

ANALISIS UNJUK KINERJA REAKTOR HIDROTERMAL DALAM PROSES TOREFAKSI AMPAS BUBUK KOPI DENGAN SIMULASI DINAMIKA FLUIDA KOMPUTASI

Budi Santoso¹, Agino Hervi², Wildan Zulfansyah³, Paisal Tanjung⁴

¹ Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Corresponding author: budisantosokimia@unsri.ac.id

ABSTRAK: Unjuk kinerja reaktor yang terjadi proses termokimia dapat dianalisis dengan menggunakan kajian eksperimental maupun simulasi. Pada penelitian ini analisis unjuk kinerja Reaktor Hidrotermal untuk proses torefaksi telah dilakukan dengan metode Dinamika Fluida Komputasi dengan piranti lunak *COMSOL ver 5.5*. Dalam penelitian ini digunakan reaktor Hidrotermal berbentuk tabung dengan panjang 16 cm dan diameter 6 cm. Reaksi hidrotermal berlangsung pada temperatur 453 K dan tekanan *autogeneous* mencapai 30 bar. Proses reaksi hidrotermal untuk mendapatkan hasil torefaksi berlangsung selama 18 jam. Dari hasil eksperimen didapatkan hasil bahwa terjadi kebocoran reaktor di salah satu tabung. Selanjutnya dilakukan analisis unjuk kinerja reaktor dengan simulasi menggunakan pendekatan kondisi tak tunak (*unsteady state*) dengan model reaktor dalam 2 dimensi, 2 dimensi Aksisimetri, dan 3 dimensi. Perpindahan panas yang terjadi diasumsikan terjadi secara konduksi karena isi dalam reaktor Hidrotermal berupa padatan (*solid state*). Dari hasil simulasi dengan pendekatan 2 dimensi didapatkan bahwa kebocoran reaktor disebabkan oleh perpindahan panas yang tidak merata yang terjadi selama proses hidrotermal. Kebocoran reaktor mulai berlangsung saat reaksi mulai berjalan 1 jam. Area yang mengalami *hotspot* didalam reaktor mencapai 40% dari luas penampang reaktor sehingga terjadinya kebocoran reaktor berada di sudut tabung. Untuk pendekatan 2 dimensi aksisimetri didapatkan hasil bahwa terjadi 2 area *hotspot* saat reaksi hidrotermal berlangsung pada 4 jam waktu reaksi. Sedangkan untuk pendekatan 3 dimensi didapatkan hasil bahwa *hotspot* mulai terjadi pada saat reaksi berlangsung 1 jam dan saat 10 jam reaksi distribusi panas tersebar merata tetapi mulai terjadi *hotspot* lagi di salah satu sisi reaktor mulai reaksi 11 jam sampai 18 jam. Dari ketiga pendekatan yang dilakukan dalam penelitian setelah di sinkronisasi dengan hasil eksperimen yang paling mendekati adalah analisis dengan pendekatan 3 dimensi.

Kata kunci: Hidrotermal, torefaksi, reaktor, simulasi, dinamika fluida komputasi

ABSTRACT: The performance of reactors in which thermochemical processes occur can be analyzed using experimental studies and simulations. In this research, performance analysis of the Hydrothermal Reactor for the torrefaction process was carried out using the Computational Fluid Dynamics method with *COMSOL ver 5.5* software. In this research, a tubular hydrothermal reactor with a length of 16 cm and a diameter of 6 cm was used. The hydrothermal reaction takes place at a temperature of 453 K and *autogeneous* pressure reaches 30 bar. The hydrothermal reaction process to obtain the torrefaction results lasts for 18 hours. From the experimental results, it was found that there was a reactor leak in one of the tubes. Next, an analysis of the reactor performance was carried out by simulation using an *unsteady state* approach with a reactor model in 2 dimensions, 2 axisymmetric dimensions and 3 dimensions. The heat transfer that occurs is assumed to occur by conduction because the contents of the hydrothermal reactor are *solid state*. From the simulation results using a 2-dimensional approach, it was found that the reactor leak was caused by uneven heat transfer that occurred during the hydrothermal process. The reactor leak began to occur when the reaction started to run 1 hour. The area experiencing a *hotspot* in the reactor reaches 40% of the cross-sectional area of the reactor so that the reactor leak occurs in the corner of the tube. For the 2-dimensional axisymmetric approach, the results showed that 2 *hotspot* areas occurred when the hydrothermal reaction took place in 4 hours of reaction time. Meanwhile, for the 3-dimensional approach, the results showed that *hotspots* began to occur when the reaction lasted 1 hour and at 10 hours of reaction the heat distribution was evenly distributed but *hotspots* began to occur again on one side of the reactant from 11 hours to 18 hours of reaction.

