

Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Proses Pirolisis Total Kayu Karet untuk Pembuatan *Bio-Char*, *Bio-Oil* dan *Syngas* sebagai Bahan Bakar

Siti Aninda Nurfaritsya¹, Irawan Rusnadi², Rima Daniar³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya

e-mail: siti.aninda.nurfaritsya@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan kayu karet sebagai bahan bakar alternatif melalui proses pirolisis masih minim dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur perengkahan terhadap % rendemen produk yang dihasilkan, pengaruh waktu terhadap % rendemen produk yang dihasilkan, kondisi operasi yang optimal untuk menghasilkan kualitas rendemen yang sesuai standar, dan konsumsi energi pirolisis guna menghasilkan bio-oil. Pendekatan desain fungsional yang digunakan dalam penelitian ini adalah rancang bangun peralatan pirolisis. Pendekatan desain struktural yang digunakan adalah struktural prototipe pirolisis. Hasil penelitian menunjukkan pada *bio-char* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur dan penambahan waktu, rendemen tertinggi terjadi pada temperatur 190°C, waktu 30 menit sebesar 60,33% dan terendah pada suhu pirolisis 390°C, waktu 70 menit sebesar 27,67%. Sedangkan pada *bio-oil* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya temperatur dan waktu tinggal. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa temperatur serta waktu mempengaruhi karakteristik produk yang dihasilkan. Pada *bio-char* semakin tinggi temperatur dan penambahan waktu semakin baik karakteristik yang dihasilkan. Hal ini dibuktikan dengan semakin meningkatnya nilai kalor pada *bio-char* yaitu dengan nilai kalor tertinggi terdapat pada temperatur 390°C, waktu 70 menit sebesar 5144,0605 cal/gr dan terendah temperatur pirolisis 190°C, waktu 30 menit sebesar 3660,5953 cal/gr. Sedangkan pada *bio-oil* peningkatan temperatur dan waktu membuat densitas dan viskositas semakin menurun dan begitu pun dengan nilai pH yang membuat *bio-oil* semakin asam karena komponen *biomassa* yang terdekomposisi secara optimal. Untuk produk gas peningkatan temperatur dan waktu membuat kadar CH₄ semakin meningkat sehingga dapat meningkatkan lama waktu pembakaran, dimana rendemen tertinggi terjadi pada temperature pirolisis 390 °C, waktu 70 menit sebesar 35,14 % dan terendah pada temperatur pirolisis 190 °C, waktu 30 menit sebesar 18,98 %. Konsumsi energi yang dihasilkan menunjukkan bahwa kinerja alat pirolisis selama pengamatan berlangsung memiliki nilai yang paling optimal pada temperature 390 °C waktu 70 menit sebesar 2,2 kWh/L yang memiliki total konsumsi daya rendah dan menghasilkan produk yang paling banyak yaitu 345 mL *bio-oil*.

Kata kunci: *Biomassa, Pirolisis, Temperatur, Waktu, Dan Konsumsi Energi*

Abstract

Utilization of rubber wood as an alternative fuel through pyrolysis process is still minimal. This study aims to determine: the effect of cracking temperature on the % yield of the product produced, the effect of time on the % yield of the product produced, the optimal operating conditions to produce quality yields that meet the standards, and the energy consumption of pyrolysis to produce bio-oil. The functional design approach used in this research is the design of pyrolysis equipment. the structural design approach used is the structural prototype of pyrolysis. The results showed that bio-char decreased with increasing temperature and increasing time, the highest yield occurred at a temperature of 190 ° C, a time of 30 minutes

by 60.33% and the lowest at a pyrolysis temperature of 390 ° C, a time of 70 minutes by 27.67%. Meanwhile, the bio-oil increased with increasing temperature and residence time. The results also show that temperature and time affect the characteristics of the products produced. In bio-char, the higher the temperature and the addition of time the better the characteristics produced, this is evidenced by the increasing calorific value of bio-char, namely with the highest calorific value found at a temperature of 390 ° C, a time of 70 minutes of 5144.0605 cal/gr and the lowest pyrolysis temperature of 190 ° C, a time of 30 minutes of 3660.5953 cal/gr. While in bio-oil the increase in temperature and time makes the density and viscosity decrease and so does the pH value which makes bio-oil more acidic because the biomass components are decomposed optimally. For gas products, increasing temperature and time makes CH₄ levels increase so that it can increase the length of combustion time, where the highest yield occurs at a pyrolysis temperature of 390 ° C, a time of 70 minutes at 35.14% and the lowest at a pyrolysis temperature of 190 ° C, a time of 30 minutes at 18.98%. The resulting energy consumption shows that the performance of the pyrolysis equipment during the observation has the most optimal value at a temperature of 390 oC, time 70 minutes at 2.2 kWh / L which has a low total power consumption and produces the most product, namely 345 mL of bio-oil.

