



## Pengembangan Desain Alat Pirolisis Tipe *Fast Pyrolysis* dengan Reaktor Screw Bertingkat untuk Pengolahan Kulit Kopi

Fajar Wisnu Ari Bowo<sup>1\*</sup>, Arif Rahman Saleh<sup>2</sup>, Sigit Mujiarto<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Jurusan Teknik Mesin Dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Indonesia

\*Korespondensi Penulis: [fajar22wae@gmail.com](mailto:fajar22wae@gmail.com)

**Abstract.** *Pyrolysis is a biomass conversion method into fuel through heating at high temperatures under oxygen-limited conditions. The main factors influencing the pyrolysis process include temperature, residence time, pressure, particle size, reactor design, and the type of pyrolysis employed. This study aims to design an auger-type fast pyrolysis system based on previous research. The design and modeling of the fast pyrolysis equipment were carried out using Autodesk Inventor 2021 software. Based on the calculation and design results, a fast pyrolysis reactor with a multi-stage configuration and a capacity of 5.2 kg was developed. The system consists of a three-stage reactor made of Stainless Steel 304. The reactor is equipped with a screw conveyor for material transport, which is driven by an electric motor. Biomass heating inside the reactor is provided by a clamp heater with an electrical power requirement of 611 W, while biomass cooling is performed using a condenser with a cooling water capacity of 15.586 liters. Based on the structural simulation results, the maximum von Mises stress obtained was 35.4 MPa, the maximum displacement was 0.0528 mm, and the safety factor was 6.07 under loading conditions including an internal reactor pressure of 0.32 MPa, a torsional moment of 1,130 kg-mm, and an operating temperature of 700 °C. These values are within the allowable limits of the material, indicating that the designed reactor is structurally safe and feasible for use.*

**Keywords:** *Coffee Husk; Fast Pyrolysis; FEA; Reactor; Screw*

**Abstrak.** Pirolisis merupakan salah satu metode pengolahan biomassa menjadi bahan bakar melalui pemanasan biomassa pada suhu tinggi dengan kondisi oksigen terbatas. Faktor utama yang mempengaruhi proses pirolisis antara lain suhu, waktu tinggal (*residence time*), tekanan, ukuran partikel, desain reaktor, serta jenis pirolisis yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang desain alat *fast* pirolisis tipe *auger* berdasarkan hasil penelitian sebelumnya. Dalam pembuatan desain alat *fast* pirolisis, permodelan menggunakan *software Autodesk Inventor 2021*. Berdasarkan hasil perhitungan dan perancangan didapatkan rancangan alat pirolisis tipe *fast* pirolisis dengan reaktor *multi-stage* kapasitas 5,2 kg. Alat ini memiliki reaktor bertingkat tiga dengan material *Stainless Steel 304*. Di dalam reaktor dilengkapi *screw* sebagai pengangkut material yang digerakkan dengan motor listrik. Untuk pemanasan biomassa di reaktor menggunakan *clamp heater* dengan kebutuhan listrik sebesar 611 W. Untuk pendinginan biomassa menggunakan kondensor dengan kapasitas air kondensornya sebesar 15,586 liter. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan terhadap desain, didapat hasil nilai *von mises stress* sebesar 35,4 MPa, *displacement* sebesar 0,0528 mm, dan *safety factor* sebesar 6,07 ul dengan pembebanan berupa tekanan di dalam reaktor sebesar 0,32 MPa, momen puntir 1130 kg.mm, dan parameter temperatur 700 °C. Nilai *von mises stress, displacement, dan safety factor* masih berada dalam batas aman material sehingga reaktor dinyatakan aman dan layak digunakan.

**Kata kunci:** FEA; Kulit Kopi; Pirolisis Cepat; Reaktor; Screw

### 1. LATAR BELAKANG

Indonesia memiliki potensi terhadap energi baru terbarukan (EBT) yang pemanfaatannya masih rendah dan belum maksimal. Indonesia sebagai negara dengan konsumsi energi terbesar di kawasan Asia Tenggara dan urutan kelima di Asia Pasifik didominasi oleh penggunaan energi fosil sebesar 85% dari keseluruhan pemanfaatan energi (Afriyanti dkk., 2020). Melalui Kebijakan Energi Nasional (KEN), pemerintah Indonesia pada tahun 2014 menetapkan target sebesar 23% untuk pemanfaatan energi baru terbarukan dengan *deadline* hingga tahun 2025. Namun hingga tahun 2024 pemanfaatannya masih sekitar 14% (Lahope, 2024).