After approaches with 3 methods that was taken in research after synchronizing with experimental results, the closest is analysis using a 3-dimensional approach.

Key words: Hydrothermal, Torrefaction, Reactor, Simulation, Computational fluid dynamics

PENDAHULUAN

Reaksi pirolisis dan torefaksi didasarkan pada dekomposisi termal langsung bahan organik dalam atmosfer inert untuk memperoleh berbagai bahan bakar, pelarut, bahan kimia, dan produk lain dari bahan baku biomassa. Karbonisasi hidrotermal (HydroThermal Conversion), juga dikenal sebagai torefaksi basah, mengubah bahan organik menjadi produk dengan struktur karbon terkondensasi dengan adanya air pada kisaran suhu antara 180 dan 350 °C dan tekanan dari 2 hingga 10 MPa [8]. (J. González-Arias dkk, 2022).

Reaksi Hidrotermal mencapai keadaan tunak (*steady state*) setelah melewati proses tak tunak (*unsteady state*) selama 18 jam (Halil Durak, 2020) . Dalam reaksi ini terjadi perpindahan panas yang melibatkan berbagai variabel perpindahan panas seperti sifat fisik bahan , konduktivitas termal, panas spesifik, densitas bahan (Fatemeh Shariatmadar Tehrani dkk, 2020).

Konsiderasi proses termokimia dalam reaktor hidrotermal adalah waktu reaksi yang berdampak pada kinerja reaktor . Salah satu kinerja reaktor hidrotermal yang banyak disorot adalah faktor kebocoran reaktor (Amr F.M. Ibrahim, 2020) . Hal ini disebabkan karena reaksi berlangsung pada temperatur dan tekanan yang tinggi.

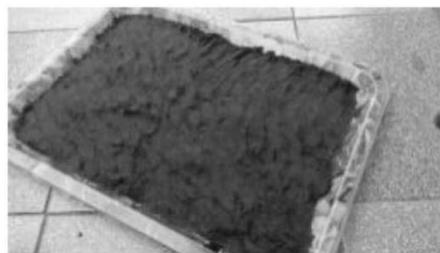
Reaktor untuk proses konversi hidrotermal didesain berbentuk tabung dengan pertimbangan kemudahan pemasukan bahan baku dan pengeluaran produk. Unit reaktor kemudian dirancang cukup kecil dengan diameter untuk membatasi perpanjangan profile temperatur arah radial, sehingga mempertimbangkan laju proses hampir seragam sepanjang jari-jari reaktor. Asumsi perpindahan panas secara aksial yang tidak seragam dari fraksi padatan dan densitas serta temperatur karena tidak adanya pencampuran (L. Zaccariello, 2022) .

Pada penelitian ini menggunakan reaktor jenis tabung dengan desain dimensi panjang reaktor 16 cm dan diameter 6 cm. Di kedua sisi reaktor diberi penutup dengan model ulir (*screw*) . Material Reaktor adalah Baja galvanis dengan tebal 5 mm. Proses Termokimia berlangsung dengan metode Hidrotermal selama 18 jam didalam oven dengan temperatur 180°C.



Gambar 1 Desain Reaktor Hidrotermal

Material yang dimasukkan dalam Reaktor adalah Ampas Bubuk kopi dengan sifat antara lain ; Densitas 612 kg/m³ (Massaro Sousa , 2019) , Kapasitas Panas Spesifik 1400 J/kgK (Sae Byul Kang, dkk, 2017) dan Konduktivitas Termal 0,054 W/mK (Ismail Ismail dkk , 2023)



Gambar 2 Ampas Bubuk Kopi (detikfood, 2021)

Setelah proses hidrotermal berlangsung selama 18 jam terdapat kebocoran produk torefaksi yang keluar dari sisi reaktor.



