



AGROINDUSTRIAL TECHNOLOGY JOURNAL

ISSN : 2599-0799 (print) ISSN : 2598-9480 (online)

Accredited SINTA 5 No.85/M/KPT/2020

PENGARUH TIPE BIOMASSA PADA PRODUK PIROLISSI: A REVIEW

Effect of Biomass Types on Products of Pyrolysis: A Review

Nur Aini¹, Siti Jamilatun^{1*}, Joko Pitoyo¹

¹Department of Chemical Engineering, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Banguntapan, Bantul, D.I.Yogyakarta, 55191

^{*}Email Korespondensi: sitijamilatun@che.uad.ac.id

Info Artikel : Diterima 16 Maret 2022, Diperbaiki 22 Mei 2022, Disetujui 26 Mei 2022

ABSTRACT

The exploitation of fossil energy causes non-renewable reserves to dwindle and causes global warming; climate change endangers living things. Energy sources from the second generation, namely lignocellulosic-based biomass, provide development opportunities, not interfere with food reserves, and are easy to cultivate. One technology that is feasible to use to treat lignocellulosic biomass is pyrolysis. Pyrolysis can convert lignocellulosic biomass (including lignin, cellulose, and hemicellulose) into solid, liquid, and gaseous. The pyrolysis mechanism by thermal decomposition goes through several stages, namely charcoal formation, depolymerization, fragmentation, and other secondary reactions. This paper provides insight into the pyrolysis of lignocellulose and its by product. Several parameters, equivalent to reaction environment, temperature, residence time, and heating rate, considerably have an effect on the pyrolysis process. The results of the pyrolysis of various biomass with certain operating conditions obtained yields/products in the form of Bio-oil, Gas and Bio-char with different percentages depending on the treatment.

Keywords: Biomass; Bio-Oil; Lignocellulose; Pyrolysis

ABSTRAK

Eksploitasi energi fosil menyebabkan cadangan *non-renewable* semakin menipis dan menyebabkan pemanasan global, akibatnya adalah perubahan iklim yang membahayakan makhluk hidup. Sumber energi yang berasal dari generasi ke 2 yakni biomassa berbasis lignoselulosa memberikan peluang dikembangkan, tidak mengganggu cadangan pangan dan mudah dibudidayakan. Salah satu teknologi yang layak digunakan untuk mengolah biomassa lignoselulosa adalah pirolisis. Pirolisis dapat mengubah biomassa lignoselulosa (termasuk komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin) menjadi produk padat, cair, dan gas melalui dekomposisi termal yang efisien. Mekanisme pirolisis melalui beberapa tahapan, yaitu pembentukan arang, depolimerisasi, fragmentasi, dan reaksi sekunder lainnya. Hasil review ini memberikan pengetahuan tentang pirolisis lignoselulosa dan produk sampingannya. Pembahasan beberapa parameter seperti lingkungan reaksi, suhu, waktu tinggal, dan laju

pemanasan, yang secara signifikan mempengaruhi proses pirolisis. Hasil pirolisis dari berbagai biomassa dengan kondisi operasi tertentu maka diperoleh yield/produk berupa Bio-oil, Gas dan Bio-char dengan persentase yang berbeda-beda tergantung perlakuan.

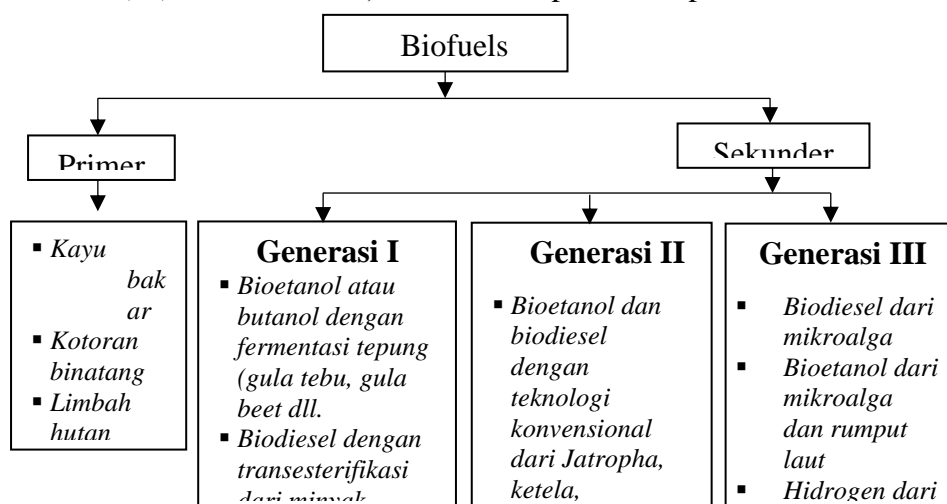
Kata kunci: Biomassa; Bio-oil; Lignoselulosa; Pirolisis

