

Pengaruh Suhu Kondensasi Pada Produksi Asap Cair Dari Biomassa Tempurung Kelapa Dengan Proses Pirolisis

Janter P. Simanjuntak^{1,*}, Hanapi Hasan¹, Binsar M.T. Pakpahan¹, Agus N. Putra¹

¹Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Medan 20221, Indonesia

*Corresponding author e-mail: janterps@unimed.ac.id

Abstract

The purpose of this study was to experimentally test the smoke condensation device resulting from the pyrolysis of coconut shell biomass. The pyrolysis process is actually an indirect combustion process or a heating process at high temperatures (200-450 °C) which produces hot steam or often referred to as pyrolysis steam or volatiles. By cooling, some of the hot steam will turn into a liquid or often referred to as liquid smoke, and those that cannot melt or are called flammable gases. The heat for the pyrolysis process used is LPG using a burner. Biomass in the form of pieces of coconut shell with an average size of 5 cm x 5 cm is used as raw material, by first being dried using solar heat to reach standard dryness in order to produce enough volatiles. Volatiles that are at high temperatures must immediately undergo a cooling process to change their form into pyrolysis condensate or liquid smoke. The cooling system used is in the form of a coil/spiral of brass pipe with a diameter of 10 mm, 5 coils (loop) and is placed vertically in the cooling tube. As soon as the hot pyrolysis steam enters the cooling system, the latent heat of the pyrolysis steam is immediately absorbed by the cooling water and its temperature decreases to near its saturation temperature so that the condensation process can take place. The vertical spiral tube-coil condenser can be a solution to the problem of cooling pyrolysis hot steam when properly planned. This type of condenser is very simple and easy to maintain and repair. The coolant temperature can easily be controlled and maintained using ice cubes. The experimental results show that the effect of temperature on the condensation process is very important. The lower cooling temperature compared to the conventional cooling temperature resulted in a better pyrolysis liquid as evidenced by the yellowish color of the liquid obtained.

Keywords: Biomass, Liquid smoke, Pyrolysis, Condensation

1. LATAR BELAKANG

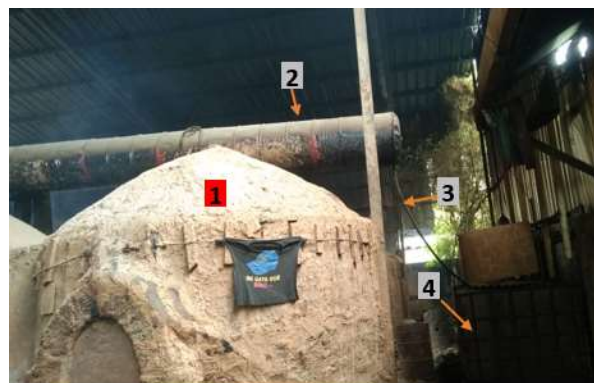
Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan khususnya sebagai pengganti bahan bakar fosil sudah ada sejak jaman dahulu. Bahkan saat ini biomassa sudah menjadi sumber energi alternatif menggantikan bahan bakar fosil untuk mengurangi dampak efek rumah kaca dan perubahan iklim. Dampak pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, biomassa juga sudah dapat diolah untuk menghasilkan produk-produk komoditi pasar yang sangat bernilai tinggi. Beberapa industri sudah mulai mengembangkan usaha mengolah biomassa dari jenis kayu untuk menghasilkan produk lain yang dapat digunakan sebagai bahan bakar bermutu seperti arang (*biochar*) dan asap cair (*liquid smoke*). Namun teknologi yang mereka gunakan masih sangat konvensional sehingga produk yang dihasilkan belum mencapai mutu yang terbaik.