Gambar 3 Visualisasi Kebocoran Reaktor



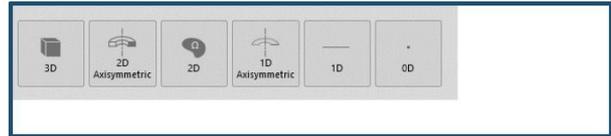
Gambar 4. Metode Isolasi Termal dan Tekanan dalam Reaktor

Reaktor dalam penelitian ini menggunakan *Sealant Gasket High Temperature* dan *Gas Seal Tape merk Onda* serta ditutup dengan *Aluminium Foil*. Isolasi termal untuk ketiga jenis material ini diabaikan dalam penelitian ini karena pertimbangan terbatasnya data yang ada.

Dari hasil eksperimen ini akan dilakukan analisis unjuk kinerja reaktor dengan simulasi Dinamika Fluida Komputasi menggunakan COMSOL ver 5.0 sebagai perangkat lunak. Pemilihan COMSOL sebagai perangkat lunak karena aplikasi ini menggunakan data memori komputer yang rendah, penggunaan kapasitas penyimpanan yang tidak terlalu besar, dan waktu iterasi yang tidak terlalu lama, disamping itu COMSOL ver 5.0 juga cocok digunakan untuk skala dan kepentingan akademik. Comsol Multiphysics, sebagai paket perangkat lunak komersial, menyediakan lingkungan yang ramah pengguna untuk menyelidiki berbagai fenomena fisik. Berbagai modul tertanam mencakup berbagai analisis fisik. Persamaan dalam COMSOL dirancang untuk diselesaikan dengan menggunakan metode Elemen Hingga (*Finite Element*). Sejumlah penelitian menggunakan COMSOL telah menunjukkan kemampuannya untuk memberikan hasil yang dapat diandalkan (Mohammad Vajdi, 2020) .

METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian dimulai Penelitian ini menggunakan pendekatan batasan analisa 2 dimensi, 2 dimensi aksis simetri dan 3 dimensi



Gambar 4. Pemilihan kondisi batas pendekatan dimensi objek simulasi (Sumber : visual COMSOL 5.5)

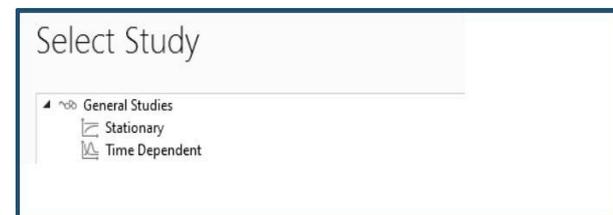
Pola pendekatan yang berbeda digunakan untuk dengan melihat perbedaan fenomena kebocoran reaktor dari sudut pandang masing masing kondisi batas.

Setelah itu dilanjutkan dengan pemilihan analisis fenomena perpindahan. Dengan mengasumsikan bahwa proses hidrotermal ini adalah proses diam (batch) maka fenomena perpindahan panas terjadi antara temperatur alam oven pemanas secara konveksi dan terjadi perpindahan panas secara konduksi antara atom karbon dalam ampas bubuk kopi. Dalam penelitian ini fenomena perpindahan massa dan momentum dapat diabaikan. Karena tidak ada aliran fluida didalam reaktor.



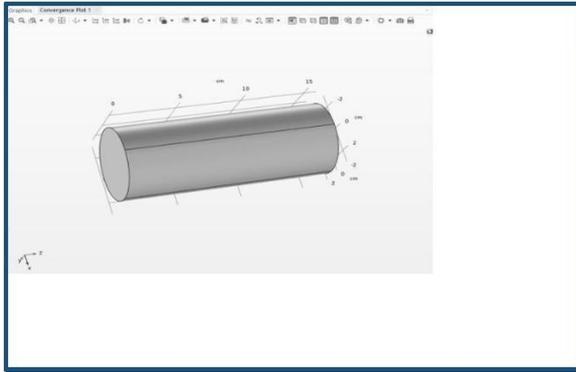
Gambar 5. Pemilihan jenis analisis fenomena (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Kemudian tahapan selanjutnya adalah memilih kondisi waktu analisis. Yaitu steady state atau unsteady state