1. PENDAHULUAN

Dominasi penggunaan energi fosil dari *non-renewable energy* terbukti menyebabkan menipisnya cadangan minyak bumi, menghasilkan gas CO₂ dan emisi lainnya seperti NO_x, SO_x ke atmosfer yang menyebabkan polusi. Kondisi tersebut mengakibatkan pemanasan global yang menjadi ancaman bagi perubahan iklim dunia (A. Marcilla, 2013)(S. Mohapatra, 2013)(JP Maity,J., 2014). Akibatnya, pengembangan sumber energi yang berasal dari sumber terbarukan (*renewable energy*) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan mendesak untuk dilakukan. Konsumsi energi dari sumber *renewable energy* seperti: angin, matahari, ombak dan biomassa telah meningkat menjadi rata-rata 2,696 % per tahun di seluruh dunia antara tahun 2012 hingga 2040 (ELA, 2016) (F.Wieland, 2012).

Peningkatan tersebut memberikan peluang untuk mengembangkan sumber energi dari biomassa menjadi bahan bakar (biofuel) yang layak untuk digunakan (Sunarno,2016).

Secara umum biofuel dibagi menjadi biofuel primer dan sekunder. Biofuel primer seperti kayu bakar digunakan dalam bentuk yang tidak diproses terutama untuk pemanasan, sedangkan biofuel sekunder seperti bioetanol dan biodiesel diproduksi dengan memproses biomassa yang dapat digunakan pada kendaraan dan berbagai proses industri. Biofuel sekunder dapat dikategorikan menjadi tiga generasi: biofuel generasi pertama, kedua dan ketiga berdasarkan perbedaan parameter, seperti jenis teknologi pemrosesan, jenis bahan baku atau tingkat perkembangannya (Edwards, J, 2008) (Dragone, G, 2010). Skema klasifikasi biofuel dapat dilihat pada Gambar 1.

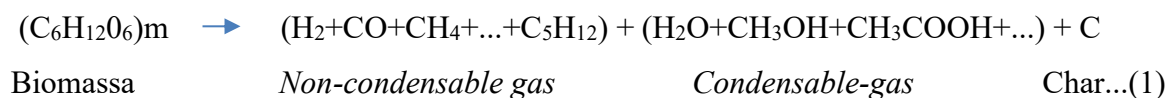


Gambar 1. Klasifikasi biofuel [8]

Biofuel generasi pertama (G1) berasal dari biji-bijian dan gula untuk membuat etanol dan minyak pangan dapat digunakan untuk membuat biodiesel. Generasi kedua (G2) berasal dari lignoselulosa untuk membuat alkohol dan *green diesel*, dan minyak non pangan untuk membuat *green diesel*. Sementara itu, generasi ketiga (G3) berasal dari biomassa mikroalga untuk membuat hidrogen dan biodiesel (Dragone, G, 2010) (Maity, J, 2014).

Biofuel G1 sudah mulai ditinggalkan karena berbenturan dengan cadangan pangan. Pengembangan biofuel G3 saat ini masih mempunyai kendala dalam pemilihan jenis mikroalga yang layak dan kendala kultivasi

Dibawah ini reaksi kimia dari pirolisis (Basu, P, 2010):



Dari Persamaan (1), produk pirolisis biomassa berupa *non-condensable gas* (H_2 , CO , CO_2 dan hidrokarbon dengan jumlah C yang rendah seperti CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_3H_8 , dan gas yang lain seperti NH_3 , NOX , SO_2) dan *condensable gas* (H_2O , CH_3OH , CH_3COOH dll) dan *char*. Fase gas terkondensasi berupa cairan hitam yang kental dinamakan *bio-oil*, atau bisa juga disebut *pyrolysis oil*, *bio-crude oil*, *bio-fuel oil*, *wood liquid*, *wood oil*, *liquid*

untuk pengembangan secara komersil. Sementara itu sumber biofuel G2 mempunyai banyak kelebihan, yakni sumber ini berbasis lignoselulosa yang mudah dikembangkan dan tidak mengganggu cadangan pangan (Dragone, G, 2010) (Suganya, T, 2016).

Pirolisis lignoselulosa

Pirolisis (*destructive distillation*) adalah *thermochemical decomposition* dari biomassa pada suhu $400-600\text{ }^\circ\text{C}$, berlangsung tanpa adanya penambahan oksigen sehingga mengakibatkan peruraian komponen-komponen penyusun kayu keras dan dihasilkan tiga produk yaitu padatan, cairan dan gas (Edwards, J, 2008) (Dickerson, T, 2013).

smoke, *wood distillates*, dan *pyroligneous tar* (Kan, T, 2016).