Di industri yang memanfaatkan biomassa sebagai sumber energi, biasanya adalah dengan membakar secara langsung untuk mendapatkan energi panas. Proses seperti ini sangat tidak direkomendasikan. Hal ini akan menyebabkan udara pembakaran tidak terkontrol sehingga menimbulkan emisi dan asap pembakaran yang melimpah. Emisi dan asap pembakaran dilepaskan begitu saja ke lingkungan bebas hingga mengakibatkan polusi udara. Namun, selain menghasilkan energi panas yang terkandung dalam asap pembakaran, ternyata asap panas itu sendiri masih memiliki zat-zat yang sangat berguna dan memiliki nilai ekonomi yang tinggi [1, 2], bahkan dapat diekspor ke luar negeri seperti yang dilakukan oleh industri pengolahan kayu di daerah Sumatera Utara yang mengolahnya menjadi arang kayu yang mereka ekspor dan asap cair digunakan sebagai pestisida oleh petani di daerah Batubara, Sumatera Utara.



Gambar 1. Foto sistem pengolahan kayu menjadi arang dan asap cair: (1) Tungku, (2) Pintu masuk bahan baku, (3) Sistem pemanasan awal, (4) Susunan kayu didalam tungku, (5) Ukuran tungku relatif terhadap manusia

Industri yang mengolah kayu menjadi arang seperti ditunjukkan pada gambar 1 menggunakan sistem tungku sederhana yang terbuat dari material batu bata dan dilapisi tanah liat. Selama proses pembakaran bahan baku menjadi arang, produk lain yang terbentuk adalah asap. Pada dasarnya, asap dapat diubah menjadi wujud cairan dengan menurunkan suhunya menggunakan alat pendingin. Alat pendingin yang digunakan masih sangat sederhana, yaitu dengan menggunakan beberapa rangkaian drum minyak bekas dengan pendinginan alami yaitu dengan memanfaatkan udara sekeliling seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Sistem kondensasi uap pirolisa kayu: (1) Tungku, (2) Drum kondensasi, (3) Selang kondensat, (4) Tangki penampungan kondensat

Dengan alat sederhana tersebut, uap pirolisis terkondensasi menjadi asap cair. Namun komposisi asap cair masih bercampur dengan air dan tar. Sekitar 15-30 % asap

cair masih bercampur dengan air [3]. Itu sebabnya warna asap cair cenderung coklat kehitaman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). Untuk proses yang sederhana, yaitu dengan membiarkan tangki beberapa lama, sehingga fraksi-fraksi seperti air, tar, dan hidrokarbon akan terpisah. Asap cair hasil pemisahan seperti ini berada pada level atau *Grade-3*. Melalui proses lebih lanjut, asap cair *Grade-2* hingga *Grade-1* dapat diperoleh dan dapat digunakan sebagai bahan pengawet makanan dan bahkan dapat dikonsumsi secara langsung. Saat ini asap cair juga sudah banyak digunakan sebagai pupuk tanaman yaitu bio pestisida [4, 5]. Gambar 3(b) menunjukkan produk arang kayu yang diperoleh oleh industri dengan kualitas ekspor.



Gambar 3. Produk karbonisasi kayu skala industri: (a) Asap cair Grade-3, (b) Arang kayu kualitas ekspor

Masalah yang paling utama dihadapi industri pengolahan kayu adalah pada produk dan kualitas asap cair yang diperoleh. Tidak semua asap dapat dikondensasi dan sebagian dibebaskan ke lingkungan. Dari observasi di industri bahwa problem utama yang dihadapi adalah pada system kondensasi. Hal ini dapat diselesaikan dengan membuat alat pendingin asap yang memiliki kinerja yang tinggi. Untuk memastikan alat ini berfungsi dengan baik maka terlebih dahulu dibuat desain dan perhitungan geometri skala laboratorium dan kemudian perlu diuji dengan kondisi sesuai dengan kondisi di industri.

