



Simulasi CFD Berbasis *Single Particle* pada Proses *Fast Pyrolysis* Biomassa Kulit Kopi Menggunakan Reaktor *Screw* untuk Optimalisasi Produksi Gas

Muhammad Ma'arif Al Azizy^{1*}, Arif Rahman Saleh², Raka Mahendra Sulisty³

¹⁻³Jurusan Teknik Mesin Dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Indonesia

E-mail: muhammadmaarifalazizy21@gmail.com^{1*}, arifrahmansaleh@untidar.ac.id²,

rakamahendras@untidar.ac.id³

*Penulis Korespondensi: muhammadmaarifalazizy21@gmail.com

Abstract. Coffee husk is an agro-industrial waste with significant potential to be utilized as a renewable energy source through the fast pyrolysis process. This study aims to analyze and optimize gas production from the fast pyrolysis of coffee husk biomass using a screw reactor through single-particle-based Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The simulations were conducted by varying the operating temperature at 500°C, 600°C, and 700°C to examine pressure distribution, heat transfer, particle temperature, and the formation of pyrolysis products, namely bio-oil, biogas, and biochar. The modeling was performed using COMSOL Multiphysics 6.2 with a numerical approach to represent thermal phenomena and biomass decomposition reactions during the pyrolysis process. The simulation results indicate that increasing temperature significantly affects the rate of heat transfer and the temperature distribution of coffee husk particles. At 600°C, heat transfer and temperature distribution are more uniform compared to 500°C, although heating at the particle core is not yet fully optimal. The pressure distribution shows a stable flow of pyrolysis gas from the bottom to the top of the reactor. In terms of products, increasing temperature leads to a reduction in biochar and bio-oil formation due to the occurrence of secondary reactions, while biogas production increases. The highest gas production is achieved at 700°C, indicating the most optimal condition for maximizing gas yield from fast pyrolysis. Therefore, single-particle-based CFD simulation can be used as an effective tool to understand pyrolysis mechanisms and optimize process parameters in a screw reactor.

Keywords: Fast Pyrolysis; Coffee Husk; Computational Fluid Dynamics (CFD); Screw Reactor; Gas Production.

Abstrak. Kulit kopi merupakan limbah agroindustri yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan melalui proses *fast pyrolysis*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimasi produksi gas hasil *fast pyrolysis* biomassa kulit kopi menggunakan reaktor *screw* melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis *single particle*. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan suhu operasi sebesar 500°C, 600°C, dan 700°C untuk mengkaji distribusi tekanan, perpindahan panas, temperatur partikel, serta pembentukan produk *pyrolysis* berupa bio-oil, biogas, dan biochar. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics 6.2 dengan pendekatan numerik untuk merepresentasikan fenomena termal dan reaksi dekomposisi biomassa selama proses *pyrolysis*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan suhu berpengaruh signifikan terhadap laju perpindahan panas dan distribusi temperatur partikel kulit kopi. Pada suhu 600°C, perpindahan panas dan distribusi temperatur terjadi lebih merata dibandingkan suhu 500°C, meskipun pemanasan inti partikel belum sepenuhnya optimal. Distribusi tekanan menunjukkan aliran gas *pyrolysis* yang stabil dari bagian bawah menuju bagian atas reaktor. Dari sisi produk, peningkatan suhu menyebabkan penurunan pembentukan biochar dan bio-oil akibat munculnya reaksi sekunder, serta peningkatan pembentukan biogas. Produksi gas tertinggi diperoleh pada suhu 700°C, yang menunjukkan kondisi paling optimal untuk memaksimalkan gas hasil *fast pyrolysis*. Dengan demikian, simulasi CFD berbasis *single particle* dapat digunakan sebagai alat yang efektif untuk memahami mekanisme *pyrolysis* dan mengoptimasi parameter proses pada reaktor *screw*.

Kata kunci: *Computational Fluid Dynamics* (CFD); *Fast Pyrolysis*; Kulit Kopi; Produksi Gas; Reaktor *Screw*.