Keywords : *Biomass, Pyrolysis, Temperature, Time, And Energy Consumption.*

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki perkebunan karet dengan luas yang cukup besar di dunia, dengan luas 3,69 juta ha. Perkebunan karet terluas di Indonesia berasal dari provinsi Sumatera Selatan yaitu mencapai 872,5 ribu ha (BPS,2021). Dengan perkebunan karet yang memiliki areal dengan luas tersebut tentunya akan menghasilkan limbah yang cukup besar. Salah satu limbah karet yaitu tatal, campuran kayu dan pasir yang terpisahkan dari bongkahan karet pada pengolahan di pabrik karet (M Yusrin A.H, 2012). Pemanfaatan kayu karet salah satunya dapat dilakukan dengan cara pirolisis.

Pemanfaatan kayu karet sebagai bahan bakar alternatif melalui proses pirolisis masih minim dilakukan seperti penelitian yang telah dilakukan Afrizal Vachlepi dan Risal Andika (2019), yaitu pirolisis kayu karet sebagai koagulan lateks. Penelitian yang dilakukan oleh Ita Handayani dan Khalimatus Sa'diyah (2022), pirolisis gergaji kayu dengan produk asap cair (bio-oil) dengan variasi waktu 30, 45, 60, 75 dan 90 menit dengan temperatur 150 C. Dari percobaan tersebut didapatkan hasil bahwa seiring bertambahnya waktu, rendemen yang dihasilkan semakin meningkat. Pada penelitian lain yang dilakukan Febriyanti F.dkk (2019), pirolisis tandan kosong untuk mendapatkan *bio-char*, *bio-oil*, dan gas dngan variasi temperatur 500, 550 dan 600 C. didapatkan hasil rendemen bio-oil meningkat seiring dengan naiknya temperatur, rendemen *bio-char* fluktuatif terhadap temperatur dan rendemen gas semakin tinggi seiring turunnya temperatur. Menurut Komarayanti S dkk (2018), meningkatnya rendemen yang dihasilkan disebabkan oleh banyaknya bahan baku yang terdekomposisi seiring bertambahnya waktu.

Berdasarkan pada uraian penelitian di atas, diperlukan temperatur yang tinggi dan waktu yang lama pada proses pirolisis. Proses pirolisis merupakan proses pembakaran dengan minim oksigen. Input untuk proses pirolisis dapat berupa bahan tumbuhan alami yang dikenal sebagai biomassa atau polimer. Produk yang dihasilkan dari pirolisis dapat dijadikan sebagai alternatif energi terbarukan seperti *char*, *bio-oil*, dan *syngas* (Ridhuan K dkk, 2019). Pirolisis dinilai sebagai salah satu cara pemanfaatan limbah biomassa yang efisien karena dapat meningkatkan nilai kalor dan nilai kimia dari biomassa (Zhao.,dkk, 2017). Pirolisis lebih efisien daripada gasifikasi dikarenakan memerlukan energi yang sedikit dintinjau dari segi temperatur yang digunakan.

Menurut penelitian yang telah dilakukan Murnawan, E. (2019), *bio-oil* adalah produk yang dihasilkan dari proses pirolisis dimana proses pembakaran terjadi pada temperature tinggi dan tanpa adanya oksigen. *Bio-oil* memiliki sifat cair dan dapat digunakan sebagai bahan

bakar alternatif atau campuran dengan bahan bakar fosil. *Bio-oil* memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan karena dihasilkan dari limbah biomassa yang dapat diperbarui.