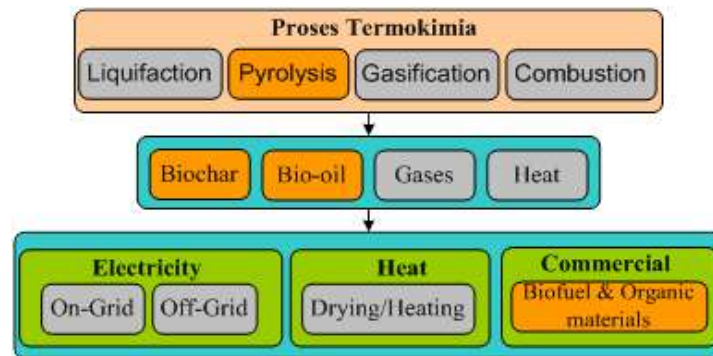
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pirolisis

Semua jenis tanaman disebut juga dengan biomassa. Khusus tempurung kelapa merupakan jenis biomassa yang sejak dahulu kala sudah digunakan sebagai sumber energi oleh penduduk pada jamannya. Biasanya tempurung ini dibakar secara langsung untuk mendapatkan energi panas dengan metode pembakaran konvensional di udara terbuka menggunakan tiga batu (*three-stones fire*). Metode ini sangat tidak efisien dan boros bahan bakar. Efisiensi tungku konvensional tiga batu biasanya hanya berkisar antara 5-17 % [6]. Seiring berjalannya waktu dan berkembangnya teknologi, tempurung kelapa juga sudah banyak digunakan sebagai sumber energi untuk pemanas ruang keluarga pada musim dingin dengan menggunakan tungku modern yang dilengkapi dengan alat control suhu dan emisi [7]. Bahkan tempurung kelapa juga sudah digunakan sebagai sumber energi dalam sistem pembangkit listrik menggunakan tungku yang sudah ditingkatkan kinerjanya. Misalnya energi panas dari tungku modern pembakaran tempurung kelapa dapat meningkatkan efisiensi hingga 20% dan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 1,133 kW [8].

Gambar 4 berikut ini menjelaskan proses yang dapat dilakukan untuk mengolah biomassa menjadi lebih bernilai. Metode termokimia menjadi metode paling populer hingga saat ini. Terbukti bahwa saat ini pemanfaatan dan pengolahan biomassa sebagai

sumber energi alternative terbarukan semakin meningkat. Bahkan industri yang bergerak dibidang bioenergi dengan sistem pengolahan pirolisis juga sudah sangat berkembang. Seiring dengan berkembangnya sistem pengolahan pirolisis, riset dan pengembangan terhadap tungku pirolisa (*pyrolizer*) yang efektif dan efisien juga berkembang dengan pesat.



Gambar 4. Rute konversi energi dari biomassa secara termal

Posisi teknologi pirolisa diantara proses termokimia memang sangat superior, hal ini disebabkan karena dapat menghasilkan produk-produk bernilai ekonomi dan relatif mudah untuk dilaksanakan. Proses gasifikasi memang potensial dan memiliki keunggulan pada produk gas yang dihasilkan dan dapat terbakar (*producer gas*), namun dalam hal reactor dan pengoperasiannya lebih rumit dari pirolisa. Melalui modeling dan rancang bangun serta eksperimen, Simanjuntak et al. berhasil mendapatkan nilai bakar gas (*heating value*) dari biomassa serbuk gergajian mendekati 7 MJ/m^3 [9, 10]. Bahkan melalui penelusuran literatur, produksi gas mampu bakar dari biomassa khususnya Indonesia mampu menggantikan posisi bahan bakar utama untuk kendaraan bermotor [11].

Pirolisis tipe lambat (*slow pyrolysis*) paling disukai para penggiat industri pengolahan tempurung kelapa karena dapat menghasilkan arang dan *bio-oil* bermutu tinggi untuk diperdagangkan. Proses pirolisa adalah proses yang sangat tergantung pada energi panas dari luar tungku. Namun hal ini memicu terjadinya reaksi-reaksi kimia yang dapat meningkatkan mutu dan kualitas produk dengan waktu (*residence time*) yang tersedia [12, 13]. Hal ini tidak hanya material organik, tapi material bukan organik seperti plastik juga dapat diproses secara pirolisa untuk menghasilkan bahan bakar cair [14].