Salah satu metode pemanfaatan energi baru terbarukan yaitu melalui pengolahan biomassa. Teknologi pirolisis ini berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia karena berlimpahnya bahan biomassa yang tersedia, mudah dikembangkan, dan ramah lingkungan (Novita dkk., 2021).

Salah satu bahan biomassa yang berpotensi diolah melalui proses pirolisis adalah kulit kopi. Berdasarkan data dari Badan Statistika Indonesia, pada tahun 2023 produksi kopi di Indonesia mencapai 750 ribu ton. Dengan banyaknya produksi kopi di Indonesia maka limbahnya dapat dimanfaatkan sebagai bahan pirolisis. Sebagian besar limbah kulit kopi berasal dari produksi kopi yang hanya diambil bijinya untuk diolah. Sedangkan kulit kopi yang tidak terpakai hanya dibuang atau dimanfaatkan sebagai pakan ternak dan pupuk kompos. Padahal berdasarkan hasil penelitian Aprilia Lestari & Bagus Priambodo (2020), kulit kopi memiliki nilai kalor yang cukup baik, sekitar 4285 kkal/kg, lebih besar dari nilai kalor kayu rami yang hanya sebesar 3409 kkal/kg.

Rasaq dkk. (2021), dalam tinjauannya menjelaskan bahwa efisiensi proses pirolisis khususnya pada kondisi tekanan tinggi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu suhu, waktu tinggal (*residence time*), tekanan, ukuran partikel, desain reaktor, serta jenis pirolisis yang digunakan. Suhu reaksi memiliki peran yang penting dalam menentukan arah dan hasil konversi biomassa. Suhu optimal untuk *fast pyrolysis* biasanya berada pada sekitar 500-700°C. Jika suhu langsung terlalu tinggi saat bertemu dengan bahan, produk cenderung terlalu terurai dan hancur (*cracking*) menjadi gas, sehingga menurunkan *yield bio-oil*. Sedangkan jika suhunya terlalu rendah maka senyawa *bio-oil* yang dihasilkan tidak akan optimal akibat reaksi yang tidak sempurna. Sejalan dengan suhu, waktu tinggal material di dalam reaktor juga sangat berpengaruh. Waktu yang terlalu singkat akan menyebabkan reaksi tidak sempurna, sedangkan waktu yang terlalu lama justru dapat memicu *cracking* dari senyawa volatil. Idealnya, *fast pyrolysis* memerlukan waktu tinggal yang singkat, kurang dari dua detik untuk zat uap dan di bawah satu menit untuk zat padatan. Oleh karena itu, waktu tunggu sangat krusial dalam menentukan hasil pengolahan. Salah satu metode yang efektif untuk mengatasi waktu tunggu yaitu menggunakan *screw*. Pemanfaatan *screw* memiliki efektivitas dan kemudahan pengaturan *timing* dalam sistem, dipengaruhi oleh besar *pitch* dan *rpm* (Zhao dkk., 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh Zhu dkk. (2021), berfokus pada pengembangan sistem reaktor bertingkat (*multi-stage*) untuk proses *chemical looping combustion (CLC)*, khususnya dalam menangani bahan bakar padat. Salah satu temuan utama mereka adalah bahwa konfigurasi *multi-stage* yang dilakukan memungkinkan proses yang terpisah dan bertahap

sehingga reaksi oksidasi, reduksi, dan pemindahan panas dapat diatur secara lebih presisi antar setiap tahap reaktor. Ini berdampak langsung pada efisiensi termal dan konversi bahan bakar yang dihasilkan. Selain itu, konfigurasi *multi-stage* ini memungkinkan proses reaksi yang lebih optimal, dengan penurunan kandungan oksigen ( $O_2$ ) pada zona-zona tertentu. Kondisi ini sangat penting dalam proses seperti pirolisis dan sejenisnya, di mana keberadaan  $O_2$  yang rendah dapat mengurangi pembakaran langsung bahan baku, sehingga lebih banyak senyawa volatil yang berhasil diubah menjadi bahan bakar.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Lathifudin (2024), sudah dibuat rancangan pirolisis tipe *fast pyrolysis* dengan kapasitas 5 kg/*batch* yang memakai reaktor *single screw*. Namun hasil akhir rancangannya menghasilkan *safety factor* sebesar 1,4 ul yang mendekati batas aman yaitu 1 ul yang rawan apabila overuse. Pada penelitian ini desain alat pirolisis yang akan dibuat berjenis *fast pyrolysis* dengan reaktor *screw* yang dibuat bertingkat untuk mengolah limbah kulit kopi menjadi bahan bakar bioenergi. Selain itu suhunya dibuat bertahap untuk mengoptimalkan proses reaksi pirolisis yang terjadi.