1. PENDAHULUAN

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang potensial untuk mengatasi krisis energi dan permasalahan lingkungan global. Di Indonesia, kulit kopi menjadi limbah pertanian yang berlimpah namun belum termanfaatkan secara optimal. Kopi merupakan salah satu komoditas yang sangat diminati di seluruh dunia, baik karena kepuasan yang

dirasakan oleh para penikmatnya maupun karena nilai ekonomis yang signifikan bagi negara-negara penghasil dan pengeksport biji kopi. Indonesia sebagai penghasil kopi terbesar keempat di dunia menghasilkan sekitar 639.000 ton kopi per tahun dengan 40-45% di antaranya berupa limbah kulit kopi (Situmorang et al. 2020). Pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai sumber biomassa untuk energi alternatif melalui proses *pyrolysis* cepat (*fast pyrolysis*) merupakan solusi potensial untuk pengolahan limbah sekaligus produksi energi terbarukan.

Fast pyrolysis merupakan teknologi inovatif yang populer dalam konversi biomassa menjadi bahan bakar dan produk lainnya. Proses *fast pyrolysis* kulit kopi pada suhu 500°C dapat menghasilkan yield gas hingga 35% dengan komposisi yang kaya akan hydrogen dan metana. Tantangan utama dalam pengembangan teknologi *fast pyrolysis* adalah optimasi parameter proses untuk memaksimalkan produksi produk yang diinginkan, dalam hal ini gas. Reaktor *screw* (ulir) menawarkan keunggulan dalam hal kontrol waktu tinggal dan transfer panas yang efisien dibandingkan jenis reaktor lainnya. Namun, optimasi desain dan parameter operasional reaktor *screw* untuk proses *fast pyrolysis* biomassa kulit kopi masih memerlukan kajian mendalam.

Pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pendekatan *single particle* menjadi metode yang efektif untuk memahami fenomena kompleks yang terjadi selama proses *fast pyrolysis*. Seperti yang dijelaskan oleh Wang et al. (2020), model CFD berbasis *single particle* mampu mensimulasikan perubahan fisik dan kimia pada partikel biomassa secara detail, termasuk perilaku pemanasan, penguapan, devolatilisasi, dan pembentukan produk. Simulasi CFD memungkinkan analisis komprehensif parameter-parameter kritis seperti suhu, waktu tinggal, dan ukuran partikel tanpa biaya eksperimen yang mahal.

Penelitian yang dilakukan oleh Chen et al. (2020) tentang simulasi *pyrolysis* biomassa menggunakan model CFD-DEM menunjukkan bahwa pada suhu 500-700°C terjadi peningkatan gas ringan (17-25%), tar primer stabil (46%), dan penurunan arang (22-14%), dengan ukuran partikel biomassa <1mm mempengaruhi pola aliran namun memberi variasi kecil pada produk *pyrolysis*. Meskipun demikian, studi tentang simulasi CFD untuk *fast pyrolysis* kulit kopi khususnya dengan fokus pada produksi gas masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan model CFD berbasis *single particle* yang dapat digunakan untuk optimasi proses *fast pyrolysis* biomassa kulit kopi dalam reaktor *screw* dengan fokus pada maksimalisasi produksi gas.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kulit Kopi

Kulit kopi merupakan limbah agroindustri dari proses pengolahan biji kopi yang mencapai 40-45% dari massa buah kopi segar, menghasilkan limbah signifikan di negara-negara produsen kopi. Proses pengolahan buah kopi untuk menghasilkan biji kopi yang kemudian digiling menjadi bubuk kopi.

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Tahun 2020, Provinsi Jawa Tengah memproduksi kopi sebanyak 24,90 ton. Produk besar dengan jumlah kulit kopi yang didapatkan juga signifikan sekitar 8,71 ton. Kulit kopi sebagai limbah lignoselulosa yang tinggi sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan menjadi *bio-oil*.

Pyrolysis

Pyrolysis merupakan proses dekomposisi termokimia biomassa pada kondisi tanpa atau minim oksigen pada suhu 300-650°C yang menghasilkan tiga produk utama: *bio-oil*, *bio-char*, dan gas (Boateng 2020). Proporsi masing-masing fraksi yang dihasilkan dari pirolis dipengaruhi oleh berbagai faktor dalam proses *pyrolysis*, seperti suhu, laju pemanasan, dan waktu tinggal.

