

PERENCANAAN KONDENSOR TIPE KOIL VERTIKAL UNTUK KONDENSASI UAP PIROLISA BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA



Janter P. Simanjuntak^{1,*}, Kinanti Wijaya^{2,*}

¹Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

*Bidang Keahlian Teknik Mesin

janterps@unimed.ac.id

²Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

kinantiwijaya@unimed.ac.id

*Bidang Keahlian Teknik Sipil

ABSTRAK

Proses pirolisis sejatinya adalah proses pembakaran tidak langsung atau proses pemanasan terhadap biomassa pada suhu tinggi (250 – 650) °C. Proses pirolisa menghasilkan uap panas atau sering disebut dengan uap pirolisis ataupun *volatiles*. Uap pirolisis akan berubah wujud menjadi cairan (*condensate*) bila didinginkan. Selain menghasilkan cairan juga menghasilkan gas yang dapat terbakar (*producer gas*). Tujuan kajian ini adalah mendesain dan menguji secara teoritis alat kondensasi asap pirolisis dari biomassa. Untuk proses kondensasi dibutuhkan alat perpindahan panas (*heat exchanger*) dimana panas laten yang dimiliki uap pirolisis harus segera dibuang (*reject*) menggunakan cairan pendingin (*coolant*) agar suhunya menurun hingga mendekati suhu saturasinya sehingga proses kondensasi dapat berlangsung. Kondensor tabung-koil spiral vertical (*shell-coiled tubes*) dapat menjadi solusi untuk masalah kondensasi uap panas pirolisis biomassa bila direncanakan dengan tepat. Kondensor jenis ini sangat simple dan mudah dalam hal maintenance. Merencanakan kondensor tipe tabung-koil berdasarkan analisis hidrodinamik membawa para perancang (*engineer*) semakin dekat dengan alat pendingin uap pirolisis dengan kinerja yang tinggi. Dari hasil analisis bahwa penambahan jumlah gulungan koil dapat meningkatkan efektifitas pendinginan.

Kata Kunci: Biomassa, Pirolisis, Asap cair, Kondensor

ABSTRACT

The pyrolysis process is actually an indirect combustion process or a heating process on biomass at high temperatures (250 – 650) °C. The pyrolysis process produces hot steam or referred to as pyrolysis steam or volatiles. Pyrolysis steam will change to condensate when it is cooled. In addition to producing condensate, it also produces flammable gases. The purpose of this research is to redesign and analyze a condenser for the pyrolysis of biomass. For the condensation process, a heat exchanger is needed, where the latent heat of the pyrolysis steam must be immediately absorbed using a coolant so that the temperature decreases to the saturation temperature so that the condensation process can take place. Tshell-coiledled tube condenser can be a solution to the problem of condensation hot steam from the pyrolysis of biomass if it is planned properly. This type of condenser is very simple and easy to maintain. A designing type condenser based on thermal/heat analysis brings engineers closer to the high performance of the condenser. From the results of the analysis, the addition of the number of coils can increase the cooling effect.

Keywords: Biomass, Pyrolysis, Liquid smoke, Condenser

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, biomassa juga sudah dapat diolah untuk menghasilkan produk-produk komoditi pasar yang sangat berguna. Beberapa industri sudah mulai mengembangkan usaha mengolah biomassa 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 tempurung kelapa 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 tempurung kelapa di daerah Sumatera Utara yang mengolahnya menjadi arang yang mereka ekspor dan asap cair digunakan sebagai pestisida oleh petani di daerah Batubara, Sumatera Utara.

Industri yang mengolah tempurung kelapa menjadi arang masih 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 dapat dibuat dengan menggunakan peralatan sederhana, yaitu dengan menggunakan beberapa rangkaian drum dengan pendinginan alami. Dengan alat sederhana tersebut, asap dikondensasi untuk diubah menjadi asap cair. Untuk proses yang sederhana, asap cair dapat diperoleh dalam tiga kelas (*grade*). Melalui proses lebih lanjut, asap cair 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 [3, 4].