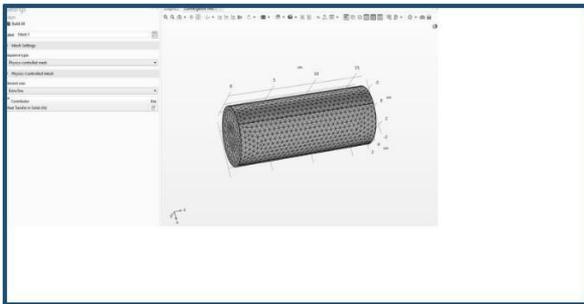
Gambar 6. Pemilihan batasa waktu (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Selanjutnya adalah menggambar geometri reaktor Hidrotermal didalam Perangkat Lunak



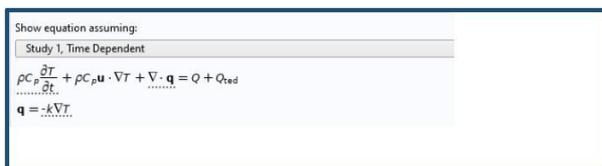
Gambar 7. Pembuatan Geometri Reaktor (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Setelah itu menentukan *meshing* untuk model reaktor Hidrothermal. Meshing adalah proses diskritisasi domain fluida yang kontinu menjadi domain komputasi yang diskrit



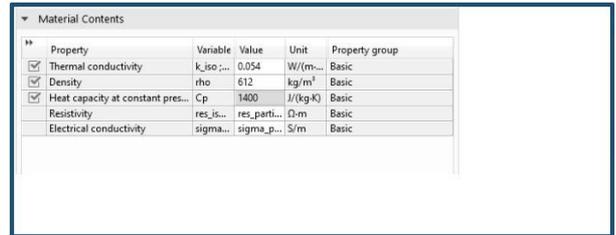
Gambar 8. Pemilihan Meshing (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Dalam penelitian ini dipilih Formula Perpindahan Panas secara Konduksi sehingga penggunaan rumus dalam COMSOL



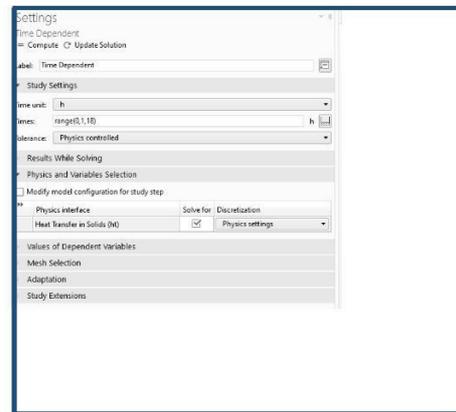
Gambar 9. Asumsi Rumus Perpindahan panas dalam Reaktor (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Tahap berikutnya adalah memasukkan sifat-sifat material yang akan dianalisis kedalam perangkat lunak



Gambar 10. Input data sifat material (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Informasi penentuan lamanya waktu untuk reaksi hidrothermal juga dimasukkan dalam perangkat lunak



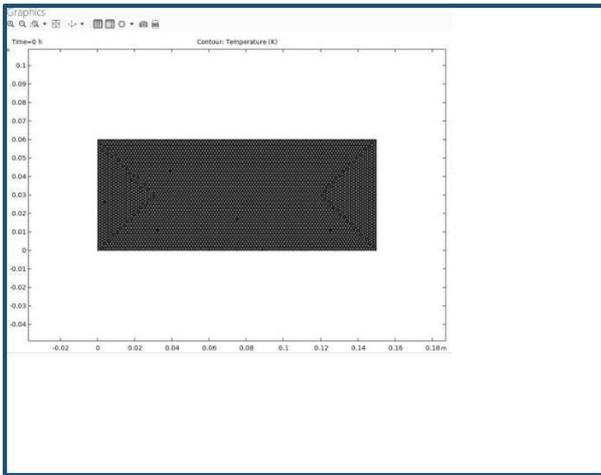
Gambar 11. Asumsi kondisi batas waktu reaksi (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Setelah semua data dan asumsi dimasukkan secara lengkap dan detail sesuai dengan permintaan perangkat lunak maka program dijalankan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