Perpindahan Panas

Pyrolysis fast screw dengan material kulit kopi melibatkan mekanisme perpindahan panas yang kompleks dan terintegrasi. Proses ini dimulai ketika kulit kopi yang telah dikeringkan dan dihaluskan dimasukkan ke dalam reaktor screw yang dipanaskan. Perpindahan panas terjadi melalui tiga mekanisme utama: konduksi, konveksi, dan radiasi, bekerja secara simultan untuk mendegradasi struktur lignoselulosa kulit kopi secara termal.

Kulit kopi memiliki karakteristik termal yang unik, dengan kapasitas panas spesifik sekitar 1.3-1.7 kJ/kg·K dalam bentuk kering, yang mempengaruhi kebutuhan energi untuk meningkatkan suhunya. Kandungan hemiselulosa yang paling tidak stabil secara termal dan mulai terurai pada suhu terendah (200-300°C) yang lebih bercabang dan lebih mudah putus, diikuti oleh selulosa polimer yang lebih terstruktur dan kristalin, sehingga terurai pada suhu yang sedikit lebih tinggi (300-400°C) dan lignin polimer yang sangat kompleks dan paling stabil secara termal, dekomposisinya terjadi pada suhu yang lebih luas atau lebih tinggi (>400°C).

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics adalah ilmu mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida. CFD memanfaatkan kemampuan komputasi komputer untuk menyelesaikan

persamaan matematika kompleks yang menggambarkan perilaku fluida, seperti persamaan Navier-Stokes, persamaan kontinuitas, dan persamaan energi.

Prinsip dasar CFD berawal dari membagi domain fluida menjadi elemen-elemen diskrit yang sangat kecil, proses yang disebut sebagai meshing atau grid generation. Pada setiap elemen ini, persamaan-persamaan diferensial yang mengatur aliran fluida diubah menjadi persamaan aljabar yang dapat diselesaikan secara numerik. Metode yang sering digunakan meliputi metode *finite difference*, *finite volume*, dan *finite element*.

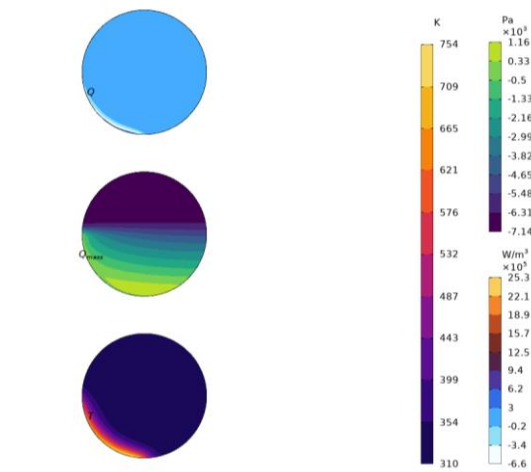
3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni-Oktober 2025 di laboratorium komputer Universitas Tidar Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah 56116 menggunakan *software comsol multiphysics 6.2. student version*. Metode pada penelitian ini menggunakan desain eksperimental. Penelitian ini akan menggunakan *software comsol multiphysics 6.2* dalam permodelan dengan parameter yang divariasikan yaitu temperatur suhu dan diameter kulit kopi. Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode teknik analisis data kualitatif. Data diperoleh dari pengujian nilai kalor, densitas dan viskositas, kemudian data dihitung dan disajikan dengan menggambarkan hasil data yang telah dikumpulkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk dibandingkan dengan sifat fisik *bio-oil*, *bio-char*, dan gas hasil *pyrolysis* dengan variasi suhu yang lain dan bahan bakar konvensional yang sudah ada.