Masalah yang paling utama dihadapi industri 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 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

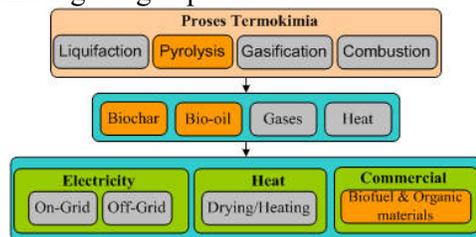
2.1 Pirolisis

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 diudara terbuka menggunakan tiga batu (*three-stones fire*). Metode ini sangat tidak efisien dan boros bahan bakar bakar. Efisiensi tungku konvensional tiga batu biasanya hanya berkisar antara 5-17 % [5]. 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 [6]. 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 [7, 8].

Gambar 1 berikut ini menjelaskan proses yang dapat dilakukan untuk mengolah biomassa menjadi lebih bernilai hingga memperoleh energi termal bahkan energi listrik [9, 10]. Metode termokimia menjadi metode paling populer hingga saat ini. Terbukti bahwa saat ini pemanfaatan dan pengolahan biomassa sebagai sumber energi alternative terbaru semakin meningkat. Bahkan industri yang bergerak dibidang bioenergy dengan sistem pengolahan pirolisis juga sudah sangat berkembang.

Sering dengan berkembangnya sistem pengolahan pirolisis, riset dan pengembangan terhadap tungku pirolisa (*pyrolizer*) yang efektif dan efisien juga berkembang dengan pesat.



Gambar 1. 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 relative 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/m³ [11, 12]. Bahkan melalui penelusuran literatur, produksi gas mampu bakar dari biomassa khususnya Indonesia mampu menggantikan posisi bahan bakar utama untuk kendaraan bermotor [13].

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 [14, 15]. Hal ini tidak hanya material organik, tapi material bukan organik seperti plastik juga dapat diproses secara pirolisa untuk menghasilkan bahan bakar cair [16].

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 [17, 18], dimana tungku pirolisa menggunakan energi panas dari listrik atau sumber lain [19-22], atau bahkan menggunakan *micro-wave* [23, 24]. Teori-teori pirolisis dan peningkatan mutu produk seperti biochar dan bio-oil sangat banyak dibicarakan dan diteliti [25, 26]. 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 uap ke wujud cairan. Kondensasi terjadi ketika uap panas bersentuhan dengan permukaan yang dingin, atau dapat juga terjadi bila uap tersebut mengalami peningkatan tekanan, atau dapat juga terjadi karena kedua hal tersebut.

Cairan yang telah terkondensasi menjadi titik-titik air dari uap disebut kondensat. Alat yang biasa digunakan untuk mendinginkan uap agar berubah menjadi cairan disebut kondenser. Pada umumnya kondenser adalah sebuah pendingin atau penukar kalor yang digunakan untuk berbagai tujuan, memiliki konstruksi yang bervariasi, dan banyak ukura yang tersedia, dari yang portable sampai yang sangat besar digunakan oleh industri.

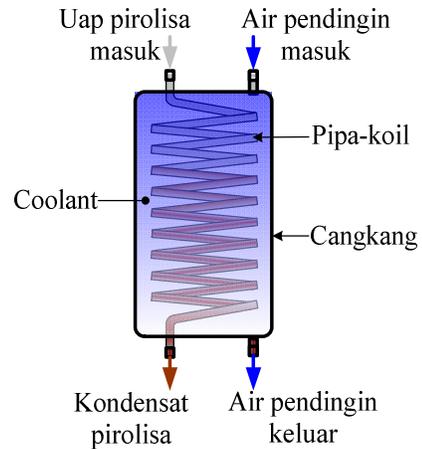
2.2.2 Kondensor tipe koil-cangkang

Alat penukar kalor yang berfungsi sebagai pendingin dalam istilah keteknikan disebut dengan kondensor (*Condenser*). Banyak riset terkait perencanaan dan uji kinerja kondensor dari tipe pipa-cangkang (*shell and tube*), namun pengembangan kondensor tipe koil-cangkang masih jarang digunakan didunia industry yang terkait dengan kondensasi dengan perubahan phase. Dalam penggunaannya, kondensor jenis koil-cangkang adalah sangat mudah. Biasanya koil dimasukkan kedalam fluida pendingnya (*embedded coil*) dimana fluid yang akan didinginkan mengalir didalam koil yang digulung.