## 2. KAJIAN TEORITIS

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Lathifudin (2024), sudah dibuat rancangan pirolisis tipe *fast pyrolysis* dengan kapasitas 5kg/*batch* yang memakai reaktor *single screw*. Penelitian tersebut berfokus untuk menggunakan pengaruh temperatur selama proses pirolisis agar dapat mencapai suhu tinggi dalam waktu singkat dengan mempertimbangkan *von misses stress* serta *displacement* sebagai parameter *safety factor*. Metode yang dipakai yaitu memakai pemanas induksi berupa clamp heater dan didapat hasil pada suhu sekitar 500-700°C yang sudah sesuai dengan salah satu tujuan *fast pyrolysis*.

Sejalan dengan penelitian yang dilakukan Lathifudin (2024), penelitian yang dilakukan oleh Darmawan (2024) serta Arzaq (2024), membahas tentang pengaruh pemanasan terhadap proses pirolisis dan produk hasil pirolisis, penelitian tersebut terarah ke pengujian menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Pada penelitian Darmawan (2024) didapat bahwa peningkatan suhu pada proses *fast pyrolysis* dapat mempengaruhi nilai kalor produk yang dihasilkan., Didapat hasil pengujian tertinggi pada suhu 700°C menghasilkan kalor tertinggi di kisaran 27,97 MJ/kg. Ia juga menyimpulkan bahwa semakin tinggi suhu target, semakin lambat laju pemanasan reaktor. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan Arzaq (2024), didapat bahwa distribusi panas sangat berpengaruh terhadap optimalisasi proses pirolisis. Didapatkan hasil pengujian bahwa nilai distribusi kalor paling optimal berada di variasi suhu 500°C dan 600°C. Dari kedua penelitian tersebut dapat

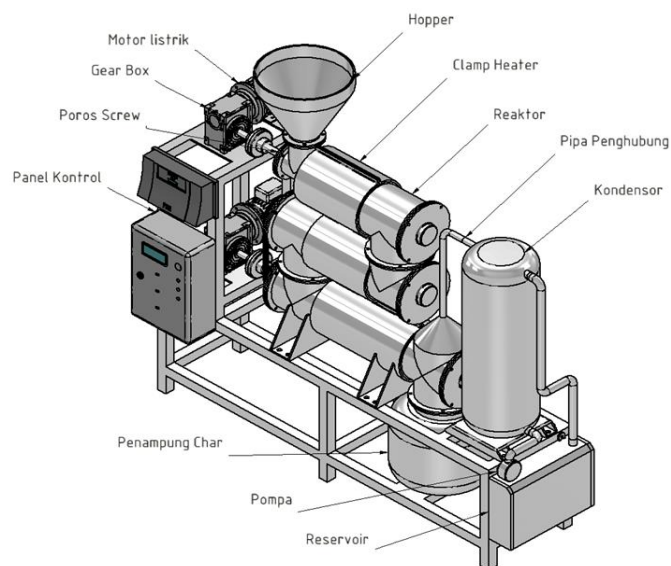
disimpulkan bahwa untuk mendapatkan hasil pirolisis yang optimal perlu memperhatikan pengaruh kenaikan suhu yang teratur, secara bertahap namun cepat, serta distribusi panas yang merata pada suhu optimal dengan *heat rate* yang tinggi.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juni-Oktober 2025 di laboratorium komputer Universitas Tidar Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah menggunakan *software Computer Aided Design (CAD)* berupa *Autodesk Inventor 2021*. Secara garis besar penelitian ini menggunakan metode permodelan alat yang kemudian dilakukan simulasi terhadap hasil desain dengan menggunakan *software Computer Aided Design (CAD)*. Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode analisis kuantitatif yang menggunakan berbagai data sebagai acuan perhitungan yang akurat. Data-data tersebut akan didapat dari hasil perhitungan, simulasi pengujian dan berbagai sumber referensi yang dapat dipakai. Kemudian akan ditarik kesimpulan berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan pada seluruh komponen alat pirolisis, didapat hasil konsep desain alat *fast pyrolysis* dengan reaktor *screw* bertingkat yang ditampilkan pada gambar 1 sebagai berikut.