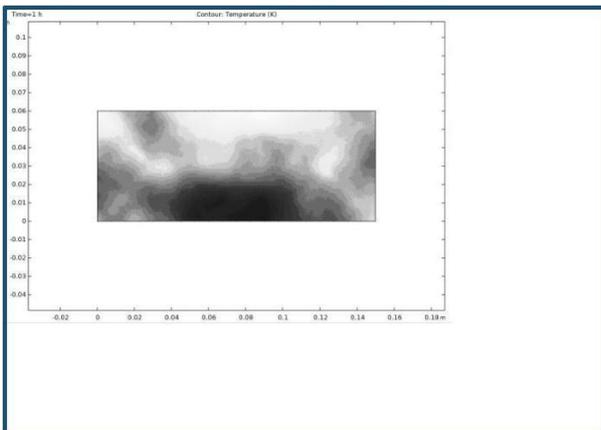
Hasil Simulasi Pendekatan 2 Dimensi

Pada simulasi menggunakan pendekatan 2 dimensi waktu iterasi menjalankan perhitungan memerlukan 9 detik untuk menuju tahap konvergen. Dari Simulasi didapatkan hasil bahwa untuk permulaan reaksi yang diawali pada t0= 0 jam didapatkan bahwa profil perpindahan panas dalam reaktor belum terjadi.



Gambar 12. Visualisasi kondisi reaktor saat $t_0 = 0$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

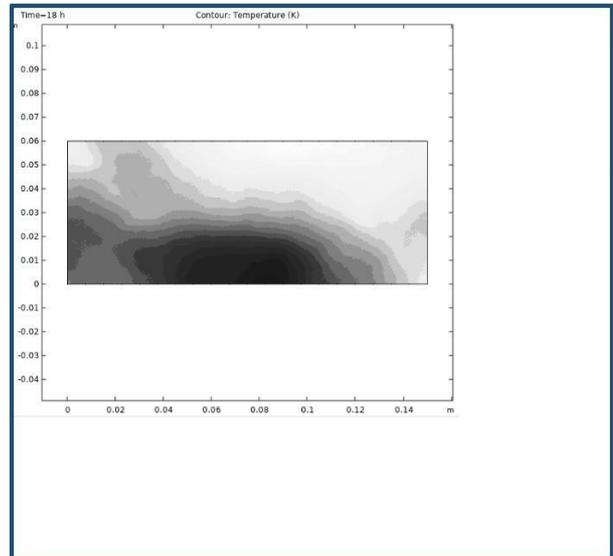
Pada 1 jam berikutnya terlihat kontur distribusi temperatur mulai berubah. Ini menandakan sudah terjadinya reaksi hidrotermal dalam reaktor. Terlihat bahwa mulai adanya *hotspot* (titik panas) yang berwarna gelap akibat dari perbedaan lama distribusi perpindahan panas dari sumber panas peralatan Oven.



Gambar 13. Visualisasi kondisi reaktor saat $t_1 = 1$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Titik panas ini akan mempengaruhi kecepatan reaksi hidrotermal untuk mencapai keadaan tunak (*steady state*) (Chengzeng Yan dkk 2021)

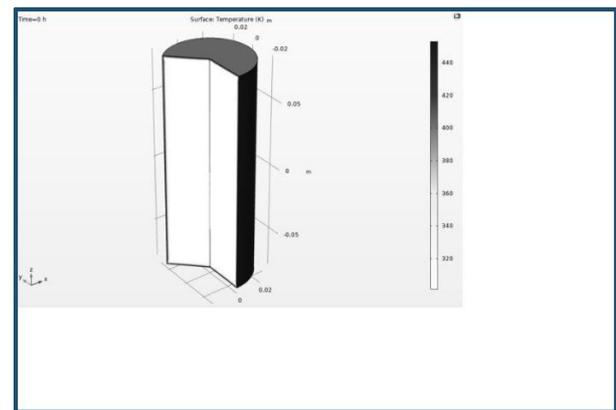
Pada keadaan tunak saat reaksi 18 jam kontur *hotspot* dalam reaktor berkisar 40% dari total luas penampang. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi perpindahan panas masih tidak terjadi secara merata yang akan mengakibatkan kebocoran pada reaktor terutama daerah hotspot pada reaktor.