Pada penelitian lain oleh Zhang dkk. (2018), menunjukkan bahwa temperatur pirolisis memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil dan sifat fisikokimia *bio-char* yang berasal dari sisa tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil *bio-char* menurun dengan meningkatnya suhu pirolisis, dan *bio-char* jerami padi memiliki hasil tertinggi karena kandungan abunya yang lebih tinggi. Temperatur pirolisis juga memiliki efek signifikan pada sifat-sifat *bio-char*, termasuk kandungan karbon, pH, konduktivitas listrik, dan kekasaran permukaan. Temperatur pirolisis yang lebih tinggi menghasilkan konstitusi dan struktur kristal *bio-char* yang lebih tahan lama. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan wawasan berharga tentang pengaruh suhu pirolisis terhadap sifat *bio-char* sisa tanaman.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Xie dkk. (2019), mereka melakukan pirolisis pada limbah biomassa kayu dan mengkarakterisasi gas yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gas yang dihasilkan terdiri dari metana (CH₄), karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan senyawa organik volatil (VOCs) seperti aseton, etanol, dan asam asetat. Komposisi gas tersebut dipengaruhi oleh suhu pirolisis, dengan peningkatan suhu pirolisis menyebabkan peningkatan produksi metana dan hidrogen, sementara produksi karbon monoksida dan senyawa organik volatil cenderung menurun.

Pada penelitian ini temperatur yang digunakan adalah variasi 190, 240, 290, 340 dan 390, untuk waktu yang digunakan adalah 30 dan 70 menit. Dengan dilakukan penelitian ini diharapkan didapatkan produk *char*, *bio-oil*, dan *syngas* dengan temperatur yang lebih rendah dan waktu yang lebih singkat.

METODE

Pendekatan desain fungsional yang digunakan dalam penelitian ini adalah rancang bangun peralatan pirolisis. Pendekatan desain struktural yang digunakan adalah struktural prototipe pirolisis. Rancang bangun peralatan pirolisis terdiri dari empat unit utama yakni reaktor pirolisis, heater, separator, dan kondensor. Sistem tersebut dilengkapi dengan instrumen pendukung berupa kontrol panel, pompa vakum, tempat penampungan kondensat, tempat penampungan uncondensable gas, dan kompor biomassa. Struktural prototipe pirolisis dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu reaktor pirolisis, separator, dan kondensor.

a. Pengecilan ukuran bahan baku.

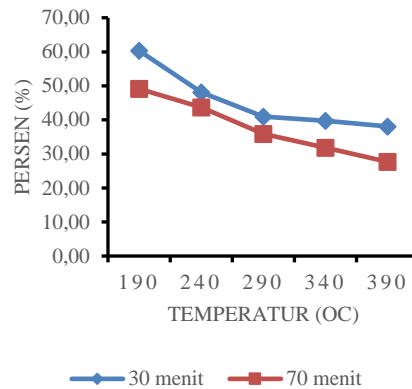
1. Menyiapkan bahan baku yang digunakan.
2. Mengecilkan ukuran bahan hingga berukuran 2-4 cm secara manual.
3. Menimbang bahan untuk sampel yang akan digunakan.

b. Proses Pirolisis

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Memasukkan bahan baku yang telah disiapkan sebelumnya ke dalam reaktor kemudian ditutup rapat.
3. Menghidupkan pemanas dan mengatur suhu sebesar 190 °C pada kontrol panel.
4. Menghidupkan pompa air pendingin untuk sirkulasi fluida pada kondensor dan mengatur suhu air sebesar 15 – 20 °C.
5. Menghidupkan stopwatch saat pemanas mulai menyala hingga proses pirolisis berakhir.
6. Menampung hasil kondensat dalam erlenmeyer dan amati nyala api dari pembakaran gas hasil pirolisis.
7. Membuka katup bawah pada separator setiap 10 menit untuk mengeluarkan fraksi berat yang telah dihasilkan.
8. Proses pirolisis dihentikan ketika tidak ada lagi kondensat yang keluar dari kondensor.
9. Mencatat waktu proses dan volume kondensat setelah percobaan selesai.
10. Setelah proses pirolisis selesai matikan *heater* dan kontrol panel.
11. Apabila reaktor telah dingin keluarkan biochar dari reaktor, dinginkan lalu timbang massa *bio-char*.
12. Lakukan langkah yang sama dengan variasi 24571emperature dan rasio bahan yang berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