Secara umum, pirolisis biomassa mencakup dua langkah utama: *primary* dan *secondary pyrolysis*. Produk utama dari pirolisis adalah gas yang tidak terkondensasi (misalnya, CO , H_2 , dan CO_2), hidrokarbon ringan (misalnya, CH_4 , C_2H_4), gas yang dapat dikondensasi (*tar*), residu padat (*char*), dan abu mineral. Jika produk pirolisis primer mengalami reaksi lebih lanjut

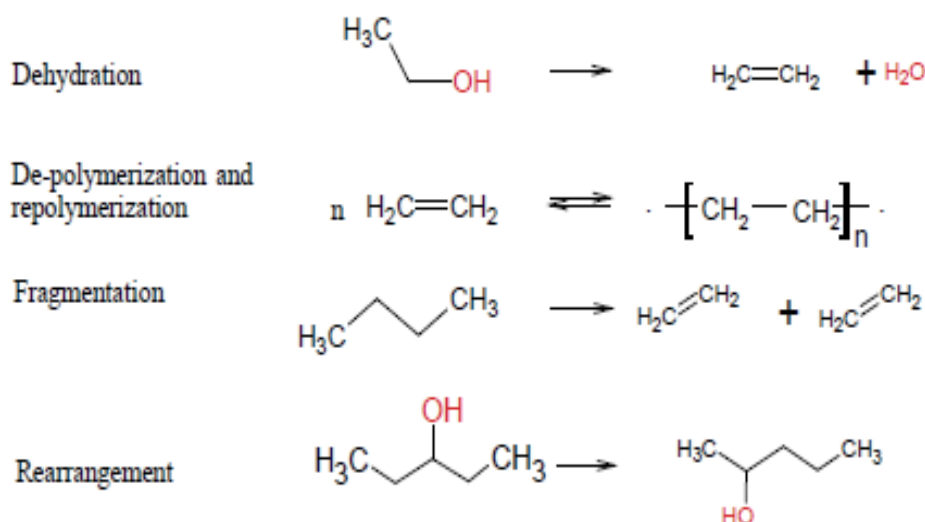
pada waktu tinggal yang lebih lama serta suhu yang lebih tinggi menyebabkan terjadi pirolisis sekunder (Basu, P, 2010).

Pirolisis sekunder meliputi proses seperti *cracking*, *polymerization*, *condensation*, dan *carbon deposition*. Pirolisis sekunder tidak dipelajari secara luas seperti pirolisis primer, beberapa reaksi sekunder seperti tar cracking memiliki efek yang signifikan terhadap distribusi produk. Selama pirolisis sekunder, tar primer terurai menjadi gas yang lebih ringan atau berpolimerisasi untuk membentuk hidrokarbon yang lebih berat. Distribusi komponen produk pirolisis yang mudah menguap tergantung pada tingkat pemanasan, suhu, dan jenis biomassa, dll (Dickerson, T, 2013).

Pada biomassa lignoselulosa penyusun utamanya adalah selulosa (*glucosan* polimer),

hemiselulosa (polisakarida memproduksi gula kayu), dan lignin (senyawa organik multi-ring). Walaupun ada variasi dalam berbagai jenis kayu tetapi secara umum kandungan selulosa sekitar 50 %, hemiselulosa dan lignin masing-masing 25 % berat kering. Selulosa, hemiselulosa dan lignin mempunyai karakteristik berbeda pada tingkat pemanasan dan suhu yang berbeda.

Reaksi pirolisis adalah reaksi kompleks dan tidak sepenuhnya dapat dipahami komposisi hasil yang kompleks. Pada umumnya reaksi pirolisis diklasifikasikan sebagai campuran simultan dehidrasi, depolimerisasi, repolimerisasi, fragmentasi, penataan ulang dan kondensasi, yang diwakili oleh beberapa contoh seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Macam-macam jenis reaksi pada pirolisis biomassa (Dickerson, T, 2013)

Hemisellulosa terdegradasi pada suhu 150-300 °C dengan hasil dominan asam asetat dan furfural, dan komponen lain berupa *furan*, *methanol*, *furanone*, C1-C4 *oxygenates* seperti: *formaldehyde*, *hydroxyacetaldehyde*, *acetone*, *acetol*, *lactones*, dll., C5 dan C6-*anhydrosugars*, *humic substances*.

Selulosa terdegradasi pada suhu 200-400 °C dengan hasil dominan adalah *levoglucosan*, *hydroxyacetaldehyde* dan komponen lain berupa 1,6-*anhydro-β-D-glucofuranose*, *furfural*, *hydroxymethyl furfural*, *furan*, C1-C4 *oxygenates* (seperti: *formaldehyde*, *methanol*, *formic acid*, *lactones*, *acetone*, *acetol*, dll).

Adapun lignin terdegradasi pada suhu 150-600 °C dengan produk utama 2-*methoxyphenols* (*guaiacol*), 2,6-*dimethoxyphenols* (*syringol*), *catechols*, *phenol*, *alkyl-phenols methanol* dan produk yang lain seperti *oxygenated aromatics* (seperti: *coumaran*), *furfural*, *acetic acid*, C1-C4 *oxygenates* (seperti: *acetone*, *formaldehyde*, *acetol*, *lactones*, *formic acid* dll.) (De Wild, 2011).