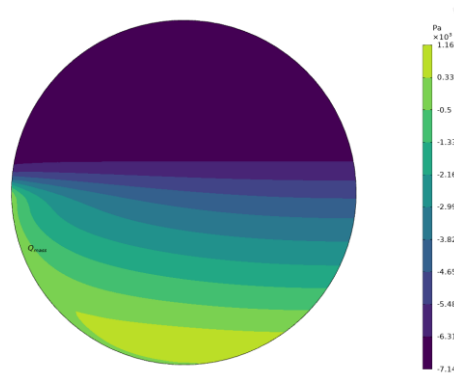
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Tekanan, Perpindahan Panas, Dan Temperatur Kulit Kopi

Hasil tekanan, perpindahan panas, dan temperatur kulit kopi pada suhu 600°C

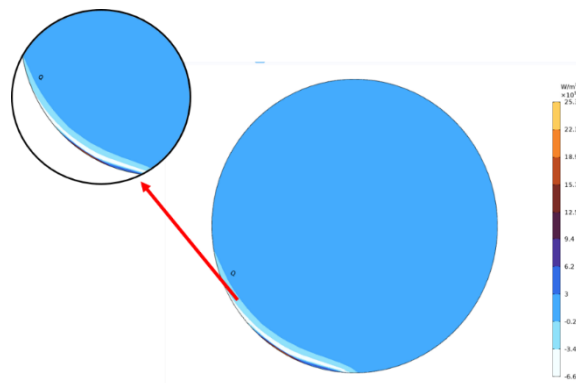


Gambar 1. hasil tekanan, perpindahan panas, dan temperatur suhu 600°C

Hasil tekanan pada suhu 600°C**Gambar 2.** hasil tekanan pada suhu 600°C

Hasil simulasi tekanan tertinggi terlihat pada bagian bawah dengan nilai sekitar 1,16 Pa yang ditandai dengan warna kuning hingga hijau. Hal ini menunjukkan bahwa pada bagian bawah reaktor terjadi pembentukan gas *pyrolysis* yang cukup intens selama proses pemanasan kulit kopi.

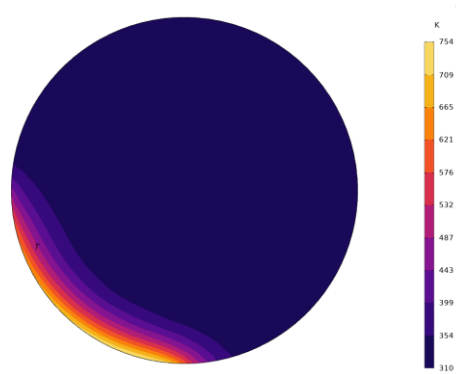
Tekanan menurun ke arah bagian tengah dan atas reaktor hingga mencapai nilai terendah sekitar $-7,14$ Pa yang ditandai dengan warna ungu tua. Perbedaan tekanan ini menyebabkan gas *pyrolysis* mengalir dari bagian bawah menuju bagian atas. Pola tekanan yang relatif merata pada bagian atas menunjukkan bahwa aliran gas berlangsung secara stabil dan tidak terjadi penumpukan gas yang berlebihan selama proses *pyrolysis* berlangsung.

Hasil perpindahan panas pada suhu 600°C**Gambar 3.** hasil perpindahan panas pada suhu 600°C

Hasil simulasi perpindahan panas menunjukkan proses *pyrolysis* kulit kopi berdasarkan skala warna yang ditampilkan, nilai perpindahan panas berada pada rentang sekitar $-4,6 \times 10^3$ W/m³ hingga $25,3 \times 10^3$ W/m³. Sebagian besar area di bagian dalam partikel didominasi warna biru dengan nilai relatif rendah, yaitu sekitar $-0,2 \times 10^3$ W/m³ hingga 3×10^3 W/m³, yang

menunjukkan bahwa panas belum menjalar secara efektif ke bagian inti. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses *pyrolysis* di bagian tengah kulit kopi masih terbatas dan belum berlangsung secara keseluruhan, akan tetapi perpindahan panas yang terjadi pada suhu 600°C terjadi secara lebih merata dibandingkan pada suhu 500°C.