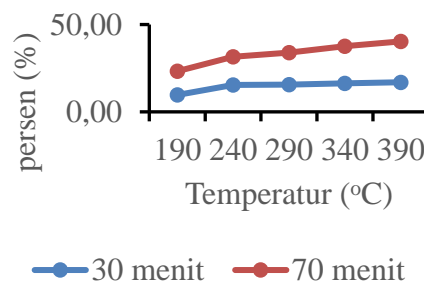
Rendemen pirolisis mengacu pada persentase berat produk arang yang dihasilkan dari proses pirolisis dibandingkan dengan berat bahan baku (seperti biomassa atau limbah organik) yang digunakan dalam proses tersebut. Rendemen pirolisis dinyatakan dalam bentuk persentase. Berikut merupakan hasil char (arang) yang disajikan dalam bentuk grafik;



Gambar 1 Pengaruh Temperatur dan Waktu terhadap Rendemen Bio-Char

Dapat dilihat bahwa %rendemen char dipengaruhi oleh temperatur dan waktu pirolisis. Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur maka produk char yang dihasilkan pun makin sedikit. Pada temperatur yang lebih rendah, rendemen char cenderung lebih tinggi dikarenakan produk padat lebih sedikit terdekomposisi menjadi gas atau cairan. Sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi, rendemen char bisa lebih rendah dikarenakan produk padat dapat mengalami dekomposisi lebih lanjut menjadi gas dan bio-oil.

Pengaruh waktu pirolisis terhadap arang yang dihasilkan dapat bervariasi tergantung pada beberapa faktor, termasuk tipe bahan baku yang digunakan, suhu pirolisis, dan kecepatan pemanasan. Pada gambar 1 dapat dilihat pengaruh waktu terhadap rendemen *bio-char* yang dihasilkan. Semakin lama waktu tinggal, *bio-char* yang dihasilkan pun makin sedikit. Semakin lama waktu pirolisis, bahan baku (misalnya biomassa) yang digunakan cenderung habis lebih banyak karena terus mendapatkan panas. Ini dapat menyebabkan deplesi bahan baku yang berarti lebih sedikit bahan baku yang tersisa dan pada akhirnya lebih sedikit *bio-char* yang dihasilkan.

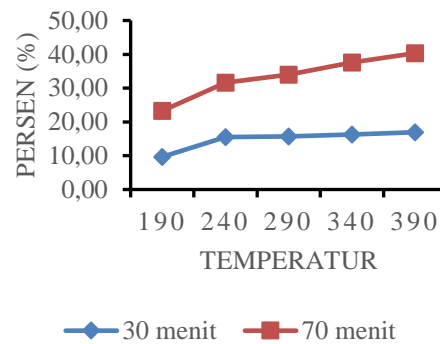


Gambar 2. Pengaruh Temperatur dan Waktu terhadap Rendemen Bio-oil

Dapat dilihat pada Gambar 2 bahwa semakin tinggi temperatur, *bio-oil* (minyak) yang dihasilkan juga semakin meningkat. Pada gambar menunjukkan rendemen *bio-oil* terbesar terdapat pada temperatur 390 °C dengan nilai 16,95% untuk waktu 30 menit dan 23,39% untuk waktu 70 menit.

Waktu pirolisis mengacu pada durasi atau lamanya proses pirolisis, yaitu suatu proses termokimia yang melibatkan pemanasan bahan organik seperti biomassa atau limbah organik dalam kondisi tanpa oksigen (anaerob) untuk menghasilkan produk, seperti arang, *bio-oil*, dan

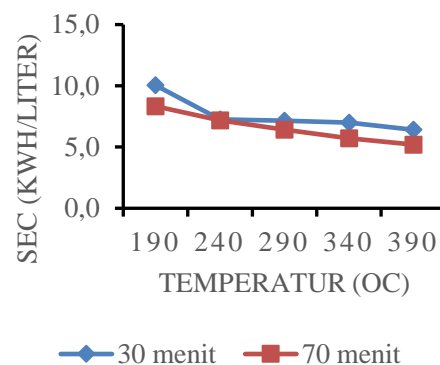
gas. Dapat dilihat pada gambar 2 bahwa semakin lama waktu pirolisis maka semakin banyak pula *bio-oil* yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan pada waktu pirolisis 30 menit proses dihentikan sesuai waktu yang telah diatur dimana proses pirolisis masih bisa menghasilkan *bio-oil*.



