasi menjadi spesifikasi yang diinginkan (Sharifzadeh *et al.*, 2019).

Table 4. Tipe Reaktor, Suhu dan Jenis Pirolisis terhadap Rendemen Bio-oil (Mondal *et al.*, 2021)

Jenis Biomassa	Tipe Reaktor	Suhu Pirolisis (0C)	Rendemen Bio-oil (%)	Jenis Pirolisis
Wine dregs	Stainless steel fixed-bed reactor	550	27,6	Fast pyrolysis
Pine hard and soft wood	Tubular vacuum pyrolysis reactor	450	55	Fast pyrolysis
Rice husk	Fluidized-bed reactor	450	60	Fast pyrolysis
Wooddust	Cyclone reactor	650	74	Fast pyrolysis
Corn cob	Fluidized-bed reactor	550	56,8	Fast pyrolysis
Potato peel	Stainless steel fixed-bed reactor	550	24,8	Steam pyrolysis
Sawdust	Conical spouted bed reactor	500	75	Flash pyrolysis
Pinewood	Auger reactor	450	50	Fast pyrolysis
Furniture powder waste	Fluidized-bed reactor	450	65	Fast pyrolysis
Sugar cane waste	Fixed-bed fire-tube heating reactor	475	56	Fast pyrolysis
Corn cobs and stalks	Bubbling fluidized bed reactor	650	61,6	Fast pyrolysis
Laurel (<i>Laurus nobilis</i> L.) extraction	Fixed-bed reactor	500	21,9	Fast pyrolysis
Jute stick continuous feeding	Fluidized bed reactor	500	66,7	Fast pyrolysis
Apricot pulp	Fixed-bed reactor	550	22,4	Fast pyrolysis

Fast pirolisis lebih baik dari pada slow pirolisis karena laju pemanasan yang cepat (>100 °C/min) dan waktu tinggal gas yang rendah (< 2 s) bergantung pada zona panas (Mohan *et al.*,

2006). Dengan menggunakan cara *fast* pirolisis mampu menghasilkan biooil diatas 75% wt dari sumber biomassa kayu atau bahan baku yang kering (Qureshi *et al.*, 2019) dan dengan ukuran partikel bahan 2-3 mm (Bridgwater, 2012). Para peneliti juga mencoba untuk memodifikasi desain reaktor untuk meningkatkan jumlah biooil dengan berbagai tipe pengembangan reaktor *slow* pirolisis. Pengaruh suhu pada *fast* pirolisis, jenis biomassa dan tipe reaktor terhadap hasil bio-oil dapat dilihat pada Tabel 4.

3) *Flash Pyrolysis*

Flash pyrolysis dapat dipertimbangkan sebagai *fast pyrolysis* yang ditingkatkan dan dimodifikasi. Suhu *flash* pirolisis adalah 900 sampai 1200 °C, dengan kecepatan laju pemanasan sangat cepat berkisar 0.1 – 1 detik (Li *et al.*, 2012). Proses transfer panas dan massa bersama dengan reaksi kinematika kimia dan fase transisi komposisi senyawa biomassa dalam menghasilkan produk *flash* pirolisis. Laju pemanasan yang cepat dikombinasikan dengan suhu tinggi dan waktu tinggal uap yang rendah menyebabkan hasil cairan yang tinggi tetapi hasil arang menurun. Suhu *flash pyrolysis* adalah suhu operasi yang tinggi yaitu > 600 °C dan laju pemanasan yang tinggi (1000 °C/menit). Biasanya proses ini menghasilkan lebih banyak gas dari pada cairan dan solid.

Tantangan terbesar untuk menggunakan *flash* pirolisis pada skala industri adalah mengkonfigurasi reaktor untuk *flash* pirolisis dimana biomassa masukan dapat berada dalam waktu yang sangat singkat di bawah laju pemanasan yang sangat tinggi.

Masalah dalam reaktor *flash* pirolisis adalah stabilitas dan kualitas bio-oil karena sangat dipengaruhi oleh arang / abu yang ada dalam produk. Tidak hanya itu, arang yang ada dalam bio-oil dapat mengkatalis reaksi polimerisasi di dalam produk cair yang menyebabkan peningkatan viskositas minyak.