Gambar 14. Visualisasi kondisi reaktor saat $t_{18} = 18$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Hasil Simulasi Pendekatan 2 Dimensi Aksissimetri

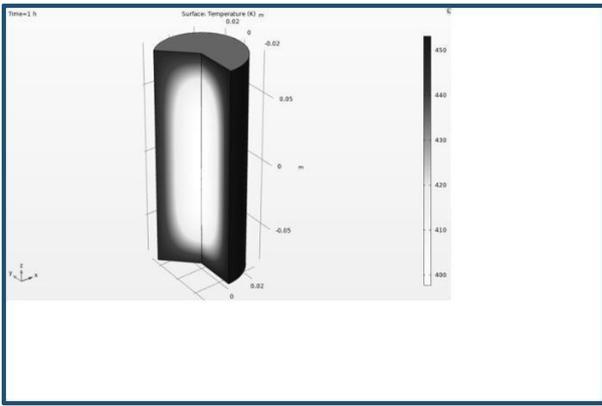
Pada simulasi menggunakan pendekatan 2 dimensi aksisimetri waktu iterasi menjalankan perhitungan memerlukan 6 detik untuk menuju tahap konvergen. Dari Simulasi didapatkan hasil bahwa untuk permulaan reaksi yang diawali pada $t_0 = 0$ jam didapatkan bahwa profil perpindahan panas terjadi di bagian luar reaktor dan panas belum masuk kedalam reaktor



Gambar 14. Visualisasi kondisi reaktor 2 D aksisimetri saat $t_0 = 0$ jam

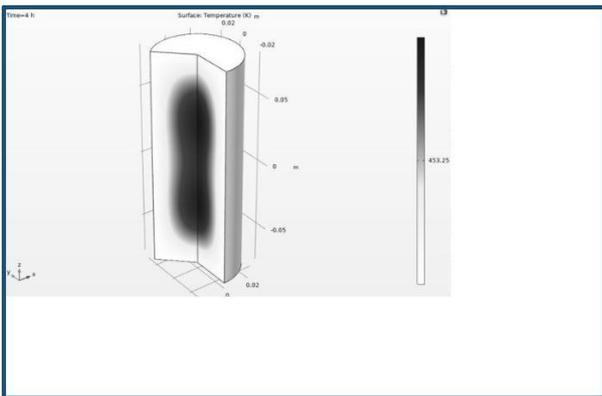
(Sumber : visual COMSOL 5.5)

Pada waktu reaksi $t_1 = 1$ jam . Terlihat bahwa reaktor telah mengalami perubahan dan kenaikan temperatur di luar dan didalam reaktor. Untuk diluar reaktor kisaran temperatur 440 sampai 453 K sedangkan didalam reaktor masih di temperatur 400 K.



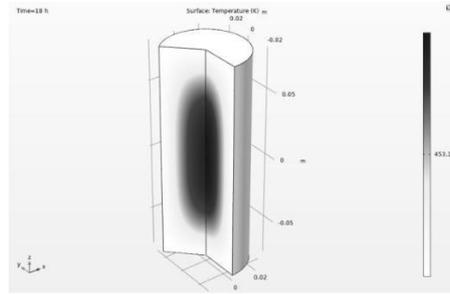
Gambar 15. Visualisasi kondisi reaktor 2 D aksisimetri saat $t_1 = 1$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Pada saat reaksi pada $t_4 = 4$ jam didapatkan bahwa profil perpindahan panas terjadi di bagian bagian reaktor dan ada sebagian panas yang masih terlokalisir dikedua sisi reaktor. Temperatur Reaktor secara keseluruhan telah mencapai 453 K . Fenomena ini disebabkan oleh model matematika sebagai lapisan silinder konsentris dengan sifat termal stasioner dan suhu-independen. Karena penelitian ini mengabaikan pengisi konduktif termal tipis ($\sim 10^{-4}$ m), diasumsikan bahwa permukaan permukaan pipa memiliki kontak langsung dengan ampas bubuk kopi. Selanjutnya, diasumsikan bahwa distribusi temperatur dalam elemen-elemen modul hanya bergantung pada dua variabel mengacu pada ketebalan pipa reaktor dan sepanjang arah aliran kartesian Z (Sylwia Hozejowska, 2020)



Gambar 16. Visualisasi kondisi reaktor 2 D aksisimetri saat $t_4 = 4$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Pada waktu reaksi $t_{18} = 18$ jam . Terlihat bahwa reaktor tempaeratur reaktor 453 K dan masih terdapat hotspot yang mengindikasikan distribusi perpindahan panas belum sepenuhnya tersebar sampai kedalam ampas bubuk kopi.