Gambar 3 Pengaruh Temperatur dan Waktu terhadap Rendemen Syngas

Dapat dilihat pada gambar 3 ada kenaikan kandungan rendemen gas sering bertambahnya temperatur dan bertambahnya waktu misalnya, dalam sebuah studi oleh Zhang dll (2019), mereka melakukan pirolisis biomassa pada suhu 300 hingga 500 derajat Celcius. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada suhu 300-400 derajat Celcius, kandungan metana yang dihasilkan masih relatif rendah, sekitar 5-10%. Namun, pada suhu 500 derajat Celcius, kandungan metana bisa mencapai sekitar 20-30%.

Gas yang dihasilkan selama proses pirolisis terdiri dari berbagai senyawa seperti metana, karbon monoksida, hidrogen, dan senyawa organik volatil (VOC). Gas-gas ini dilepaskan sebagai hasil dekomposisi termal biomassa pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen (Xie dkk.,2019). Dapat dilihat dari grafik, semakin tinggi temperatur pirolisis maka kandungan gas yang dihasilkan semakin meningkat. hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan. Penelitian telah menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur pirolisis, jumlah gas yang dihasilkan akan meningkat (Bridgwater, A. V. ,2012).



Gambar 4 Grafik Nilai Specific Energy Consumption (SEC)

Dari gambar 4 pada proses pirolisis ini digunakan bahan baku tatal kayu karet dengan total input sebanyak 1,5 kg dan ukuran bahan baku \pm 4 cm serta waktu operasi selama 30 dan 70 menit. Dapat diketahui bahwa nilai SEC optimal pada alat pirolisis terdapat pada temperatur 390°C dengan waktu selama 70 menit dengan nilai SEC sebesar 5,2 kWh/L. Besar nilai SEC dipengaruhi oleh daya yang digunakan dan banyak produk yang dihasilkan. Pada temperatur 390°C dengan waktu selama 70 menit dengan nilai SEC paling rendah karena pada kondisi operasional tersebut menghasilkan produk cair paling tinggi yaitu sebesar 0,49 Liter dengan daya sebesar 2.548 watt. Sedangkan pada kondisi operasi alat pirolisis dengan temperatur 190°C dengan waktu selama 30 menit menghasilkan produk cair paling rendah yaitu sebesar

0,252 Liter dengan penggunaan daya sebesar 2.548 watt sehingga menghasilkan nilai SEC paling tinggi yaitu sebesar 6,473 kWh/L.

Semakin kecil konsumsi daya yang digunakan dan menghasilkan produk yang semakin besar maka nilai Specific Energy Consumption (SEC) semakin kecil (Lawrence, 2019). proses yang hemat energi adalah proses dengan nilai konsumsi energi spesifik yang rendah, dan sebaliknya proses yang boros adalah proses yang menunjukkan nilai konsumsi energi spesifik yang tinggi (Pranolo, 2019). Dari data hasil penelitian yang telah diperoleh memiliki nilai Specific Energy Consumption (SEC) yang rendah menunjukkan bahwa kinerja alat pirolisis bekerja dengan baik.