4) Terofaksi

Terofaksi merupakan proses pirolisis pada temperatur 200-300 °C dengan laju pemanasan yang lambat (5-7 °C/menit) dimana produk utama yang dihasilkan adalah padatan yang kaya akan karbon. Pirolisis cepat dan pirolisis lambat (termasuk torrefaction) adalah proses termokimia yang melibatkan konversi biomassa menjadi produk cair atau padat. Pirolisis cepat umumnya digunakan untuk memaksimalkan hasil produk bio-oil, manfaatnya adalah bio-oil memiliki nilai kalori yang setara dengan bahan bakar minyak (Nachenius *et al.*, 2013). Perbedaan jenis proses pirolisis dapat dilihat pada Tabel 5.

3.4 Reaktor Pirolisis

Berbagai jenis reaktor pirolisis telah dirancang untuk mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar fuel. Hasil yang didapatkan dari proses ini tergantung pada konfigurasi reaktor dan kondisi

operasional. Untuk memaksimalkan produk akhir pirolisis tergantung pada konsep perpindahan panas, pasokan panas, bahan yang mudah menguap (*volatile*) dan waktu tinggal.

Reaktor pirolisis adalah alat pengurai senyawa-senyawa organik yang dilakukan dengan proses pemanasan tanpa berhubungan langsung dengan udara luar dengan suhu 300-600°C. Reaktor pirolisis dibalut dengan selimut dari bata dan tanah untuk menghindari panas keluar berlebih, memakai bahan bakar kompor minyak tanah atau gas.

Table 5. Beberapa Tinjauan tentang Parameter Pirolisis dan Rendemen Hasil untuk Berbagai Macam Teknologi

Proses	Suhu Reaksi (°C)	Heating Rate	Residence Time	Ukuran Bahan Baku	Jumlah hasil (%)	Sumber
Slow pyrolysis	300–550	<50°C/min (0.1-0.8°C/s)	5-30 min; 25-35 h	Briquette / whole	Bio-oil: 20-50 Biochar: 25-35 Gas: 20-50	Hornung (2014); Bridgwater (2012); Brown & Holmgren (2009)
Intermediate pyrolysis	300–450	200-300°C/min (3-5°C/s)	1-10 min	Coarse / chopped	Bio-oil: 35-50 Biochar: 25-40 Gas: 20-30	Hornung (2014); Bridgwater et al. (2012); Brown & Holmgren (2009)
Fast pyrolysis	300 – 1000	10 - 1000°C/s	< 2s	Finely ground	Bio-oil: 60-75 Biochar: 10-25 Gas: 10-30	Hornung (2014); Bridgwater, (2012); Brown & Holmgren (2009); Mohan et al. (2006)

Reaktor pirolisis adalah alat pengurai senyawa-senyawa organik yang dilakukan dengan proses pemanasan tanpa berhubungan langsung dengan udara luar dengan suhu 300-600°C. beberapa jenis reaktor pirolisis yang sering digunakan adalah *Fixed-Bed Pyrolyzer*, *Bubbling Fluidized-Bed Reactors*, *Circulating Fluidized Bed*, *Ultra – Rapid Pyrolyzer*, *Rotating Cone*, *Ablative Pyrolyzer* dan *Vacuum Pyrolyzer*

Reaktor digunakan untuk menentukan kualitas dari pindah panas, waktu proses dari fase gas dan fase cair dan keluaran dari produk utama (Panda et al., 2010). Reaktor yang digunakan mempunyai ukuran diameter 20 cm dan tinggi 40 cm. Pirolisis dilangsungkan pada temperatur 250-420 °C dan waktu reaksi selama 0- 60 menit. Dari semua variabel yang dipelajari suhu memberi pengaruh yang paling nyata (Ridhuan & Suranto, 2017).

3.5 Produk Pirolisis

Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H₂, CO, CO₂, H₂O dan CH₄), tar, dan char. Semua produk dari pirolisis bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan. Selain tiga jenis produk tersebut teknologi pirolisis juga menghasilkan produk lain. Adapun produk pirolisis lainnya antara lain: arang (biochar), torrefied wood, arang aktif, briket arang, bio-oil, syngas (Hakiem, 2011).