Selulosa terdegradasi pada suhu 200-400 °C dengan hasil dominan adalah *levoglucosan*, *hydroxyacetaldehyde* dan komponen lain berupa 1,6-*anhydro-β-D-glucofuranose*, *furfural*, *hydroxymethyl furfural*, *furan*, C1-C4 *oxygenates* (seperti: *methanol*, *formaldehyde*, *formic acid*, *acetone*, *acetol*, *lactones*, dll.).

Adapun lignin terdegradasi pada suhu 150-600 °C dengan produk utama 2-*methoxyphenols* (*guaiacol*), 2,6-*dimethoxyphenols* (*syringol*), *catechols*, *phenol*, *alkyl-phenols methanol* dan produk yang lain seperti *oxygenated aromatics* (seperti: *coumaran*), *furfural*, *acetic acid*, C1-C4 *oxygenates* (seperti: *formaldehyde*, *formic acid*, *acetone*, *acetol*, *lactones*, dll.) (De Wild, 2011).

Macam-macam pirolisis

Berdasarkan kondisi operasi, proses pirolisis dibagi menjadi: pirolisis konvensional (*slow-carbonisation*), *slow-torrefaction*, *intermediate*, dan *fast pyrolysis* pada Tabel 1.

Dari Tabel 1 ditampilkan pengaruh suhu, *heating rate*, *residence time* terhadap jumlah produk yang dihasilkan. Pirolisis lambat, *heating rate* nya adalah 0,1-1 °C/det dengan *residence time* pada kisaran menit sampai jam, suhu antara 400-600 °C. Waktu reaksi yang lama menyebabkan uap pirolisis bereaksi satu dengan yang lain membentuk residu padat berupa *char* yang tinggi dan produk cair rendah. Untuk *fast pyrolysis* dengan *yield* cairan yang tinggi dapat dicapai dengan *heating rate* 10 sampai >1000 °C/det, waktu tinggal kurang dari 2 detik, dan suhu optimum antara 400-650 °C yang disertai pendinginan uap secara cepat (Suganya, T, 2016).

Tabel 1. Macam-macam pirolisis dan produknya (De Wild, 2011)

Jenis pirolisis	Kondisi	Cairan	Padatan	Gas
Cepat	Suhu reaktor 500 °C, <i>heating rate</i> sangat tinggi >1000 °C/det., <i>Short hot vapour residence</i> ≈1 det	75 %	12 %	13%
Intermediate	Suhu reaktor 400-500 °C, <i>heating rate</i> 1-1000 °C/det., <i>hot vapour residence</i> ≈10-30 det.	50 %	25 %	25%
Lambat-Torrefaction	Suhu reaktor ≈ 290 °C, <i>heating rate</i> diatas 1°C/det., <i>solids residence time</i> ~30 men.	0-5 %	77 %	23%
Lambat-Carbonisation	Suhu reaktor 400-500 °C, <i>heating rate</i> diatas 1 °C/det., <i>long solid residence</i> dari jam sampai hari	30 %	33 %	35%

Hal-hal yang mempengaruhi pirolisis

Komposisi produk pirolisis sangat dipengaruhi oleh disain reaktor, jenis biomassa, karakteristik fisik (ukuran butir, bentuk dan struktur) dan kimia dari biomassa dan parameter-parameter seperti suhu, *heating rate*, *residence time*. Selain itu pengaruh yang lain adalah tekanan, komposisi gas ambien dan keberadaan mineral katalis (Basu, P, 2010) (Campanella, A, 2012) (Dickerson, T, 2013) (Zhenga, Y, 2018).

1. Ukuran partikel biomassa

Pengaruh ukuran butir biomassa terhadap *yield* produk pirolisis telah banyak diteliti. Hu *et al.* (2013) memaparkan pengaruh kenaikan ukuran butir antara 0,25–2,5 mm pada pirolisis (500 °C) akan

mengakibatkan *yield* bio-oil turun tajam, dan *yield* char naik tajam pada ukuran butir 1-2.5 mm, adapun *yield* gas hanya turun sangat kecil atau relatif stabil pada semua ukuran butir.

Ukuran partikel berpengaruh signifikan terhadap fenomena transfer panas dan massa pada proses pirolisis. Partikel yang lebih besar menyiratkan gradien termal yang lebih besar dan juga waktu tinggal aliran cukup lama yang menyebabkan terjadinya reaksi sekunder. Peningkatan ukuran partikel juga menyebabkan pengurangan hasil cairan karena aktivitas reaksi sekunder yang mengarah pada peningkatan hasil gas untuk suhu eksternal lebih besar dari 800 K (Dermibas, A, 2002)

Bentuk partikel juga mempengaruhi proses pirolisis (Bae, Y. J, 2011). menyatakan bahwa partikel bola memiliki hasil arang dan waktu konversi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan berbentuk partikel slab dan silinder (Sharma, A, 2015).