Dari penelusuran cepat yang dilakukan oleh tim peneliti pada artikel terindeks *Scopus*, banyak riset tentang proses pirolisis atau karbonisasi, bahkan hingga saat ini masih terus dilakukan. Namun riset yang dilakukan masih sebatas eksperimen skala kecil (*bench-scale*), juga berupa modeling ataupun analisis [15, 16], dimana tungku pirolisa menggunakan energi panas dari listrik atau sumber lain [17], atau bahkan menggunakan *micro-wave* [18, 22]. Teori-teori pirolisis dan peningkatan mutu produk seperti biochar dan bio-oil sangat banyak dibicarakan dan diteliti [23,24]. Namun riset terhadap proses pirolisa untuk aplikasi di lapangan atau skala industri dengan sistem pemanas dari luar tungku sangat jarang diteliti.

2.2 Asap cair

2.2.1 Kondensasi

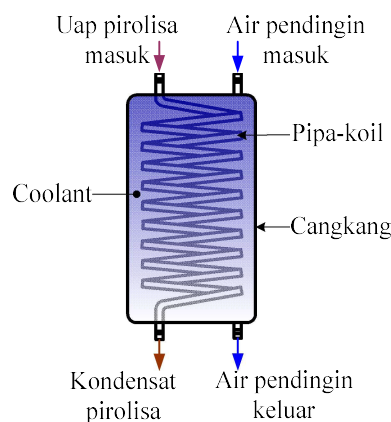
Kondensasi atau pengembunan merupakan proses perubahan wujud suatu material dari wujud uap ke wujud cairan. Kondensasi terjadi ketika uap panas bersentuhan dengan permukaan padat yang suhunya dibawah suhu saturasi uap panas, atau dapat juga terjadi

bila uap tersebut mengalami peningkatan tekanan, atau dapat juga terjadi karena kedua hal tersebut. Uap panas pirolisis (*pyrolysis vapor*) yang telah berubah menjadi cairan disebut dengan cairan pirolisis (*pyrolysis liquids*), atau asap cair (*liquid smoke*) [25], dan alat yang biasa digunakan untuk mendinginkan uap agar berubah menjadi cairan disebut kondenser. Pada umumnya kondenser adalah sebuah alat penukar kalor yang digunakan untuk berbagai tujuan, memiliki konstruksi yang bervariasi, dan banyak ukuran yang tersedia, dari yang portable sampai yang sangat besar yang digunakan oleh industri.

2.2.2 Kondensor pipa spiral

Alat penukar kalor yang berfungsi sebagai pendingin dalam istilah keteknikan disebut dengan kondenser. Bidang penggunaan kondenser ini biasanya pada pompa-pompa panas, dan lain-lain. Banyak riset terkait perencanaan dan uji kinerja kondenser dari tipe pipa-cangkang (*shell and tube*). Namun pengembangan kondenser tipe koil spiral-cangkang untuk kondensasi uap pirolisis biomassa masih jarang ditemukan. Kondenser tipe spiral-koil dikenal memiliki keunggulan dibandingkan dengan tipe pipa-tabung karena memiliki konstruksi yang sederhana dan mudah dimaintenance. Karakteristik uap panas hasil pirolisis biomassa sangat beragam, termasuk suhu dan tekanan saturasinya. Komponen uap panas juga sangat banyak dan memiliki propertis yang berbeda-beda. Terutama pada suhu dan tekanan saturasinya yang sangat berpengaruh pada proses pendinginan. Dalam penggunaannya, kondenser jenis koil spiral-cangkang adalah sangat mudah. Biasanya gulungan koil dimasukkan kedalam fluida pendingnya (*embedded coil*) yang dapat mengalir ataupun diam dan fluida yang akan didinginkan mengalir didalam koil yang digulung [26].