Hasil dan komposisi *bio-oil* tergantung pada komposisi biomassa dan parameter proses seperti suhu, waktu reaksi, kecepatan pemanasan, kecepatan pengaliran udara, ukuran partikel bahan dan komposisi kimia bahan biomassa serta pengaruh parameter ini terhadap hasil dan

kualitas *bio-oil* (Guedes *et al.*, 2018). Bio-oil adalah produk utama pirolisis kernel kelapa sawit pada suhu 650–850 °C, dengan massa dan hasil energi masing-masing 48,81–36,83% dan 56,16–41,28%. Fenol (13,49%) merupakan komponen utama biooil dari kernel, sedangkan asam asetat merupakan senyawa utama dalam minyak nabati (14,34%) (Chang *et al.*, 2016). Produk pirolisis biomassa dapat berupa absorben, bahan bakar fuel dan bahan kimia. Pada pirolisis limbah minyak kelapa sawit lebih banyak menghasilkan bio-oil daripada arang ataupun gas (Abnisa *et al.*, 2013).

4. Kesimpulan

Pirolisis merupakan salah teknik konversi termokimia yang dapat mengubah biomassa menjadi bio-oil, arang dan gas dengan menggunakan suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen. Teknik pirolisis terus dikembangkan untuk mendapatkan jumlah hasil yang optimal. Beberapa parameter pirolisis yang perlu dipertimbangkan adalah jenis dan komposisi biomassa, pretreatment biomassa, ukuran partikel bahan, kadar air bahan, suhu, laju pemanasan, laju aliran gas, waktu tinggal, jenis proses pirolisis dan tipe *reactor*. Produk pirolisis biomassa adalah bio-oil, arang dan gas.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penulisan artikel ini terutama kepada pembimbing penelitian. Semoga artikel ini bisa memberikan manfaat bagi kita semua.

Daftar Pustaka

- Abnisa, F., Arami-Niya, A., Daud, W. W., Sahu, J. N., & Noor, I. M. (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy conversion and management*, 76, 1073-1082. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.038>
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2014). Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.074>
- Ayllon, M., Aznar, M., Sánchez, J. L., Gea, G., & Arauzo, J. (2006). Influence of temperature and heating rate on the fixed bed pyrolysis of meat and bone meal. *Chemical Engineering Journal*, 121(2-3), 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.04.013>
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Amsterdam, Netherlands: Academic press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374988-8.00002-7>
- Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2-3), 87-102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Brown, R. C., & Holmgren, J. (2009). *Fast pyrolysis and bio-oil upgrading*. Gas, 13, 25. Retrive from https://www.researchgate.net/publication/204979128_Fast_pyrolysis_and_bio-oil_upgrading
- Chang, G., Huang, Y., Xie, J., Yang, H., Liu, H., Yin, X., & Wu, C. (2016). The lignin pyrolysis composition and pyrolysis products of palm kernel shell, wheat straw, and pine sawdust. *Energy Conversion and Management*, 124, 587-597. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.038>
- Cheng, W., & Zhao, Q. (2020). A modified quasi-boundary value method for a two-dimensional inverse heat conduction problem. *Computers & Mathematics with Applications*, 79(2), 293-302 <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.06.031>
- Chintala, V., Kumar, S., Pandey, J. K., Sharma, A. K., & Kumar, S. (2017). Solar thermal pyrolysis of non-edible seeds to biofuels and their feasibility assessment. *Energy Conversion and Management*, 153, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.029>