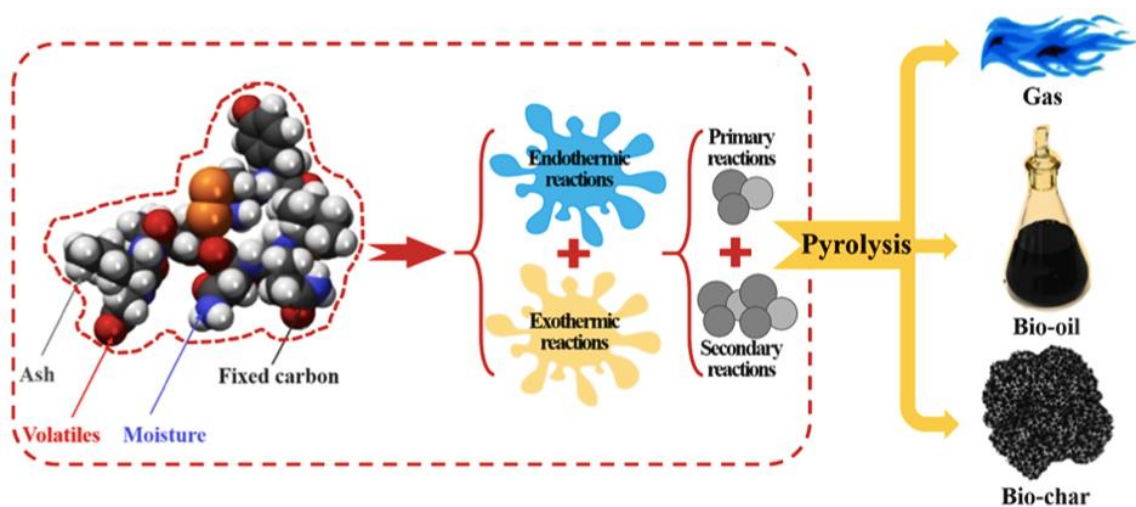
2. Suhu pirolisis

Suhu dalam proses pirolisis merupakan parameter operasi yang paling signifikan, Pirolisis umumnya dilakukan pada kisaran suhu 400-600 °C. Suhu reaksi akan meningkatkan hasil produk cair tetapi peningkatan suhu lebih lanjut (> 500 °C) akan menurunkan hasil cairan. Pada suhu yang lebih rendah dari 400 °C hasil bio-oil juga rendah, hal ini disebabkan suhu reaksi terlalu rendah untuk menyelesaikan proses pirolisis. Akan tetapi pada peningkatan suhu diatas 500 °C, terjadi reaksi sekunder sehingga menurunkan hasil bio-oil dan meningkatkan hasil gas (Sharma, A, 2015).