Banyak penelitian terkait peningkatan kinerja condenser yang digunakan untuk proses kondensasi uap air dan refrigerant; melalui metode numerik, metode analisis, dan juga melalui serangkain percobaan (*experiment*) dan hasilnya sudah dipublikasi. Namun kajian terkait kondensasi uap pirolisis biomassa menggunakan kondensor tipe koil masih sangat jarang dilakukan. Penggunaan koil dalam perpindahan panas diketahui dapat meningkatkan koefisien perpindahan kalor didalam koil. Hal ini diakibatkan oleh efek sentrifugal yang dialami fluida didalam koil saat mengalir didalam koil.

Pengaruh parameter seperti jumlah lilitan koil, panjang koil yang digunakan, posisi koil, dan jarak antar lilitan (*coil pitch*) merupakan parameter yang perlu dikaji. Gambar 2 berikut adalah skema kondensor tipe koil-cangkang. Fluida pendingin berada diluar dari gulungan pipa koil dengan fluida pendingin menyelimuti seluruhnya gulungan

pipa koil. Suhu cangkang dipertahankan tetap atau konstan selama proses pendinginan dengan cara mengalirkan air pendingin secara perlahan dan terukur.



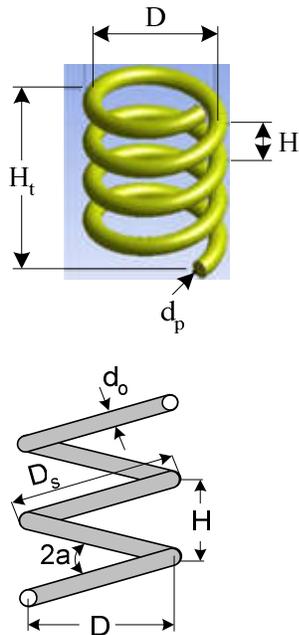
Gambar 2. Skema aliran fluida didalam kondensor

2.2.3 Perencanaan berbasis energi termal

Kinerja kondensor tipe koil dapat menjadi optimum bila didesain dengan tepat. Beban pendinginan harus disesuaikan dengan ukuran kondensor. Ukuran dan kinerja sebuah kondensor dapat direncanakan melalui analisis dan teori-teori yang terkait dengan perpindahan panas dan alat penukar kalor. Bila suatu gulungan pipa koil berisi fluida suhu tinggi dimasukkan kedalam satu tangki (*bath*) berisi air dengan volume tertentu dan suhunya konstan, maka perpindahan kalor akan terjadi dari fluida panas didalam koil ke fluida pendingin diluar koil, yaitu air pendingin secara konveksi alami (*natural convection*) sebab fluida pendingin dianggap diam atau kecepatan nol termasuk dipermukaan pipa-pipa koil. Diasumsikan bahwa suhu fluida pendingin adalah konstan diseluruh permukaan gulungan pipa koil dengan cara mengalirkan air dingin terus menerus secara konstan kedalam tangki air pendingin.

Dalam kajian ini, tahanan termal koil diabaikan karena bahan koil dianggap dari bahan yang memiliki konduktivitas yang tinggi, misalnya pipa *copper*. Gambar 3 berikut adalah diagram konstruksi koil yang direncanakan. D adalah diameter gulungan

koil (*helix-diameter*), α adalah kenaikan jari-jari helix (m/rad), A_o luas bidang perpindahan panas tiap satuan panjang.