- Damanhuri, E. (2010). *Pengelolaan Bahan berbahaya dan beracun (B3)*. Bandung, Indonesia: Institusi Teknologi Bandung.
- Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
- Lazzari, E., Schena, T., Primaz, C. T., da Silva Maciel, G. P., Machado, M. E., Cardoso, C. A. L., ... & Caramão, E. B. (2016). Production and chromatographic characterization of bio-oil from the pyrolysis of mango seed waste. *Industrial Crops and Products*, 83, 529-536. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.073>
- Encinar, J. M., Beltran, F. J., Bernalte, A., Ramiro, A., & Gonzalez, J. F. (1996). Pyrolysis of two agricultural residues: olive and grape bagasse. Influence of particle size and temperature. *Biomass and Bioenergy*, 11(5), 397-409. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(96\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(96)00029-3)
- Fassinou, W. F., Van de Steene, L., Toure, S., Volle, G., & Girard, P. (2009). Pyrolysis of Pinus pinaster in a two-stage gasifier: Influence of processing parameters and thermal cracking of tar. *Fuel processing technology*, 90(1), 75-90. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.016>
- Garcia-Perez, M., Shen, J., Wang, X. S., & Li, C. Z. (2010). Production and fuel properties of fast pyrolysis oil/bio-diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 296-305 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.012>
- Belotti, G., de Caprariis, B., De Filippis, P., Scarsella, M., & Verdone, N. (2014). Effect of *Chlorella vulgaris* growing conditions on bio-oil production via fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 61, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.011>
- Guedes, R. E., Luna, A. S., & Torres, A. R. (2018). Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 129, 134-149. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>
- Hakiem, Ilmiawan. (2011). Pengaruh Abu Sekam sebagai Cementitious Terhadap Beton.
- El-barbary, M. H., Steele, P. H., & Ingram, L. (2009). Characterization of fast pyrolysis bio-oils produced from pretreated pine wood. *Applied biochemistry and biotechnology*, 154(1), 3-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-008-8445-3>
- Hornung, A. (2014). *Transformation of biomass: theory to practice*. New Jersey, United States: John Wiley & Sons.
- Howe, D., Westover, T., Carpenter, D., Santosa, D., Emerson, R., Deutch, S., ... & Lukins, C. (2015). Field-to-fuel performance testing of lignocellulosic feedstocks: an integrated study of the fast pyrolysis–hydrotreating pathway. *Energy & Fuels*, 29(5), 3188-3197. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00304>
- Huang, A. N., Hsu, C. P., Hou, B. R., & Kuo, H. P. (2018). Production and separation of rice husk pyrolysis bio-oils from a fractional distillation column connected fluidized bed reactor. *Powder Technology*, 323, 588–593. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.03.052>
- Hulet, C., Briens, C., Berruti, F., & Chan, E. W. (2005). A review of short residence time cracking processes. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 3(1), 1–71. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1139>
- Ji-Lu, Z. (2007). Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80(1), 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.030>
- Jung, S. H., Kang, B. S., & Kim, J. S. (2008). Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 240-247. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.04.001>
- Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
- Kim, K. H., Eom, I. Y., Lee, S. M., Choi, D., Yeo, H., Choi, I. G., & Choi, J. W. (2011). Investigation of physicochemical properties of biooils produced from yellow poplar wood (*Liriodendron tulipifera*) at various temperatures and residence times. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.04.002>
- Li, Z., Wang, L., Hays, T. S., & Cai, Y. (2008). Dynein-mediated apical localization of crumbs transcripts