Banyak penelitian terkait peningkatan kinerja condenser; melalui metode numerik, metode analisis, dan juga melalui serangkain percobaan (*experiment*) dan hasilnya sudah dipublikasi. Namun kajian terkait konfigurasi dan orientasi koil masih sangat jarang, dan juga kajian pengoperasian dengan melibatkan perubahan waktu (*transient process*) masih sangat jarang dilakukan. Pengaruh-pengaruh parameter seperti jumlah lilitan koil, panjang koil yang digunakan, posisi koil, dan jarak antar lilitan (*coil pitch*) merupakan parameter yang sangat perlu dikaji. Gambar 5 berikut adalah diagram skematik kondensor yang digunakan. Fluida pendingin berada diluar gulungan pipa koil dengan fluida pendingin menyelimuti seluruhnya gulungan pipa koil. Namun kelemahan penelitian ini bahwa pada fluida pendingin (*coolant*) terjadi kenaikan suhu sebab tidak terjadi aliran atau pergantian air pendingin didalam tabung/cangkang.



Gambar 5. Skema aliran fluida didalam kondensor

3. METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan tempurung kelapa sebagai bahan baku. Bahan ini sengaja dipilih karena ketersediaannya yang melimpah disekitar lokasi penelitian. Biasanya tempurung kelapa dianggap sebagai sampah dan dibiarkan menumpuk ditempat pembuangan.



Gambar 6. Material bahan baku pirolisa: (a) Raw tempurung kelapa, (b) Tempurung kelapa dengan ukuran seragam

3.2 Susunan peralatan percobaan

Instalasi percobaan pirolisa tempurung kelapa dapat dilihat pada gambar 7. Tungku didesain memanfaatkan tabung gas 12 kg yang sudah tidak digunakan lagi (a). Selama proses pirolisa, uap pirolisa yang dihasilkan terlebih dahulu dimasukkan kedalam tabung (b). Disini tar dan partikel akan dikumpulkan untuk mengurangi efek pengendapan pada dinding pipa. Uap pirolisa terus mengalir masuk ke sistem pendingin (c). Alat pendingin atau kondensor terdiri dari gulungan pipa kuningan dengan diameter 10 mm. Gulungan pipa ini dimasukkan kedalam tabung berisi air. Untuk menambah efek pendinginan, tabung berisi air ditambahkan dengan es batu sehingga suhu fluida pendingin dapat mencapai 15 °C. Setelah mengalami proses kondensasi, kondensat dibiarkan mengalir ke tabung (d) untuk terus mengalami pendinginan dan disini terpisah dengan produk gas yang tidak dapat mencair. Pada umumnya gas ini adalah gas yang dapat terbakar (*producer gas*). Dari pipa kecil (h) dapat dilihat api hasil pembakaran gas yang merupakan produk pirolisis. Untuk memantau suhu didalam tungku digunakan thermometer digital yang dapat mengukur suhu tinggi (e).

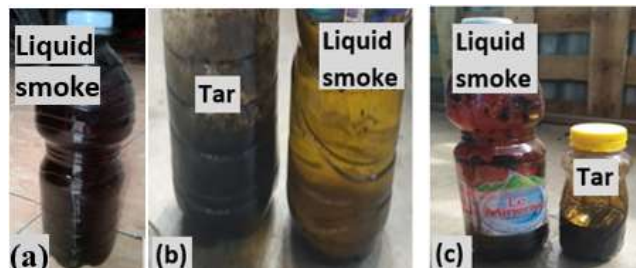


Gambar 7. Sistem pirolisa tempurung kelapa: (a) Tungku pirolisa, (b) Pemisah tar, (c) Kondensor, (d) Tabung pemisah kondensat dan gas, (e) Alat ukur suhu didalam tungku, (f) Sistem pemanas, (g) Es-batu untuk membantu menurunkan suhu pendinginan, (h) Api pembakaran gas