Gambar 3. Skema diagram ilustrasi aliran didalam *helically-coil* yang direncanakan

2.2.4 Koefisien perpindahan panas pada sisi cangkang

Dalam kajian ini, cangkang diisi dengan fluida air sebagai pendingin pipa koil berisi uap panas. Volume air didalam cangkang adalah konstan sehingga dianggap tidak ada kecepatan fluida pada sisi luar pipa. Dengan demikian bahwa konveksi yang terjadi adalah konveksi alami karena heat transfer terjadi hanya karena perbedaan berat jenis fluida. Koefisien perpindahan panas konveksi dibagian luar pipa koil yang disimbolkan dengan h_o dapat diperoleh dengan terlebih dahulu mendapatkan bilangan Nusselt disisi luar pipa koil vertikal dengan menggunakan persamaan empiris berikut [27], yaitu:

$$Nu_{d_o} = \frac{h_o \cdot H_t}{k_l} = \left\{ \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]} \right\}^2 \quad [1]$$

Korelasi empiris Bilangan Nusselt berikut yang ditemukan oleh Rahman-A et al. [28] akan digunakan sebagai pembanding,

$$Nu_{d_o} = 0,2183 Ra_L^{4,01} \left(\frac{d_o}{D} \right)^{2,79} \left(\frac{H}{L} \right)^{7,281} \quad [2]$$

Dimana, H_t , d_o , D , L , dan H adalah dimensi dari koil; masing-masing adalah tinggi koil, diameter luar pipa, diameter koil (*helix diameter*), panjang pipa, dan jarak antar pipa (*pitch*). Ra_L adalah bilangan Rayleigh tanpa dimensi yang menghubungkan karakteristik fluida pendingin dengan geometri koil, yang dinyatakan dalam bilangan Grashof dan Prandtl sebagai berikut

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \quad [3]$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad [4]$$

Dimana g adalah percepatan gravitasi bumi, β adalah koefisien ekspansi, ν adalah viskositas kinematic, α adalah difusivitas panas dari fluida pendingin, T_s adalah suhu permukaan pipa koil, T_∞ suhu menyeluruh fluida pendingin. Ra_L merupakan produk perkalian Gr_L dan Pr , yaitu

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad [5]$$

Semua propertis fluida pendingin diambil pada suhu menyeluruh, yaitu $T_f = (T_s + T_\infty)/2$. Diameter heliks D dapat ditentukan dari persamaan berikut,

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{D_{si}^2 - \left(\frac{H_t}{\pi} \right)^2}}{N} \quad [6]$$

Dimana D_{si} adalah *slanted outer turn diameter* untuk tiap gulungan pipa, N adalah jumlah gulungan (*loop*) seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 3 diatas. Bila parameter sudah ditentukan, maka koefisien perpindahan panas konveksi dibagian cangkang dapat ditentukan.

2.2.5 Koefisien perpindahan panas didalam pipa

Dalam kajian ini bahwa fluida yang berada didalam pipa koil adalah uap pirolisa biomassa yang sifatnya dapat berubah wujud menjadi kondensat atau cairan. Uap pirolisa bergerak didalam pipa dengan kelajuan tertentu, sehingga kasus perpindahan panas didalam pipa adalah konveksi paksa. Pada suhu dan tekanan saturasi, keadaan uap panas berada dalam keseimbangan dengan phase liquidnya. Seiring berlangsungnya

proses pendinginan, maka panas laten (*heat latent*) uap panas diserap oleh fluida pendingin disekitarnya sehingga suhunya mendekati suhu saturasinya. Pada saat itu perubahan phase mulai terjadi. Namun karena informasi karakteristik perpindahan panas konveksi didalam pipa masih sangat sedikit, termasuk perhitungan kecepatan aliran dua phase, maka koefisien perpindahan panas dibagian dalam pipa didekati dengan hubungan hidrodinamik antar parameter geometri. Dengan asumsi suhu permukaan sepanjang pipa koil adalah konstan sebab volume fluida pendingin di dalam cangkang adalah tetap atau konstan, maka bilangan Nusselt didalam pipa dapat ditentukan dengan persamaan berikut [28],

$$Nu_i = \left[\left\{ 3,657 + \frac{4,343}{\left[1 + \frac{0,957}{Pr} He^2 \right]^2} \right\}^3 + 1,158 \left\{ \frac{He}{\left[1 + \left(\frac{0,477}{Pr} \right) \right]} \right\}^{3/2} \right]^{1/3} \quad [7]$$