Hasil temperature pada suhu 600°C

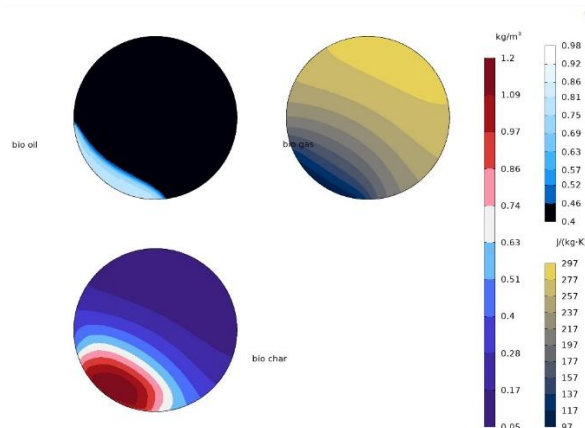


Gambar 4. hasil temperature pada suhu 600°C

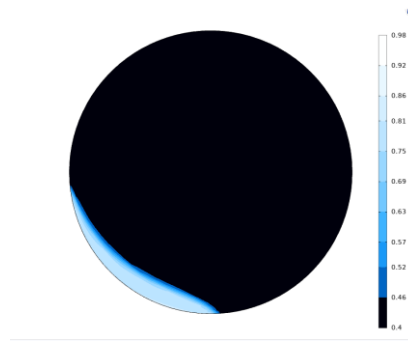
Hasil simulasi pada gambar menunjukkan distribusi temperatur pada partikel kulit kopi dengan rentang temperatur antara 310 K hingga 754 K. Sebagian besar volume partikel didominasi oleh warna biru tua, yang menunjukkan bahwa temperatur di bagian inti berada pada kisaran 310–399 K. Kondisi ini mengindikasikan bahwa panas belum sepenuhnya merambat ke bagian tengah partikel, sehingga reaksi *pyrolysis* di area inti masih cukup terbatas. Akan tetapi kondisi sebaran temperature terjadi pada suhu 600°C terjadi lebih merata dibandingkan suhu 500°C yang dibuktikan terlihatnya bagian gradien warna kuning hingga oren yang lebih luas.

Hasil Bio Oil, Biogas Dan Biochar Kulit Kopi

Hasil Bio Oil, Biogas Dan Biochar Pada Kulit Kopi Pada Suhu 600°C

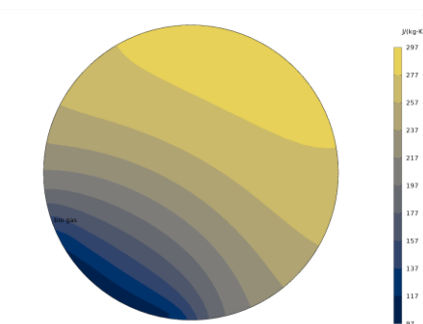


Gambar 5. hasil *bio-oil*, *biogas* dan *biochar* pada suhu 600 °C

Hasil bio-oil pada suhu 600 °C**Gambar 6.** hasil *bio-oil* pada suhu 600°C

Gambar 6 menunjukkan distribusi *bio-oil* hasil simulasi *fast pyrolysis* partikel tunggal kulit kopi pada suhu 600°C. Secara umum, terlihat bahwa zona pembentukan *bio-oil* masih muncul pada area tertentu di dalam partikel, terutama pada bagian bawah dan dekat permukaan, namun dengan luas dan intensitas yang lebih kecil dibandingkan kondisi suhu 500°C. Zona berwarna biru tua hingga biru muda dengan rentang nilai sekitar 0,46-0,92 menunjukkan area dengan konsentrasi *bio-oil* relatif lebih tinggi, yang mengindikasikan bahwa pada suhu 600°C proses devolatilisasi biomassa masih berlangsung secara aktif.