Gambar 17. Visualisasi kondisi reaktor 2 D aksisimetri saat $t_{18} = 18$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

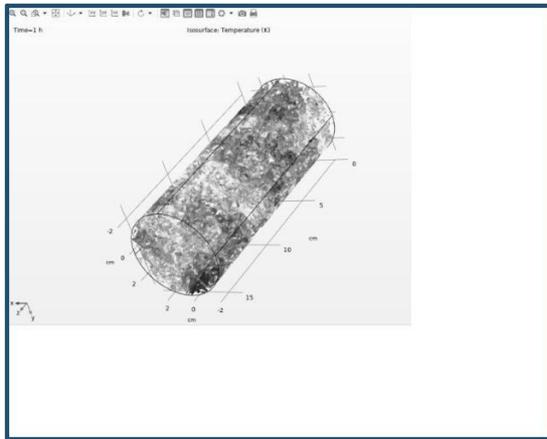
Hasil Simulasi Pendekatan 3 Dimensi

Pada simulasi menggunakan pendekatan 3 dimensi waktu iterasi menjalankan perhitungan memerlukan 22 detik untuk menuju tahap konvergen. Dari Simulasi didapatkan hasil bahwa untuk permulaan reaksi yang diawali pada $t_0 = 0$ jam didapatkan bahwa profil perpindahan panas belum masuk kedalam reaktor. Ini terlihat pada gambar visual dari COMSOL 5.5 yang masih berwarna merah dan sedikit berwarna kuning tanda telah terjadinya pemanasan didalam reaktor.



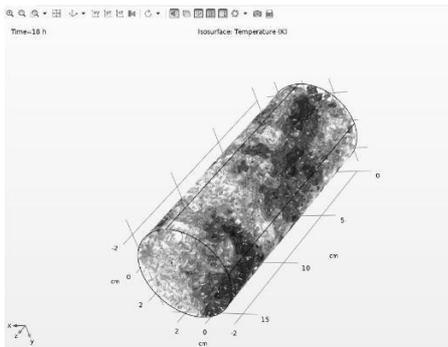
Gambar 18. Visualisasi kondisi reaktor 3D saat $t_0 = 0$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Pada waktu reaksi $t_1 = 1$ jam . Terlihat bahwa reaktor telah mengalami kenaikan temperatur didalam reaktor. Hal ini dapat terlihat dari perbedaan warna termal dari dalam reaktor. Pada reaksi berlangsung 1 jam sudah mulai terlihat hotspot didalam reaktor disisi bagian bawah reaktor.

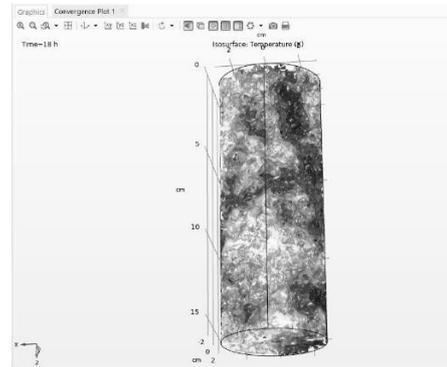


Gambar 19. Visualisasi kondisi reaktor 3D saat $t_1 = 1$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)

Pada waktu reaksi $t_{18} = 18$ jam. Terlihat bahwa kondisi perpindahan panas reaktor belum merata walaupun temperatur telah stabil di 453 K. Ditemukan bahwa profil Temperatur dan konduktivitas termal dalam model 3 dimensi mirip dengan yang ada di model 2 dimensi. Selain itu, fungsi eksponensial konduktivitas termal bertingkat juga digunakan agar sesuai dengan data numerik dalam perangkat lunak. Oleh karena itu, konduktivitas termal bertingkat dapat muncul dalam sistem hotspot homogen 2D dan 3D dengan ukuran makroskopik tetap (Chuang Zhang dkk, 2022).