Dimana *He* atau disebut dengan bilangan Helix (*helical number*) ditentukan dengan korelasi Bilangan Dean dan konfigurasi koil sebagai berikut,

$$He = De \left[1 + \left(\frac{H}{\pi d_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [8]$$

3. Simulasi parametris

Untuk memeriksa dan menguji rancangan secara parametris, maka dipilih beberapa variable yang akan digunakan dalam persamaan-persamaan yang sudah ada. Tabel 1 berikut menunjukkan data-data fisik dari kondensor koil yang direncanakan.

Tabel 1. Spesifikasi koil rencana

Spesifikasi koil	Simbol	Satuan	Nilai
Bahan	Copper		
Diameter cangkang	D_c	cm	40
Diameter helix	D	cm	20
Jumlah gulungan	n		5,10,15,20
Pitch	H	cm	2,4,6,8

Helical angle	α		15, 20,25
Diameter luar pipa	d_o	cm	1.80
Diameter dalam pipa	d_i	cm	1,65
Panjang pipa	L	cm	80

Daftar Pustaka

- Garcia-Nunez, J., Pelaez-Samaniego, M., Garcia-Perez, M., Fonts, I., Abrego, J., Westerhof, R., and Garcia-Perez, M. (2017). Historical developments of pyrolysis reactors: a review. *Energy & fuels*, 31(6), 5751-5775.
- Rozum, J. (2014). Smoking. Liquid Smoke (Smoke Condensate) Application. In M. Dikeman & C. Devine (Eds.), *Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition)* (pp. 315-320). Oxford: Academic Press.
- Latumahina, F. S., Mardiatmoko, G., and Tjoa, M. (2021). Penggunaan Biopestisida Nabati untuk Pengendalian Hama Tanaman Kehutanan (Peluang Pengembangan Kelompok Tani): Penerbit Adab.
- Chalermson, Y., and Peerapan, S. (2009). Wood vinegar: by-product from rural charcoal kiln and its role in plant protection. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 2(Special Issue).
- Berrueta, V. M., Edwards, R. D., and Masera, O. R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33(5), 859-870.
- Illerup, J. B., Hansen, B. B., Lin, W., Nickelsen, J., Pedersen, V. H., Eskerod, B., and Dam-Johansen, K. (2020). Performance of an automatically controlled wood stove: Thermal efficiency and carbon monoxide emissions. *Renewable Energy*, 151, 640-647. doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.057>
7. Rahbar, K., Mahmoud, S., Al-Dadah, R. K., Moazami, N., and Ashmore, D. (2017). Feasibility study of power generation through waste heat recovery of wood burning stove using the ORC technology. *Sustainable Cities and Society*, 35, 594-614.
 8. Simanjuntak, J.P., Daryanto, E., and Tambunan, B.H. (2021). Performance improvement of biomass combustion-based stove by implementing internally air-distribution. *Journal of Physics: Conference Series*, 1811(1). Doi: [10.1088/1742-6596/1811/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012015)
 9. Baharuddin, Simanjuntak, J.P., Daryanto, E., Tambunan, B.H., Hasan, H., Samsudin, A., and Syamsiro, M. (2022). Development of a Small-Scale Electricity Generation Plant Integrated on Biomass Carbonization: Thermodynamic and Thermal Operating Parameters Study. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 94 (1): p. 79-95. <https://doi.org/10.37934/arfmts.94.1.79-95>
 10. Simanjuntak, J.P., Samsudin, A., Syamsiro, M., Daryanto, E., and Tambunan, B.H. (2021). Thermal Energy Storage System from Household Wastes Combustion: System Design and Parameter Study. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 80 (2): p. 115-126. <https://doi.org/10.37934/arfmts.80.2.115-126>
 11. Simanjuntak, J. P., Al-attab, K., and Zainal, Z. (2019). Hydrodynamic flow characteristics in an internally circulating fluidized bed gasifier. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(3). <https://doi.org/10.1115/1.4041092>
 12. Simanjuntak, J. P., and Zainal, Z. A. (2015). Experimental study and characterization of a two-compartment cylindrical internally circulating fluidized bed gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 77, 147-154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.023>