**Gambar 1.** Konsep Desain Alat *Fast Pyrolysis*

Alat tersebut bekerja dengan memanaskan kulit kopi yang akan masuk melalui *hopper*. Pertama kulit kopi akan masuk ke reaktor pertama yang memiliki suhu masuk 200°C. pemilihan suhu tersebut bertujuan agar suhu awal tidak langsung mencapai suhu reaksi di kisaran 400-700°C sehingga tidak menyebabkan *cracking* pada biomassa. Selain itu suhu tersebut juga dapat menguapkan kandungan H<sub>2</sub>O yang masih terkandung pada kulit kopi. Sayangnya untuk saat ini alat penyaring H<sub>2</sub>O hanya mampu bekerja pada suhu di bawah 80°C sehingga penerapannya masih belum dapat dilakukan. Aliran kulit kopi selanjutnya akan masuk ke reaktor kedua yang memiliki suhu 400°C. suhu ini merupakan suhu awal reaksi yang akan menjadi *pra-reaction* dalam alat ini. Di sini kulit kopi akan mulai bereaksi yang kemudian akan masuk ke reaktor ketiga dengan suhu 700°C. pada reaktor ini akan terjadi reaksi akhir dari kulit kopi menjadi gas yang akan disalurkan ke kondensor. Di sini gas hasil pirolisis akan didinginkan menghasilkan bioenergi berupa cair dan sisa gas. Untuk sisa kulit kopi berupa *char* akan ditampung di penampungan *char*. Spesifikasi dari alat *fast pyrolysis* reaktor *screw* bertingkat ditampilkan pada tabel 1 sebagai berikut.

**Tabel 1.** Spesifikasi Alat Fast Pyrolysis

<b>Komponen</b>	<b>Keterangan</b>
Reaktor	Kapasitas 5,2 kg/ <i>batch</i> Dimensi 440 mm × Ø164 mm × 3
<i>Screw</i>	Diameter Ø150 mm <i>Pitch</i> 16 mm
<i>Clamp Heater</i>	Daya 611 Watt
Motor Listrik	Daya 421 Watt
<i>Gear Box</i>	Rasio 1:15
Poros	Diameter 20 mm Putaran 100 rpm
<i>Bearing</i>	Tipe N304
Kondensor	Kapasitas 15,586 liter Dimensi Ø190 mm × 550 mm <i>Coil</i> Ø1 in × 5,5 m
Pompa	Debit 4,8 liter/menit
Baut dan Mur	Tipe ISO M14, M12, M10, M8

## Hasil Simulasi FEA

Pada simulasi yang dilakukan, pembebanan yang dilakukan berupa momen puntir sebesar 1130 kg.mm pada poros dan tekanan sebesar 0,32 MPa pada ruang reaktor. Material yang dipakai menggunakan spesifikasi *Stainless Steel 304* dengan kondisi parameter temperatur 700°C.

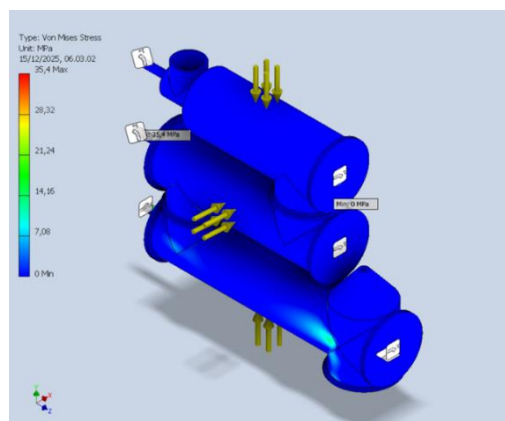
Tahap awal yang dilakukan sebelum simulasi adalah pembuatan meshing. Meshing bertujuan untuk membagi objek menjadi komponen-komponen kecil dan sederhana. Semakin kecil ukuran *meshing* maka akan semakin akurat hasil simulasi yang dilakukan, namun beban simulasi juga akan semakin berat. Pada simulasi ini, *meshing* yang dipakai memiliki struktur sebanyak 1000318 *nodes* dan 558399 *elements*. Hasil *meshing* dapat dilihat pada gambar 2 sebagai berikut.



**Gambar 2.** Hasil *Meshing*

Setelah *meshing* dibuat dan parameter-parameter dimasukkan, simulasi dari desain dapat dijalankan kemudian diambil result. Hasil simulasi *von mises stress*, *displacement*, dan *safety factor* yang dilakukan adalah sebagai berikut.