- is required for Crumbs activity in epithelial polarity. *Journal of Cell Biology*, 180(1), 31–38. <https://doi.org/10.1083/jcb.200707007>
- Mondal, S., Mondal, A. K., Chintala, V., Tauseef, S. M., Kumar, S., & Pandey, J. K. (2021). Thermochemical pyrolysis of biomass using solar energy for efficient biofuel production: a review. *Biofuels*, 12(2), 125-134. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1461512>
- Madadi, M., & Abbas, A. (2017). Lignin degradation by fungal pretreatment: a review. *J. Plant Pathol. Microbiol*, 8(2), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000398>
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. In *Energy and Fuels*. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Mohamed, A. R., Hamzah, Z., Daud, M. Z. M., & Zakaria, Z. (2013). The effects of holding time and the sweeping nitrogen gas Flowrates on the pyrolysis of EFB using a fixed-bed reactor. *Procedia Engineering*, 53, 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.024>
- Islam, M. R., Parveen, M., & Haniu, H. (2010). Properties of sugarcane waste-derived bio-oils obtained by fixed-bed fire-tube heating pyrolysis. *Bioresource Technology*, 101(11), 4162-4168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.137>
- Nachenius, R. W., Ronsse, F., Vanderbosh, R. H., & Prins, W. (2013). *Biomass pyrolysis*. Enschede, Netherlands: BTG Biomass Technology Group.
- Ohliger, A., Förster, M., & Kneer, R. (2013). Torrefaction of beechwood: A parametric study including heat of reaction and grindability. *Fuel*, 104, 607-613. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.112>
- Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 233-248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.005>
- Park, H. J., Park, Y. K., & Kim, J. S. (2008). Influence of reaction conditions and the char separation system on the production of bio-oil from radiata pine sawdust by fast pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 89(8), 797-802. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.01.003>
- Pattiya, A., & Suttibak, S. (2012). Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.02.010>
- Perkins, G., Bhaskar, T., & Konarova, M. (2018). Process development status of fast pyrolysis technologies for the manufacture of renewable transport fuels from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 292-315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.048>
- Qureshi, K. M., Abnisa, F., & Daud, W. M. A. W. (2019). Novel helical screw-fluidized bed reactor for bio-oil production in slow-pyrolysis mode: A preliminary study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 142, 104605. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.021>
- Ridhuan, K., & Suranto, J. (2017). Perbandingan Pembakaran Pirolisis Dan Karbonisasi Pada Biomassa Kulit Durian Terhadap Nilai Kalori. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 5(1), 50–56. <https://doi.org/10.24127/trb.v5i1.119>
- Li, R., Zhong, Z., Jin, B., & Zheng, A. (2012). Selection of temperature for bio-oil production from pyrolysis of algae from lake blooms. *Energy & fuels*, 26(5), 2996-3002. <https://doi.org/10.1021/ef300180r>
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Guo, M., Borhani, T. N., Murthy Konda, N. V. S. N., Garcia, M. C., Wang, L., Hallett, J., & Shah, N. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 71, 1–80. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.006>
- Shen, J., Wang, X. S., Garcia-Perez, M., Mourant, D., Rhodes, M. J., & Li, C. Z. (2009). Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. *Fuel*, 88(10), 1810-1817. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.001>
- Singh, B. (2018). *13-Rice husk ash*. Retrived from <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00013-4>
- Sensoz, S., Demiral, İ., & Gerçel, H. F. (2006). Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. *Bioresource technology*, 97(3), 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.007>
- Sensoz, S., & Angın, D. (2008). Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) seed press cake in a fixed-bed reactor: Part 2. Structural characterization of pyrolysis bio-oils. *Bioresource Technology*, 99(13), 5498-5504. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.004>
- Tripathi, M., Sahu, J. N., Ganesan, P., & Dey, T. K. (2015). Effect of temperature on dielectric properties and penetration depth of oil palm shell (OPS) and OPS char synthesized by microwave pyrolysis of OPS. *Fuel*, 153, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.118>

- Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, Y. M. (2007). Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions. *Bioresource technology*, 98(1), 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.12.005>
- Tsai, W. T., Chang, C. Y., & Lee, S. L. (1997). Preparation and characterization of activated carbons from corn cob. *Carbon*, 35(8), 1198-1200.
- Uzun, B. B., Pütün, A. E., & Pütün, E. (2006). Fast pyrolysis of soybean cake: product yields and compositions. *Bioresource technology*, 97(4), 569-576. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.026>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.05.004>
- Yeasmin, H., Mathews, J. F., & Ouyang, S. (1999). Rapid devolatilisation of Yallourn brown coal at high pressures and temperatures. *Fuel*, 78(1), 11-24. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00119-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00119-7)
- Zhao, X., Zhou, H., Sikarwar, V. S., Zhao, M., Park, A. H. A., Fennell, P. S., ... & Fan, L. S. (2017). Biomass-based chemical looping technologies: the good, the bad and the future. *Energy & Environmental Science*, 10(9), 1885-1910. <https://doi.org/10.1039/c6ee03718f>
- Zhang, H., Gao, Z., Ao, W., Li, J., Liu, G., Fu, J., ... & Dai, J. (2017). Microwave-assisted pyrolysis of textile dyeing sludge using different additives. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127, 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.08.014>