 13. Simanjuntak, J. P., Daryanto, E., Tambunan, B. H., and Silaban, R. (2018). Producer gas production of Indonesian biomass in fixed-bed downdraft gasifier as an alternative fuel for internal combustion engines. *Journal of Physics: Conference Series*, 970 (1): p. 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/970/1/012019>
 14. Wang, Z., Cao, J., and Wang, J. (2009). Pyrolytic characteristics of pine wood in a slowly heating and gas sweeping fixed-bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(2), 179-184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.02.001>
 15. Yorgun, S., and Yıldız, D. (2015). Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 68-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.003>
 16. Tambunan, B. H and Simanjuntak, J. P. (2018). Pyrolysis of Plastic Waste into The Fuel Oil. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.3-11-2018.2285610>
 17. Lamarche, P., Tazerout, M., Gelix, F., Köhler, S., Mati, K., & Paviet, F. (2013). Modelling of an indirectly heated fixed bed pyrolysis reactor of wood: Transition from batch to continuous staged gasification. *Fuel*, 106, 118-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.005>
 18. Tamburini, D., Cartwright, C. R., Gasson, P., Łucejko, J. J., and Leme, C. L. D. (2020). 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*, 151, 104909. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104909>
19. Wang, Z., Wang, F., Cao, J., and Wang, J. (2010). Pyrolysis of pine wood in a slowly heating fixed-bed reactor: Potassium carbonate versus calcium hydroxide as a catalyst. *Fuel Processing Technology*, 91(8), 942-950. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.09.015>
20. Wang, Z., J. Cao, and J. Wang, Pyrolytic characteristics of pine wood in a slowly heating and gas sweeping fixed-bed reactor. (2009) *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84 (2): p. 179-184.
21. Kumar V.A., Thakur, L.S., Shankar, R., and Mondal, P. (2019). Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. *Waste Management*, 89: p. 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.016>
22. Wang, L., He, Y., Tang, C., Wang, Y., and Che, D. (2019). A novel design of rotary regenerative condensing heat exchanger for the dehydration from high humidity flue gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 517-526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.080>
23. Gadkari, S., Fidalgo, B., and Gu, S. (2017). Numerical investigation of microwave-assisted pyrolysis of lignin. *Fuel Processing Technology*, 156, 473-484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.012>
24. Salema, A. A., Ani, F. N., Mouris, J., and Hutcheon, R. (2017). Microwave dielectric properties of Malaysian palm oil and agricultural industrial biomass and biochar during pyrolysis process. *Fuel Processing Technology*, 166, 164-173. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.006>
25. Nhuchhen, D. R., Afzal, M. T., Dreise, T., and Salema, A. A. (2018). Characteristics of biochar and bio-oil produced from wood pellets pyrolysis using a bench scale fixed bed, microwave reactor. *Biomass and Bioenergy*, 119, 293-303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.035>
26. Guzelciftci, B., Park, K.-B., and Kim, J.-S. (2020). Production of phenol-rich bio-oil via a two-stage pyrolysis of wood. *Energy*, 200, 117536.
27. Yunus, A.C., Heat and mass transfer: fundamentals and applications. 2019: McGraw-Hill Education.
28. Abdel-Rahman, Z. A., and Abdullah, G. H. (2007). a Study in Flow Characteristics of Liquid Falling Film in Spiral Tubes. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 14(2), 86-10.