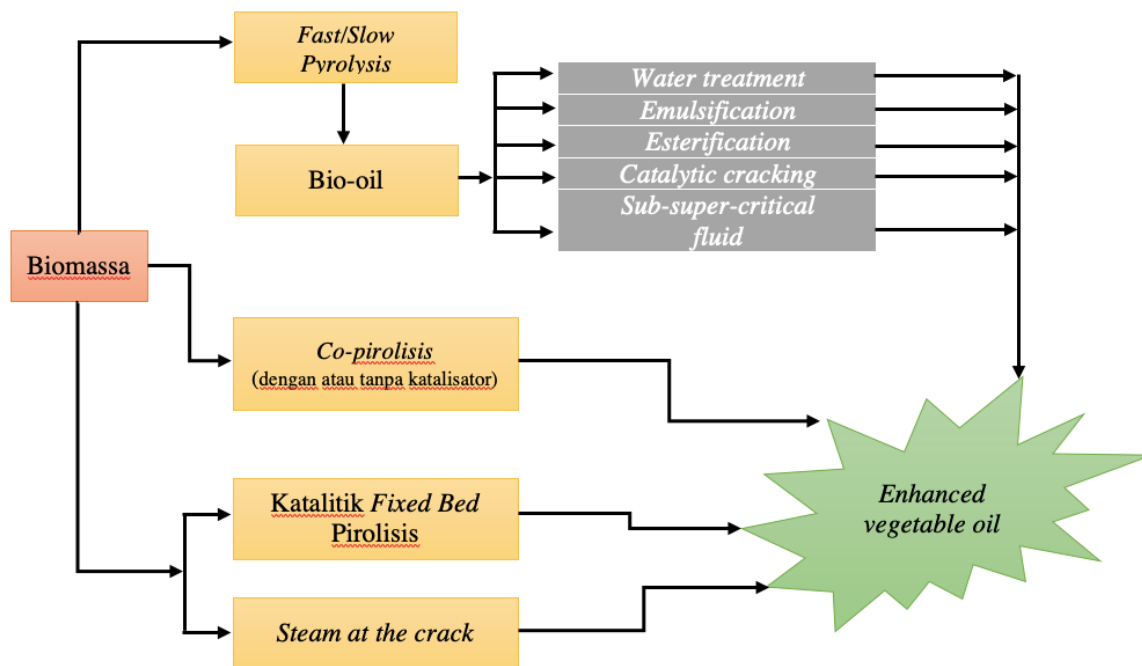
3. Heating rate

Laju pemanasan biomassa dalam reaktor pirolisis adalah parameter yang paling penting dan signifikan dalam menghasilkan bio-oil. Pengaruh laju pemanasan dapat dilihat pada *fast pyrolysis*, akan dihasilkan produk cair yang jauh lebih banyak daripada proses *slow pyrolysis*. Hal ini disebabkan fragmentasi biomassa menjadi cepat karena tingkat pemanasan tinggi yang dapat meningkatkan hasil volatil. *Heating rate* yang cepat mengurangi kendala perpindahan panas dan massa, dan juga meningkatkan produk volatile dengan dekomposisi endotermik yang cepat, sehingga membatasi terjadinya reaksi sekunder, *cracking* dan repolimerisasi (Sharma, A, 2015).

Skema pirolisis biomassa lignoselulosa dapat dilihat pada Gambar 3. Adapun Gambar 4 menyajikan gambaran umum tentang berbagai teknik untuk meningkatkan minyak pirolisis.



Gambar 3. Skema pirolisis untuk biomassa lignoselulosa (Hoang A T, 2021)



Gambar 4. Teknik Peningkatan Pirolisis Bio-oil (Uzoejinwa B, 2018)

Pirolisis Skala Pilot Plant

Unit pirolisis yang dioperasikan diseluruh dunia beserta tipe reaktor dan produk yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Unit Pirolisis skala Pilot Plant yang telah dioperasikan diseluruh dunia

No	Tipe Pirolisis	Tipe Reaktor Pirolisis	Desain Reaktor dan Laboratorium	Lokasi	Umpun Biomassa	Yield Produk	Ref
1	<i>Non-catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Conical spouted bed</i>	<i>University of the Basque Country UPV/EHU</i>	Spain	25 kg/h	Bio-oil (65.8 wt%), pyro-gas (18.8 wt) and bio-char (15.4 wt%)	Fernandez, 2013
2	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Circulating fluidized bed</i>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>	United States	30 kg/h	Bio-oil, bio-char and pyro-gas	Gao, X, 2020
3	<i>Non-catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Fluidized bed</i>	<i>Sardar Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	3 kg/h	Bio-oil (~38 wt%), pyro-gas (~50 wt) and bio Char (~12 wt%)	Karmee, S.K, 2020
4	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Fluidized bed</i>	<i>Sardar Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	3 kg/h	Bio-oil (~44 wt%), pyro-gas (~52 wt%) and bio-char (~4 wt%)	Karmee, S.K, 2020
5	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Circulating fluidized bed</i>	<i>Research Institute of Petroleum Technology</i>	Republic of Korea	42 kg/h	Bio-oil (60 wt%),	Park, J.Y, 2019
6	<i>Non-catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Fixed bed</i>	<i>Sardar Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	15 kg/h	Bio-oil (34.9 wt%), pyro-gas (26.5 wt) and bio char (38.6 wt%)	Soni, B, 2020
7	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Fixed bed</i>	<i>Sarda Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	15 kg/h	Bio-oil (41.05 wt%), pyro-gas (31.6 wt) and bio-char (27.9 wt%)	Soni, B, 2020

Tabel 3. menyajikan berbagai produk yang diperoleh dari berbagai pirolisis menggunakan biomassa yang berbeda menggunakan pirolisis cepat dan menggunakan kondisi operasi yang berbeda. Secara umum dapat dilihat pada Tabel 3 berikut :

Tabel 3. Berbagai produk yang diperoleh dari pirolisis berbasis hemiselulosa dari biomassa lignoselulosa yang berbeda