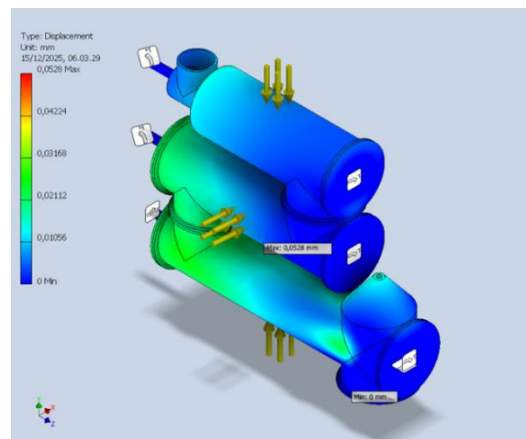
### *Hasil Simulasi Von Mises Stress*



**Gambar 3.** Hasil Simulasi *Von Mises Stress*

Berdasarkan hasil simulasi *von mises stress* seperti yang ditunjukkan gambar 3, nilai *von mises stress* maksimal terjadi pada bagian poros dan ujung sistem reaktor dengan tegangan maksimal sebesar 35,4 MPa. Pada bagian poros, tegangan tersebut diakibatkan oleh adanya gaya dinamis berupa putaran yang terjadi. Sedangkan pada ujung sistem reaktor menunjukkan kesesuaian terhadap sistem yang dibuat bertahap dan meningkat bebannya seiring mendekati ujung sistem. berdasarkan parameter warna, sebagian besar bagian berwarna biru yang menunjukkan desain tersebut kuat untuk menahan beban yang diberikan.

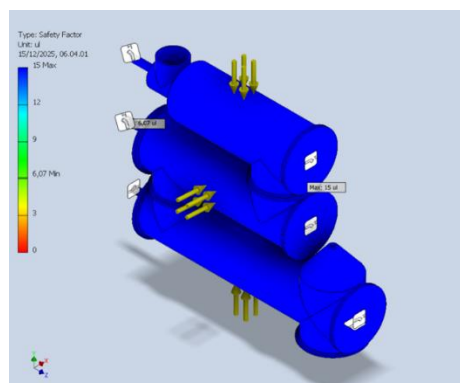
#### ***Hasil Simulasi Displacement***



**Gambar 4.** Hasil Simulasi *Displacement*

Berdasarkan hasil simulasi *displacement* seperti terlihat pada gambar 4, menunjukkan nilai *displacement* maksimal sebesar 0,0528 mm yang terjadi di sekitar reaktor ketiga. Hal tersebut terjadi karena pembebanan terbesar berada di sekitar reaktor ketiga. Dapat dilihat juga dari skala warnanya, menunjukkan bahwa *displacement* semakin meningkat dari reaktor pertama ke terakhir. Terlihat juga pada bagian penghubung dari reaktor kedua dan ketiga menjadi salah satu pusat *diceplacement*. Hal tersebut dikarenakan pada bagian tersebut menopang dua reaktor sekaligus.

#### ***Hasil Simulasi Safety Factor***



**Gambar 5.** Hasil Simulasi *Safety Factor*

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, didapat nilai *safety factor* minimum sebesar 6,07 ul yang dapat dilihat pada gambar 5. nilai tersebut muncul pada bagian poros. Hal tersebut diakibatkan pembebanan putaran sebesar 1130 kg.mm, tekanan sebesar 0,32 Mpa, serta dengan parameter temperatur 700°C. daerah tersebut juga merupakan tempat *von mises stress* terbesar dan tempat berkumpulnya *displacement*.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pengujian menggunakan simulasi FEA untuk mencari *von mises stress*, *displacement*, dan *safety factor* menunjukkan nilai yang diperoleh masih berada dalam batas aman material. Hal tersebut menunjukkan bahwa reaktor mampu menahan beban yang diberikan selama proses kerja, maka reaktor dinyatakan aman dan layak digunakan. Selain itu, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, perancangan ini mampu meningkatkan performa reaktor dari perancangan sebelumnya serta meningkatkan nilai *safety factor* yang sebelumnya mendekati minimum menjadi jauh lebih besar dari minimum.

Dalam proses desain dan rekayasa disarankan untuk melakukan perhitungan terkait parameter-parameter yang relevan dengan alat yang akan dibuat sehingga didapat dimensi dan kebutuhan alat yang sesuai. Pengembangan desain kedepannya diharapkan dapat berfokus pada peningkatan performa dan desain yang sudah ada serta dapat digunakan sebagai referensi untuk desain yang lebih baik. Selain itu, dengan semakin majunya teknologi maka akan ada kemungkinan untuk mengimplementasikan teknologi lainnya.