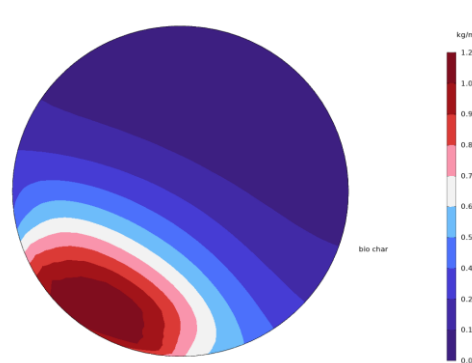
Senyawa volatil hasil dekomposisi selulosa dan hemiselulosa masih memiliki peluang untuk terkondensasi menjadi *bio-oil* sebelum mengalami reaksi lanjutan. Hal ini menjelaskan mengapa yield *bio-oil* pada suhu 600°C masih relatif tinggi dan tidak berbeda jauh dibandingkan dengan suhu 500°C. Namun demikian, dominasi warna hitam pada sebagian besar volume partikel menunjukkan bahwa peningkatan suhu mulai memperkuat terjadinya reaksi sekunder, seperti *cracking* dan *reforming*. Reaksi-reaksi ini menyebabkan sebagian fraksi *bio-oil* terurai lebih lanjut menjadi gas non-kondensabel, sehingga jumlah *bio-oil* yang terbentuk mengalami penurunan sedangkan jumlah *biogas* mengalami peningkatan akibat mulai terjadi reaksi *secondary cracking* (Sharma et al. 2015).

Hasil biogas pada suhu 600°C**Gambar 7.** hasil *biogas* pada suhu 600°C

Gambar 7 menunjukkan distribusi *biogas* hasil simulasi *fast pyrolysis* partikel tunggal kulit kopi pada suhu 600°C. Dibandingkan dengan kondisi suhu 500°C, distribusi *biogas* pada suhu 600°C menunjukkan peningkatan baik dari segi intensitas maupun luas area pembentukan gas. Zona dengan intensitas *biogas* tertinggi ditunjukkan oleh warna kuning hingga kuning cerah yang semakin meluas dengan nilai pada rentang 257-297 J/(kg.k) terutama pada bagian atas dan tengah partikel. Hal ini mengindikasikan bahwa pada suhu 600°C, proses devolatilisasi biomassa berlangsung lebih intensif, sehingga pembentukan gas non-kondensabel meningkat. Ketika suhu dinaikkan menjadi 600°C, terjadi peningkatan reaksi devolatilisasi yang menghasilkan fraksi gas sedikit lebih besar akibat mulai berlangsungnya reaksi *cracking*, akan tetapi reaksi yang terjadi belum maksimal karena untuk memperoleh hasil gas yang optimal diperlukan suhu >600°C (Akhtar and Saidina Amin 2012).

Pada bagian bawah partikel, meskipun masih terlihat zona dengan intensitas *biogas* yang lebih rendah yang ditandai dengan zona warna hitam hingga abu tua. luas area ini relatif menyempit dibandingkan suhu 500°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu membantu memperbaiki homogenitas pembentukan gas di dalam partikel, seiring dengan meningkatnya laju perpindahan panas dan difusi gas dari bagian dalam menuju permukaan partikel.