No	Jenis biomassa lignoselulosa	Jenis Pirolisis	Kondisi Operasi	Reaktor/analisis digunakan	Jenis produk	Yield	Temuan Utama	Ref
1	<i>Wheat straw</i>	<i>Fast pyrolysis</i>	-	700 °C	Produk utama: Char. Produk lain: <i>carbon oxides, Acetic acid, char, 2-furaldehyde, some aromatic compounds and cyclopenten-1-one</i>	24 wt% char	Produk lain sangat dipengaruhi oleh suhu	Peng, Y, 2010
2	<i>Sugar cane bagasse</i>	<i>Fast pyrolysis</i>	<i>Tubular reactor</i>	550–850 °C, N ₂ , 300 mL/min	Produk utama: <i>Acetic acid</i>	41.2 % acetic acid	<i>Yield</i> produk dipengaruhi suhu	Peng, Y, 2011
3	<i>Xylan from wheat straw</i>	-	25–700 °C, 5–30 °C/min, N ₂ , 60mL/min	<i>Thermogravimetric analyzer</i>	Produk utama: Char. Produk lain: <i>acetic acid, carbon oxide, 2-furaldehyde, cyclopenten-1-one</i> dan beberapa senyawa aromatis	24 % char	Rate of loss terjadi pada 315 °C	Peng, Y, 2011
4	<i>Hemicellulose from agricultural stalk, residues, softwood corn, rice straw, and hardwood</i>	<i>Fast pyrolysis</i>	550 °C	<i>Thermogravimetric analyzer/pyrolyzer gas chromatograph/ Mass spectrometry</i>	Produk utama: Char, Produk lain: <i>Acetic acid</i>	<i>Acetic acid</i> : 11.49, 17.82, 11.50, 7.15, 16.15, and 30 wt% of char, 10.74 wt% was obtained	<i>A neutral solvent, dimethylsulfoxide (DMSO)</i>	Neupane, S, 2015
5	<i>Corn stover</i>	<i>Fast pyrolysis</i>	<i>Pyrolyzer Gas chromatograph/ Mass spectrometry</i>	500 °C, 5 °C/min, N ₂ , 103 L/min	Produk utama: <i>Acetic acid</i> dan Furfural. Produk lain: <i>dianhydroxylopyranose, glycolaldehyde, furfural, anhydroxylopyranose, , methyl glyoxal, dan acetaldehyde</i>	52.56 % acetic acid [75 g] and 37.5 wt% furfural	Interaksi antara <i>cellulose, hemicellulose</i> dan lignin	Zhang, J, 2015

5. Kesimpulan

Porilisis merupakan proses terjadinya dekomposisi kimia dengan menggunakan suhu tinggi tanpa oksigen dan menghasilkan produk berupa bahan bakar padat, cair, karbon ataupun bio-oil. Dari review jurnal ini diperoleh hasil pirolisis dari berbagai biomassa dengan kondisi operasi suhu 300-800°C dan tekanan 1 atm maka diperoleh *yield*/produk berupa Bio-oil, Gas dan Bio-char dengan persentase yang berbeda-beda tergantung perlakuan. Ada beberapa jenis proses pirolisis yaitu pirolisis cepat dan pirolisis lambat, beberapa parameter yang mempengaruhi hasil produk pirolisis yaitu suhu pirolisis dan laju pemanasan, ukuran partikel, dan laju aliran nitrogen.

Ucapan Terimakasih

Para penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu menyelesaikan review artikel ini baik secara langsung maupun tidak langsung

Daftar Pustaka

- A. Marcilla, JCL Catalä, Garcia-Quesada, FJ. Valdés, dan MR Hernández, (2013) "*Tinjauan tentang konversi biomassa mikroalga*", *Perbarui Sust Energi Rev*, vol. 27, him. (11-19).
- S. Mohapatra dan K. Gadgil, (2013). "*Biomass: Sumber Utama Bio*

Energi", *Int.J. Perbarui. Res energi*, jilid 3(1), him. (20-23).

- JP Maity, J. Bundschuh, CY. Chen, dan P. Bhattacharya, (2014). "*Mikroalga untuk produksi biofuel generasi ketiga, mitigasi emisi gas rumah kaca dan pengolahan air limbah: Perspektif sekarang dan masa depan, Sedikit ulasan*", *Energi*, hal 1-10.
- Administrasi Informasi Energi (ELA), (2016). "*Energi Internasional Pandangan*."

<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.htm/diakses> Tanggal: 21 Juli 2016).

- F. Wieland, H. Gueldner dan OR Hild, "Energi terbarukan dan penerangan - secara logis atau artifisial, (2012). "*Konferensi Internasional tentang Penelitian dan Aplikasi Energi Terbarukan (ICRERA), Nagasaki*", 2012, him. (1-5); doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477351

- Sunarno, Rochmadi, P. Mulyono, dan A. Budiman, (2016). "*Catalytic cracking of the top phase fraction of bio-oil into upgrade liquid product*", *AIP Conference Proceedings*, 1737 .060008
- Edwards, J., (2008), "*Pyrolysis of biomass to produce bio-oil, biochar and combustible gas*", Palmerston North: Energy Postgraduate Conference School of Engineering and Advanced Technology Massey University.