## DAFTAR REFERENSI

- Afriyanti, Y., Sasana, H., & Jalunggono, G. (2020). Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi konsumsi energi terbarukan di Indonesia. *Jurnal Pengembangan Administrasi*, 2. <https://doi.org/10.24912/jpa.v2i4.9319>
- Aprilia Lestari, V., & Priambodo, T. B. (2020). Kajian komposisi lignin dan selulosa dari limbah kayu sisa dekortikasi rami dan cangkang kulit kopi untuk proses gasifikasi downdraft. *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*, 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.29122/jel.v16i1.4572>
- Arzaq, V. K. (2024). *Analisis computational fluid dynamics (CFD) pirolisis cepat kulit kopi menggunakan reaktor tipe screw*.
- ASTM International. (2011). *ASTM A240/A240M: Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and general applications*. ASTM International.
- Darmawan, Y. P. (2024). *Karakterisasi dan analisis unjuk kerja reaktor fast pyrolysis kapasitas 5 kg/batch*.

- Garg, S., Nayyar, A., Buradi, A., Shadangi, K. P., Sharma, P., Bora, B. J., Jain, A., & Shah, M. A. (2023). A novel investigation using thermal modeling and optimization of waste pyrolysis reactor using finite element analysis and response surface methodology. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37793-8>
- Hazizi, K., & Ghaleeh, M. (2023). Design and analysis of a typical vertical pressure vessel using ASME code and FEA technique. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202305.1449.v2>
- Jerzak, W., Acha, E., & Li, B. (2024). Comprehensive review of biomass pyrolysis: Conventional and advanced technologies, reactor designs, product compositions and yields, and techno-economic analysis. *Energies*, 17(20), 5082. <https://doi.org/10.3390/en17205082>
- Lahope, G. (2024). Implementasi kebijakan energi nasional (KEN) Indonesia menuju target bauran energi baru terbarukan (EBT) 23% tahun 2025. *Jurnal Darma Agung*. <https://doi.org/10.46930/ojsuda.v32i1.3945>
- Lathifudin, A. (2024). *Desain dan rekayasa fast pyrolysis tipe screw kapasitas 5 kg/batch*.
- Michailos, S., Parker, D., & Webb, C. (2017). Comprehensive design of a fast pyrolysis reactor for waste utilization. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(4). <https://doi.org/10.20508/ijrer.v7i4.6184.g7201>
- Novita, S. A., Santosa, S., Nofialdi, N., Andasuryani, A., & Fudholi, A. (2021). Parameter operasional pirolisis biomassa: Artikel review. *Agroteknika*, 4(1), 53–67. <https://doi.org/10.32530/agroteknika.v4i1.105>
- Openibo, A. O., Adefuye, O. A., Kuku, R. O., Raji, N. A., & Adegbuyi, P. A. O. (2023). Design analysis and construction of a biodiesel processing plant. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 17(2), 141–153. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2023.17.2.0236>
- Rasaq, W. A., Golonka, M., Scholz, M., & Białowiec, A. (2021). Opportunities and challenges of high-pressure fast pyrolysis of biomass: A review. *Energies*, 14(17), 5426. <https://doi.org/10.3390/en14175426>
- Simanjuntak, J. P., Silaban, R., & Putra, A. N. (2024). *Teknologi pirolisis biomassa: Energi terbarukan*. ECHA Progres: Lembaga Pengembangan Profesionalisme SDM.
- Sularso, & Suga, K. (2004). *Dasar perancangan dan pemilihan elemen mesin*. PT Pradnya Paramita.
- Wardhana, D. I., Ruriani, E., & Nafi, A. (2019). Karakteristik kulit kopi robusta hasil samping pengolahan metode kering dari perkebunan kopi rakyat di Jawa Timur. *Agrotrop: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 17(2), 214. <https://doi.org/10.32528/agrotrop.v17i2.2569>
- Zhao, R., Guo, L., Gao, W., Xiao, X., & Liu, Y. (2022). Structure optimization design of screw conveyor based on EDEM. *Journal of Physics: Conference Series*, 2200(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2200/1/012002>
- Zhu, X., Shen, T., Bollas, G., & Shen, L. (2021). Design and operation of a multi-stage reactor system for chemical looping combustion process. *Fuel Processing Technology*, 215, 106748. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106748>