Hasil biochar pada suhu 600°C

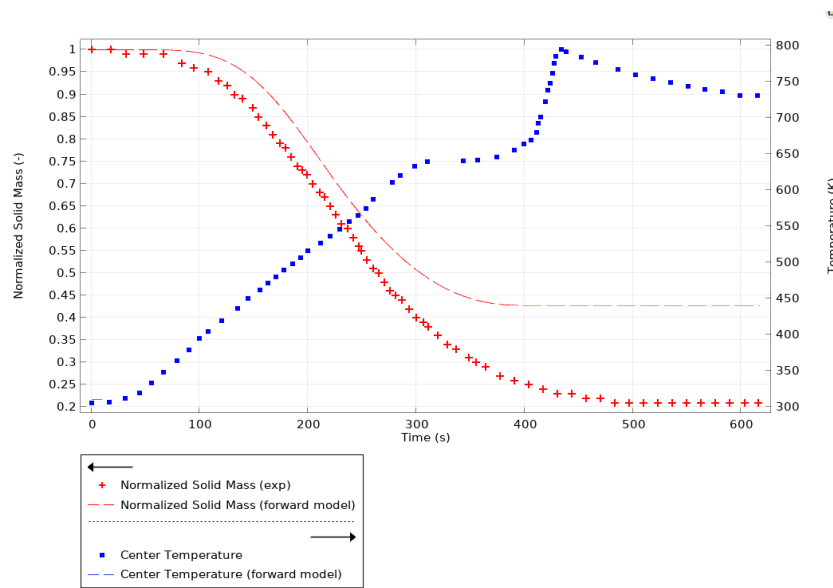


Gambar 8. hasil *biochar* pada suhu 600°C

Gambar 8 memperlihatkan distribusi densitas *biochar* pada proses *pyrolysis* partikel tunggal kulit kopi pada suhu 600°C. Kontur warna menunjukkan variasi densitas *biochar* dengan rentang nilai 0,05–1,20 kg/m³. Dibandingkan dengan kondisi suhu 500°C, terlihat adanya perubahan signifikan dari segi sebaran densitas *biochar* di dalam partikel. Zona dengan densitas *biochar* tertinggi masih ditunjukkan oleh warna merah hingga merah tua, namun luas area ini terlihat semakin menyempit dan terkonsentrasi di bagian tertentu dekat inti partikel.

Hal ini mengindikasikan bahwa pada suhu yang lebih tinggi, sebagian besar material biomassa telah mengalami dekomposisi yang lebih intensif yang mendorong pembentukan *bio-oil* dan *biogas*, sehingga massa padatan yang tersisa semakin berkurang (Afshar and Mofatteh 2024). Peningkatan suhu mempercepat pemutusan ikatan kimia pada komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang berkontribusi pada penurunan pembentukan *biochar*. Secara keseluruhan, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu *pyrolysis* dari 500°C menjadi 600 °C menyebabkan penurunan distribusi dan meningkatkan homogenitas densitas *biochar* di dalam partikel kulit kopi

Hasil Analisis Perubahan Massa Padatan dan Temperatur Pusat Partikel Selama Proses *Pyrolysis*



Gambar 9. perubahan massa padatan dan temperatur pusat partikel selama proses *pyrolysis*

Gambar 9 memperlihatkan hubungan antara waktu terhadap perubahan *normalized solid mass* dan suhu internal kulit kopi selama proses pemanasan/*pyrolysis*. Hubungan waktu dengan suhu internal kulit kopi berbanding lurus, sedangkan hubungan waktu dengan padatan kulit kopi berbanding terbalik.

Pada tahap awal pemanasan, temperatur pusat partikel meningkat secara bertahap, sementara nilai *normalized solid mass* masih relatif konstan dan mendekati satu. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada fase awal belum terjadi pelepasan zat volatil secara signifikan, sehingga massa padatan masih mendekati massa awal. Seiring bertambahnya waktu, kenaikan temperatur pusat partikel menjadi lebih cepat dan massa padatan atau arang semakin menurun. Penurunan *yield* arang disebabkan oleh meningkatnya dekomposisi primer biomassa, yang

menguraikan komponen penyusunnya menjadi fraksi gas ter-kondensasi dan gas tidak ter-kondensasi (Hasibuan and Pardede 2023).