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 8 berikut menunjukkan hasil pirolisa tempurung kelapa pada suhu sedang (200-250) °C dengan menggunakan air sebagai fluida pendingin pada sistem kondensasi. Uap hasil pirolisa dialirkan menuju pipa koil yang dibuat berbentuk spiral dan dimasukkan kedalam wadah berisi air yang dicampur dengan es batu sebagai pendingin. Hasil pirolisis menunjukkan bahwa terdapat peningkatan mutu cairan dengan menggunakan sistem pendingin secara konveksi dibandingkan dengan sistem pendingin konveksi alami menggunakan udara seperti pada gambar 8(a). Sedangkan gambar 8 (b dan c) menunjukkan foto asap cair yang diperoleh dengan pendinginan menggunakan air tanpa melakukan pengendapan yang membutuhkan waktu sehari-hari. Terlihat juga bahwa tar sudah terpisah bila uap panas terlebih dahulu dialirkan melalui tabung pemisah. Warna tar adalah hitam seperti ditunjukkan pada gambar 8(b).

Pengaruh suhu pendinginan memang sangatlah dominan terhadap kualitas kondensat yang diperoleh. Tabung pendingin berisi air yang digunakan tidaklah berganti selama proses pendinginan, sehingga mengakibatkan kenaikan suhu air pendingin. Hal ini mengakibatkan kualitas kondensat menurun yang dapat diketahui pada perubahan warna kondensat menjadi agak kecoklatan seperti ditunjukkan pada gambar 8(c).



Gambar 8. Produk asap cair: (a) Produk industri, (b) dan (c) Tar dan dan asap cair dengan pendingin air

5. KESIMPULAN

Proses pembuatan asap cair dengan bahan dasar tempurung kelapa memiliki potensi dan bernilai jual yang tinggi dipasar. Penggunaan sistem pendinginan yang tepat sangat berpengaruh terhadap kualitas produk yang diinginkan. Dibandingkan dengan kualitas produk dengan menggunakan sistem pendinginan konvensional menggunakan udara, maka kualitas produk asap cair menggunakan sistem pendingin modern menggunakan air jauh lebih baik. Hal ini sudah terbukti dari penelitian yang telah dilakukan, namun sistem pendingin yang dilakukan masih sangat sederhana, tapi suhu kondensasi yang digunakan lebih rendah dari suhu kondensasi alami. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk penelitian lanjutan baik dari sisi desain yang kompatibel yang mempertimbangkan sisi ekonomi agar masyarakat maupun konsumen tertarik menggunakannya.