- Dragone, G., Fernandes, B., Vicente, A., and Teixeira, J.A., (2010), “*Third generation biofuels from microalgae*”, In: Vilas AM, editor. Current research, technology and education topics in *Appl. Microbiol. Biot.*, Badajoz: Formatex Research Center; pp.(1355-1366).
- Maity, J.P., Bundschuh, J., Chen, C-Y., Bhattacharya, P., (2014), “*Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives: A mini review*”. *Energy*, Volume 78, pp. (104-113).
- Suganya, T, Varman, M., Masjuki, H.H., and Renganathan, S., (2016), “*Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach*”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 55, 909–941, 2016.
- Dickerson, T. and Soria, J., (2013), “*Catalytic fast pyrolysis: A Review*”, *Energy*, 6, (514-538).
- Basu, P., (2010), “*Biomassa gasification and pyrolysis practical design and theory*”, Elsevier, The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, UK, pp. (77-82).
- Kan, T., Strezov, V., and 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).
- De Wild, P.J., Reith, H., and Heeres, H.J., (2011), “*Biomass pyrolysis for chemicals*”, *Biofuels*, 2 (2), 185 – 208.
- Campanella, A. and Harold, (2012), *Fast pyrolysis of microalgae in a falling solids reactor: Effects of process variables and zeolite catalysts*, *Biomass. Bioenerg.*, 46, 218-232.
- Zhenga, Y., Taob, L., Yanga, X., Huang, Y., Liua, C., and Zhenga, Z., (2018). *Study of the thermal behavior, kinetics, and product characterization of biomass and low-density polyethylene co-pyrolysis by thermogravimetric analysis and pyrolysis-GC/MS*, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 133, (185–197).
- Dermibas, A. and Arin, G., (2002) “*An overview of biomass pyrolysis*”, *Energ. Sources*, 24, (471-482).
- ae, Y. J., Ryu, C., Jeon, J.K., Park, J., Suh, D. J., Suh, Y.W., and Park, Y.K., (2011). “*The characteristics of bio-oil produced from the pyrolysis of three marine macroalgae*”, *Bioresource Technol.*, 102(3), (3512–20).
- Sharma, A., Pareek, V., and Zhang, D., (2015). *Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, (1081–1096).

- Hoang A T , Hwai Chyuan Ong , I. M. Rizwanul Fattah , Chong C T , Chin Kui Cheng, R. Sakthivel, Yong Sik Ok. (2021). *Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability.* (1-27). 124279. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124279>.
- Uzoejinwa B B, He Xiuhua, Wang Shuang, Abomohra A E, Hu Yamin, Wang Qian. (2018). *Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide.* Energy Conversion and Management 163 .(468-492). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
- Fernandez-Akarregi, A.R., Makibar, J., Lopez, G., Amutio, M., Olazar, M., (2013). *Design and operation of a conical spouted bed reactor pilot plant (25kg/h) for biomass fast pyrolysis.* Fuel Process. Technol. 112, (48–56). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.02.022>.
- Gao, X., Li, T., Rogers, W.A., Smith, K., Gaston, K., Wiggins, G., Parks, J.E., (2020). *Validation and application of a multiphase CFD model for hydrodynamics, temperature field and RTD simulation in a pilot-scale biomass pyrolysis vapor phase upgrading reactor.* Chem. Eng. J. 388, 124071. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124071>.
- Karmee, S.K., Kumari, G., Soni, B., (2020). *Pilot scale oxidative fast pyrolysis of sawdust in a fluidized bed reactor: a biorefinery approach.* Bioresour. Technol. 318, 124071. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124071>.
- Park, J.Y., Kim, J.-K., Oh, C.-H., Park, J.-W., Kwon, E.E., (2019). *Production of bio-oil from fast pyrolysis of biomass using a pilot-scale circulating fluidized bed reactor and its characterization.* J. Environ. Manag. 234, (138–144). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.104>.
- Soni, B., Karmee, S.K., (2020). *Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust.* Fuel 271, 117570. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117570>.
- Patwardhan, P.R., Brown, R.C., Shanks, B.H., (2011). *Product distribution from the fast pyrolysis of hemicellulose.* ChemSusChem 4, (636–643). <https://doi.org/10.1002/cssc.201000425>.
- Peng, Y., Wu, S., (2010). *The structural and thermal characteristics of wheat*

straw hemicellulose. J. Anal. Appl. Pyrolysis 88, (134–139).<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.03.006>.

Peng, Y., Wu, S., (2011). *Fast pyrolysis characteristics of sugarcane bagasse hemicellulose. Cellul. Chem. Technol.* 45, (605–612).
[https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT45,9-10\(2011\)/p.605-612](https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT45,9-10(2011)/p.605-612).

Neupane, S., Adhikari, S., Wang, Z., Ragauskas, A.J., Pu, Y., (2015). *Effect of torrefaction on biomass structure and hydrocarbon production from fast pyrolysis. Green Chem.*17, (2406–2417).
<https://doi.org/10.1039/C4GC02383H>.

Zhang, J., Choi, Y.S., Yoo, C.G., Kim, T.H., Brown, R.C., Shanks, B.H., (2015). *Cellulose–hemicellulose and cellulose–lignin interactions during fast pyrolysis. ACS*