Pada hasil simulasi ini grafik yang menunjukkan nilai massa padatan mengalami penurunan yang cukup signifikan terutama pada rentang waktu 100-400 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar komponen yang mudah terurai telah terlepas pada rentang waktu tersebut dan menyisakan struktur massa padatan yang lebih stabil pada waktu diatas 400 detik, sehingga laju penurunan massa padatan menjadi melambat dan cenderung stabil.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis *single particle* pada proses *fast pyrolysis* biomassa kulit kopi menggunakan reaktor *screw* dengan variasi suhu 500°C, 600°C, dan 700°C, dapat disimpulkan bahwa variasi suhu berpengaruh signifikan terhadap laju pemanasan partikel kulit kopi. Peningkatan suhu dari 500°C ke 600°C dan 700°C meningkatkan laju perpindahan panas serta mempercepat kenaikan temperatur partikel. Pada suhu 500°C, pemanasan masih terbatas pada permukaan partikel dan distribusi temperatur belum merata. Pada suhu 600°C, laju pemanasan meningkat dengan distribusi temperatur yang lebih merata, sedangkan pada suhu 700°C laju pemanasan paling tinggi, namun panas masih cenderung terkonsentrasi pada area tertentu sehingga pemanasan inti partikel belum sepenuhnya optimal. Selain itu, hasil simulasi CFD pada reaktor *screw* menunjukkan bahwa produksi gas hasil *fast pyrolysis* biomassa kulit kopi mencapai kondisi optimal pada suhu 700°C, yang ditandai dengan peningkatan signifikan pembentukan bio-gas dibandingkan suhu lainnya.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan simulasi *fast pyrolysis* menggunakan jenis biomassa yang lebih variatif sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan untuk menentukan biomassa yang lebih optimal serta mengetahui pengaruh waktu tinggal terhadap hasil *pyrolysis*. Selain itu, penelitian selanjutnya juga direkomendasikan untuk melakukan simulasi pada rentang suhu yang lebih tinggi dan variasi waktu tinggal yang lebih beragam guna memahami secara lebih mendalam pengaruh waktu tinggal terhadap hasil *pyrolysis*.

DAFTAR PUSTAKA

- Afshar, M., & Mofatteh, S. (2024). Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering*, 23, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102433>
- Akhtar, J., & Amin, N. S. A. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5101–5109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.033>
- Altıkat, A., Alma, M. H., Altıkat, A., Bilgili, M. E., & Altıkat, S. (2024). A comprehensive study of biochar yield and quality concerning pyrolysis conditions: A multifaceted approach. *Sustainability*, 16(2), 937. <https://doi.org/10.3390/su16020937>
- Boateng, A. A. (2020). *Pyrolysis of biomass for fuels and chemicals*. Elsevier Science & Technology.
- Campuzano, F., Brown, R. C., & Martínez, J. D. (2019). Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 372–409. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014>
- Chen, T., Ku, X., Lin, J., & Ström, H. (2020). CFD-DEM simulation of biomass pyrolysis in fluidized-bed reactor with a multistep kinetic scheme. *Energies*, 13(20), 5358. <https://doi.org/10.3390/en13205358>
- Hasibuan, R., & Pardede, H. M. (2023). Pengaruh suhu dan waktu pirolisis terhadap karakteristik arang dari tempurung kelapa. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 12(1), 46–53. <https://doi.org/10.32734/jtk.v12i1.8534>
- Lachos-Perez, D., Martins-Vieira, J. C., Missau, J., et al. (2023). Review on biomass pyrolysis with a focus on bio-oil upgrading techniques. *Analytica*, 4(2), 182–205. <https://doi.org/10.3390/analytica4020015>
- Ramadhan, F., Syuriadi, A., & Sukandi, A. (2024). *Pengaruh variasi suhu dan berat biomassa terhadap yield dan kualitas bio-oil menggunakan biomassa sekam padi pada proses pirolisis*.
- Ranganathan, P., & Gu, S. (2016). Computational fluid dynamics modelling of biomass fast pyrolysis in fluidised bed reactors, focusing different kinetic schemes. *Bioresource Technology*, 213, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.042>
- Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081–1096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193>
- Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>

- Valizadeh, S., Younesi, H., & Bahramifar, N. (2018). Preparation and characterization of activated carbon from the cones of Iranian pine trees (*Pinus eldarica*) by chemical activation with H₃PO₄ and its application for removal of sodium dodecylbenzene sulfonate from aqueous solution. *Water Conservation Science and Engineering*, 3(4), 253–265. <https://doi.org/10.1007/s41101-018-0055-5>
- Wang, L., Liu, Y., & Chen, H. (2020). Single particle model for biomass pyrolysis using computational fluid dynamics approach. *Fuel*, 176–185.
- Yu, X., Hassan, M., Ocone, R., & Makkawi, Y. (2015). A CFD study of biomass pyrolysis in a downer reactor equipped with a novel gas-solid separator—II thermochemical performance and products. *Fuel Processing Technology*, 133, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.002>