Ucapan Terimakasih

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada Universitas Negeri Medan atas pendanaan yang diberikan melalui DIPA Unimed dengan nomor: 0047/UN33.8/PL-PNBP/2021. Terimakasih juga disampaikan kepada teknisi dan laboran workshop Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Unimed serta dua orang mahasiswa tingkat akhir Diploma 3 atas kontribusinya pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Garcia-Nunez, J., et al., *Historical developments of pyrolysis reactors: a review*. Energy & fuels, 2017. 31(6): p. 5751-5775.
2. Rozum, J., *Smoking | Liquid Smoke (Smoke Condensate) Application*, in *Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition)*, M. Dikeman and C. Devine, Editors. 2014, Academic Press: Oxford. p. 315-320.
3. Papari, S. and K. Hawboldt, *A review on condensing system for biomass pyrolysis process*. Fuel Processing Technology, 2018. 180: p. 1-13.
4. Latumahina, F.S., G. Mardiatmoko, and M. Tjoa, *Penggunaan Biopestisida Nabati: untuk Pengendalian Hama Tanaman Kehutanan (Peluang Pengembangan Kelompok Tani)*. 2021: Penerbit Adab.
5. Chalermson, Y. and S. Peerapan, *Wood vinegar: by-product from rural charcoal kiln and its role in plant protection*. Asian Journal of Food and Agro-Industry, 2009. 2(Special Issue).
6. Berrueta, V.M., R.D. Edwards, and O.R. Masera, *Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico*. Renewable Energy, 2008. 33(5): p. 859-870.
7. Illerup, J.B., et al., *Performance of an automatically controlled wood stove: Thermal efficiency and carbon monoxide emissions*. Renewable Energy, 2020. 151: p. 640-647.
8. Rahbar, K., et al., *Feasibility study of power generation through waste heat recovery of wood burning stove using the ORC technology*. Sustainable Cities and Society, 2017. 35: p. 594-614.
9. Simanjuntak, J.P., K. Al-attab, and Z. Zainal, *Hydrodynamic flow characteristics in an internally circulating fluidized bed gasifier*. Journal of Energy Resources Technology, 2019. 141(3).
10. Simanjuntak, J.P. and Z.A. Zainal, *Experimental study and characterization of a two-compartment cylindrical internally circulating fluidized bed gasifier*. Biomass and Bioenergy, 2015. 77: p. 147-154.
11. Simanjuntak, J.P., E. Daryanto, and B.H. Tambunan. *Producer gas production of Indonesian biomass in fixed-bed downdraft gasifier as an alternative fuels for internal combustion engines*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2018: IOP Publishing.
12. Wang, Z., J. Cao, and J. Wang, *Pyrolytic characteristics of pine wood in a slowly heating and gas sweeping fixed-bed reactor*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009. 84(2): p. 179-184.
13. Yorgun, S. and D. Yıldız, *Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015. 114: p. 68-78.
14. Tambunan, B.H. and simanjuntak, J.P, *Pyrolysis of Plastic Waste into The Fuel Oil*. CCER, 2018: p. 499.
15. Lamarche, P., et al., *Modelling of an indirectly heated fixed bed pyrolysis reactor of wood: Transition from batch to continuous staged gasification*. Fuel, 2013. 106: p. 118-128.
16. Tamburini, D., et al., *Using analytical pyrolysis and scanning electron microscopy to evaluate charcoal formation of four wood taxa from the caatinga of north-east Brazil*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020. 151: p. 104909.

17. Wang, Z., et al., *Pyrolysis of pine wood in a slowly heating fixed-bed reactor: Potassium carbonate versus calcium hydroxide as a catalyst*. *Fuel Processing Technology*, 2010. 91(8): p. 942-950.
18. Burhenne, L., M. Damiani, and T. Aicher, *Effect of feedstock water content and pyrolysis temperature on the structure and reactivity of spruce wood char produced in fixed bed pyrolysis*. *Fuel*, 2013. 107: p. 836-847.
19. Sobek, S. and S. Werle, *Kinetic modelling of waste wood devolatilization during pyrolysis based on thermogravimetric data and solar pyrolysis reactor performance*. *Fuel*, 2020. 261: p. 116459.
20. Sadhukhan, A.K., P. Gupta, and R.K. Saha, *Modelling of pyrolysis of large wood particles*. *Bioresource Technology*, 2009. 100(12): p. 3134-3139.
21. Gadkari, S., B. Fidalgo, and S. Gu, *Numerical investigation of microwave-assisted pyrolysis of lignin*. *Fuel Processing Technology*, 2017. 156: p. 473-484.
22. Salema, A.A., et al., *Microwave dielectric properties of Malaysian palm oil and agricultural industrial biomass and biochar during pyrolysis process*. *Fuel Processing Technology*, 2017. 166: p. 164-173.
23. Nhuchhen, D.R., et al., *Characteristics of biochar and bio-oil produced from wood pellets pyrolysis using a bench scale fixed bed, microwave reactor*. *Biomass and Bioenergy*, 2018. 119: p. 293-303.
24. Guzelciftci, B., K.-B. Park, and J.-S. Kim, *Production of phenol-rich bio-oil via a two-stage pyrolysis of wood*. *Energy*, 2020. 200: p. 117536.
25. Urrutia, R.I., et al., *Pyrolysis liquids from lignocellulosic biomass as a potential tool for insect pest management: A comprehensive review*. *Industrial Crops and Products*, 2022. 177: p. 114533.
26. Pollard, A.S., M.R. Rover, and R.C. Brown, *Characterization of bio-oil recovered as stage fractions with unique chemical and physical properties*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012. 93: p. 129-138.