Gambar 20. Visualisasi kondisi reaktor 3D saat $t_{18} = 18$ jam (Sumber : visual COMSOL 5.5)



Gambar 21. Visualisasi daerah sebaran hotspot dalam reaktor Hidrotermal (warna merah) (Sumber : visual COMSOL 5.5)

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

1. Berdasarkan pendekatan model 2 dimensi terjadi hotspot di sebagian penampang luas permukaan reaktor dari waktu 1 jam reaktor sampai kondisi reaksi steady state di temperatur 453 K.
2. Berdasarkan pendekatan model 2 dimensi aksisimetri dapat diketahui bahwa temperatur reaksi mencapai keadaan tunak pada waktu reaksi 4 jam, tetapi masih mengalami distribusi perpindahan panas tidak merata.
3. Berdasarkan pendekatan model 3 dimensi dapat diketahui bahwa sebaran hotspot didalam reaktor berada di daerah sisi kanan dan kiri reaktor. Ini sesuai dengan fakta hasil eksperimen area kebocoran reaktor terletak di sisi kanan dan kiri reaktor.
4. Pendekatan model 2 dimensi dan model 3 dimensi menghasilkan kontur profil sebaran *hotspot* yang hampir sama pada setiap keadaan waktu reaksi hingga mencapai keadaan tunak

Rekomendasi

Berdasarkan hasil simulasi , direkomendasikan untuk menggunakan pendekatan model 3 dimensi untuk mendapatkan hasil yang dapat sinkron dengan hasil eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

Amr F.M. Ibrahima,et. al , 2020. Pyrolysis of hydrothermal liquefaction algal biochar for hydrogen

- production in a membrane reactor, Fuel 265 116935, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116935>, Elsevier
- Chengzeng Yan, Yu Yang, Gang Wang, 2021. A new 2D continuous-discontinuous heat conduction model for modeling heat transfer and thermal cracking in quasi-brittle materials, Computers and Geotechnics, Volume 137, 2021, 104231, ISSN 0266-352X
- Chuang Zhang et. al , 2020. Graded thermal conductivity in 2D and 3D homogeneous hotspot Systems Materials Today Physics, <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100605>
- Fatemeh Shariatmadar Tehrani, et. al, 2020. Hydrothermal synthesis and characterization of WO₃ nanostructures: Effect of reaction time, Mater. Res. Express 7 IOP Publishing DOI 10.1088/2053-1591
- Halil Durak, Salih Genel, 2020. Catalytic hydrothermal liquefaction of *lactuca scariola* with a heterogeneouscatalyst: The investigation of temperature, reaction time and synergistic effect of catalysts, Bioresource Technology 309 123375, Elsevier.
- J. González-Arias et. Al (2022). Insights into the product quality and energy requirements for solid biofuel production: A comparison of hydrothermal carbonization, pyrolysis and torrefaction of olive tree pruning, Energy, Volume 238, Part C, 2022, 122022, ISSN 0360-5442.
- L. Massaro Sousa, M.C. Ferreira, 2019. Densification behavior of dry spent coffee ground powders: Experimental analysis and predictive methods, Powder Technology 357 (2019) 149–157, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.069>
- L. Zaccariello, et.al , 2020. Hydrothermal Carbonization: A Pilot-Scale Reactor Design for Bio-waste and Sludge Pre-treatment, Waste and Biomass Valorization (2022) 13:3865–3876 <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01859-x>
- Mohammad Vajdi et. al , 2020. A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics, Journal of Composites and Compounds 2 35-43 , Elsevier <https://doi.org/10.29252/jcc.2.1.5>
- Sae Byul Kang, et.al, 2017. Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5kW), Renewable Energy DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.092
- Sylwia Hozejowska and Magdalena Piasecka, 2020. Numerical Solution of Axisymmetric Inverse Heat Conduction Problem by the Tre tz Method, Energies 2020, 13, 705; doi:10.3390/en13030705