SIMPULAN

1. Persentase rendemen produk pirolisis mengalami kenaikan dan penurunan seiring dengan tingginya temperatur dan penambahan waktu. Pada produk *bio-char* rendemen mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur dan penambahan waktu sedangkan pada *bio-oil* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya temperature dan waktu tinggal. Sementara untuk rendemen syngas juga mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya temperature dan waktu tinggal.
2. Temperatur serta waktu mempengaruhi karakteristik produk yang dihasilkan. Pada *bio-char* semakin tinggi temperatur dan penambahan waktu semakin baik karakteristik yang dihasilkan yang dibuktikan dengan semakin meningkatnya nilai kalor pada *bio-char* yaitu dengan nilai kalor tertinggi terdapat pada temperature 390°C, waktu 70 menit sebesar 5144,0605 cal/gr dan terendah temperatur pirolisis 190°C, waktu 30 menit sebesar 3660,5953 cal/gr. Sedangkan pada *bio-oil* peningkatan suhu dan penambahan waktu membuat densitas dan viskositas semakin menurun dan begitupun dengan nilai pH yang membuat *bio-oil* semakin asam karena komponen biomassa yang terdekomposisi secara optimal. Untuk produk gas peningkatan temperatur dan waktu tinggal membuat kadar CH₄ semakin meningkat sehingga dapat meningkatkan lama waktu pembakaran.
3. Konsumsi energi yang dihasilkan menunjukkan bahwa kinerja alat pirolisis selama pengamatan berlangsung memiliki nilai yang paling optimal pada temperature 390 °C waktu 70 menit sebesar 2,2 kWh/L yang memiliki total konsumsi daya rendah dan menghasilkan produk yang paling banyak yaitu 345 mL *bio-oil*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., & Daud, W. M. A. W. (2014). A Review On Co-Pyrolysis of Biomass: An Optional Technique to Obtain A High-Grade Pyrolysis Oil. *Energy Conversion and Management*, 87(1), 71–85.
- Asmunandar, A., Goembira, F., Raharjo, S., & Yuliarningsih, R. (2023). Evaluasi Pengaruh Suhu dan Waktu Pirolisis Biochar Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*). *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1).
- Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- BPS. (2021). Luas Tanaman Perkebunan Menurut Provinsi (Ribu Hektar), 2019-2021. Retrieved March 1, 2023, from <https://www.bps.go.id/indicator/54/131/1/luas-tanaman-perkebunan-menurut-provinsi.html>
- Cahyono, R. Y. (2013). Pengaruh Temperatur dan Waktu Pirolisis Terhadap Kualitas Bio-Oil dari Limbah Padat Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Kimia*, 19(2), 1-8.
- Chen, D., & Chen, Y. (2019). Biochar: a review. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 13(1), 1-15.
- Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied*
- Diebold, J. P. (1999). A review of the chemical and physical mechanisms of the storage stability of fast pyrolysis bio-oils.

- Diebold, J. P., & Bridgwater, A. V. (1997). Overview of fast pyrolysis of biomass for the production of liquid fuels. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion: Volume 1/Volume 2*, 5-23.
- E. K. Kuryani, "Pirolisis Sampah dengan Variasi Jenis Ranting dan Kantong Plastik HDPE," Dep. Tek. Lingkung., p. 162, 2017.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A. S., Bindar, Y., & Irawan, A. (2019). Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit menjadi bio-char, bio-oil dan gas dengan metode pirolisis. *Jurnal Chemurgy*, 3(2), 12-17.
- Goad, M. A., & Ali, R. (2017). Thermal and catalytic cracking of plastic wastes into hydrocarbon fuels. *International Journal of Engineering and Information Systems*, 1(5), 56-61.
- Gupta, A., Verma, N., & Singh, D. (2019). Effect of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochar derived from different feedstocks. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 238-246.
- HAPSAR, F. I. (2017). OPTIMASI NILAI KALOR BIOCHAR LIMBAH TEMPURUNG KELAPA PADA PROSES PIROLISIS MELALUI VARIASI SUHU DAN WAKTU. (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- International Energy Agency (IEA). (2007). *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*. Paris: IEA.
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels Production through Biomass Pyrolysis- A Technological Review. *Energies*, 5(12), 4952–5001.
- Kasim, F., Fitrah, A. N., & Hambali, E. (2015). Aplikasi asap cair pada lateks. *Penelitian dan Aplikasi Sistem dan Teknik Industri*, 9(1), 182839
- Komarayati, S., & Efiyanti, L. (2018). Characteristics and potential utilization of liquid smoke made from trema, nani, merbau, matoa and malas woods. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 36(3), 219-238.
- Komarayati, S., Setiawan, D., & Nurhayati, T. (1995). Analisis Kimia dan Destilasi Kering Kayu Karet. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 13(1), 1–8.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Routledge.
- Liu, L., Cao, Y., Qing, M., & Long, Y. (2021, May). Structural evolution of rubber-wood char under different pyrolysis conditions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 770, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- Maulina, S., & Putri, F. S. (2017). Pengaruh suhu, waktu, dan kadar air bahan baku terhadap pirolisis serbuk pelepah kelapa sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 6(2), 35-40.
- Murnawan, E. (2019). Karakteristik Bio-Oil Hasil Pirolisis Limbah Brem Dengan Variasi Temperatur. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 7(1), 23-28.
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & fuels*, 20(3), 848-889.
- Nofiyanto, A., Soebiyakto, G., & Suwandono, P. (2020). Studi Proses Pirolisis Berbahan Jerami Padi Terhadap Hasil Produksi Char Dan Tar Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Proton*, 11(1), 21-28.
- Novita, S. A., Santosa, S., Nofialdi, N., Andasuryani, A., & Fudholi, A. (2021). Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa. *Agroteknika*, 4(1), 53–67.
- Olufemi, A. S., & Olagboye, S. (2017). Thermal conversion of waste plastics into fuel oil. *Int. j. petrochem. sci. eng*, 2(8), 252-257.
- Parinduri, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88–92.
- Rafli, R., Fajri, H. B., Jamaludhin, A., Azizi, M., Riswanto, H., & Syamsiro, M. (2017). Penerapan teknologi pirolisis untuk konversi limbah plastik menjadi bahan bakar minyak di Kabupaten Bantul. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, 2(1), 1-5.
- Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., & Firmansyah, F. (2019). Pengaruh Jenis Biomassa Pada Pembakaran Pirolisis Terhadap Karakteristik dan Efisiensi Bioarang - Asap Cair yang Dihasilkan. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, 20(1), 18–27.

- Ristianingsih, Y., Ulfa, A., & Syafitri, R. K. S. (2015). Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Perekat terhadap Karakteristik Briket Bioarang Berbahan Baku Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Pirolisis. *Konversi*, 4(2), 45–51.
- Saparudin, S., Syahrul, S., & Nurchayati, N. (2015). Pengaruh Variasi Temperatur Pirolisis Terhadap Kadar Hasil Dan Nilai Kalor Briket Campuran Sekam Padi-kotoran Ayam. *Dinamika Teknik Mesin*, 5(1).
- Sasmita, A., Isnaini, I., & Almira, U. (2022). Pengaruh Penambahan Biochar Cangkang Sawit Dengan Variasi Suhu Pirolisis Terhadap Emisi Co₂ dari Top Soil. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 9(2), 439-446
- Shaaban, M., El-Naggar, A. H., & El-Sayed, S. A. (2018). Effect of pyrolysis temperature on the properties of biochar derived from agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 1-9.
- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2018, March). Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 334, p. 012001). IOP Publishing.
- Sipahutar, R. H., Sucipto, T., & Iswanto, A. H. (2015). Sifat Fisis dan Mekanis Kayu Karet (Hevea Brasiliensis MUELL Arg) Bekas Sadapan dan Kayu Karet tanpa Sadapan. *Peronema Forestry Science Journal*, 4(1), 95–101.
- Soares, J. M., da Silva, P. F., Puton, B. M. S., Brustolin, A. P., Cansian, R. L., Dallago, R. M., & Valduga, E. (2016). Antimicrobial and antioxidant activity of liquid smoke and its potential application to bacon. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 189-197.
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon management*, 1(2), 289-303.
- Sukiran, M. A., Chin, C. M., & Bakar, N. K. (2009). Bio-oils from pyrolysis of oil palm empty fruit bunches. *American Journal of Applied Sciences*, 6(5), 869-875.
- Uchimiya, M., Chang, S., Klasson, K. T., & Wartelle, L. H. (2011). Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 432-441.
- Varma, A. K., Shankar, R., & Mondal, P. (2018). A review on pyrolysis of biomass and the impacts of operating conditions on product yield, quality, and upgradation. *Recent advancements in biofuels and bioenergy utilization*, 227-259.
- Wang, Y., Zhang, P., Zhang, X., Yuan, X., & Han, L. (2019). Effects of pyrolysis temperature on the yield and properties of biochar derived from different crop straws. *BioResources*, 13(4), 8002-8016.
- Xie, Q., Li, Y., Zhang, Y., & Wang, X. (2019). Pyrolysis of biomass waste for bio-oil and biochar production: A review. *Waste Management*, 95, 390-401.
- Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., & Boyd, S. E. (2017). Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. *Biomass and Bioenergy*, 105, 136-146.
- 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.