



dapat diakses melalui <http://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmuo>



Simulasi Optimasi Suhu dari Sistem Pemanasan Temperatur Tinggi Berbasis Gelombang Mikro

Fingken Stevanus Sagai^{a*}, Dolfie Paulus Pandara^{a*}, Hesky Stevy Kolibu^{a*}, Seni Herlina Juita Tongkukut^a, Ferdy^a, Gerald Hendrik Tamuntuan^a, Gilbert Abidjulu^a, Verna Albert Suoth^a

^aJurusan/Prodi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Sam Ratulangi

KATA KUNCI

Optimasi
Suhu Tungku
Oven Gelombang Mikro
COMSOL *Multiphysics*

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian simulasi untuk menganalisis pengaruh variasi dimensi geometri tungku, daya oven gelombang mikro dan waktu pemanasan terhadap suhu tungku, dan mengoptimasi suhu tungku dalam pemanasan dengan gelombang mikro dari variasi parameter yang digunakan. Tungku yang terbuat dari material Silikon Karbida (SiC) divariasikan dari segi bentuk dan ukuran untuk dipanaskan dalam oven gelombang mikro pada daya 100%, 75% dan 50% dari daya maksimum 1,3 kW. Pemanasan tungku ini disimulasikan menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*. Hasil simulasi dari setiap parameter dilakukan analisis dan optimasi untuk mencapai suhu optimum 500°C dalam waktu yang singkat dengan konsumsi energinya yang rendah. Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi parameter memengaruhi suhu yang dihasilkan tungku dan distribusi suhu di dalam tungku. Optimasi pada tungku kubus tipe II (panjang sisi 70 mm) yang dipanaskan dalam oven gelombang mikro dengan daya 1,3 kW (100%) mencapai suhu optimum 500°C dalam waktu relatif singkat sebesar 7 menit 33 detik (453 detik) dan konsumsi energi relatif rendah sebesar $5,889 \times 10^5$ J.

KEYWORDS

Optimization
Furnace Temperature
Microwave Oven
COMSOL *Multiphysics*

ABSTRACT

Simulation research has been conducted to analyze the effect of variations in the dimensions of the furnace geometry, microwave oven power and heating time on the furnace temperature, and optimize the furnace temperature in the microwave heating from a variety of parameters used. Furnaces made of Silicon Carbide (SiC) are varied in terms of shape and size to be heated in a microwave oven at 100%, 75% and 50% of the maximum power of 1.3 kW. The heating of this furnace was simulated using COMSOL *Multiphysics* software. The simulation results for each parameter are analyzed and optimized to achieve the optimum furnace temperature of 500°C in a short time with low energy consumption. The simulation results obtained show that the parameter variations affect the temperature produced by the furnace and the temperature distribution in the furnace. Optimization of the type II cube furnace (side length 70 mm) heated in a microwave oven with a power of 1,3 kW (100%) reaches the optimum temperature of 500°C in a relatively short time of 7 minutes 33 seconds (453 seconds) and relatively low energy consumption of $5,889 \times 10^5$ J.

TERSEDIA ONLINE

01 Februari 2022

Pendahuluan

Gelombang mikro merupakan salah satu spektrum elektromagnetik dengan rentang frekuensi 0,3 GHz – 300 GHz dan panjang gelombang 1 mm – 1 m (Griffiths, 2017). Panas yang dihasilkan dari interaksi gelombang

mikro dengan material menjadi poin penting dalam pemanfaatan gelombang mikro untuk berbagai keperluan industri. Frekuensi gelombang mikro yang tinggi mengakibatkan molekul-molekul dalam bahan bergerak dengan cepat dan saling bergesek sehingga

*Corresponding author:

Email address: sfingken@gmail.com

Published by FMIPA UNSRAT (2022)

terjadi akumulasi panas (Hakim *et al.*, 2020). Pemanasan dengan gelombang mikro sangat menguntungkan dengan sifat pemanasannya yang cepat, mudah dikontrol, ekonomis serta lebih ramah lingkungan. Pemanasan gelombang mikro ini berpotensi untuk diaplikasikan dalam proses pengolahan logam dan material (Chandrasekaran *et al.*, 2012) menggantikan metode pemanasan konvensional yang memerlukan biaya bahan bakar tinggi, proses pemanasan yang jauh lebih lama, energi yang dihasilkan kecil (Muley *et al.*, 2019) serta menghasilkan limbah (Datta dan Rakesh, 2013).

Pemanasan gelombang mikro merupakan peristiwa multifisika yang melibatkan gelombang elektromagnetik dan perpindahan panas (Wang *et al.*, 2019) dan telah terapan di dalam oven gelombang mikro (*Microwave Oven: MWO*) domestik. Pemanasan di dalam MWO tidak terjadi karena gradien temperatur tetapi terjadi melalui perambatan gelombang elektromagnetik yang diarahkan ke ruang pemanas (Permatasari *et al.*, 2015). Derajat panas yang dapat dicapai dalam MWO domestik hanya untuk keperluan rumah tangga seperti memanaskan makanan. Suhu optimum yang dihasilkan MWO domestik tidak mendukung untuk pemrosesan material yang memerlukan suhu lebih dari 500°C (Mishra dan Sharma, 2016), sehingga perlu dilakukan modifikasi pada MWO dengan menambahkan tungku pemanas. Tungku yang ditambahkan tersebut berfungsi untuk mengisolasi panas ke dalam rongga tungku dan memfokuskan panas yang dibangkitkan oleh interaksi antara material tungku dan gelombang mikro sehingga suhu dalam rongga meningkat dan mencapai suhu tinggi (Syarif, 2020). Penambahan tungku dalam MWO dapat memanaskan material alam ilmenite pada suhu yang tinggi (Srikant *et al.*, 2013), memperbaiki dan meningkatkan sifat mekanik dari material komposit (Fakhri *et al.*, 2020) serta dapat memanaskan baja dengan struktur mikro, kekuatan dan kekerasan yang lebih baik dibandingkan teknik pemanasan konvensional (Oghbaei dan Mirzaee, 2010). Kombinasi MWO dengan tungku pemanas merupakan teknik yang efektif dan menjanjikan dalam pengolahan material.

Pemrosesan material menggunakan gelombang mikro dan tungku pemanas perlu dikaji baik dari dimensi geometri tungku dan parameter-parameter MWO domestik agar dapat menghasilkan suhu optimum sesuai kebutuhan. Guna efektivitas dan efisiensi implementasi pemanasan tungku dalam MWO secara empiris, studi berbasis pemodelan komputasional perlu dilakukan. Simulasi numerik terhadap sebuah model fisis berguna untuk mengobservasi, mengontrol, memprediksi fenomena yang terjadi, dan mengurangi kompleksitas efek gelombang mikro yang dapat terjadi pada saat melakukan eksperimen (Zhang *et al.*, 2017), sehingga implementasi teknis menjadi lebih mudah, efektif dan ekonomis. Simulasi numerik yang dilakukan oleh Tamang dan Aravindan (2019) dengan *software* COMSOL *Multiphysics* berbasis

metode elemen hingga untuk mengamati distribusi panas pada material SiC menghasilkan akurasi yang tinggi dan menunjukkan kesesuaian pengamatan secara eksperimen dan simulasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi dimensi geometri tungku dari segi ukuran dan bentuk, daya MWO dan waktu pemanasan terhadap suhu yang dihasilkan tungku, dan untuk mengoptimasi suhu tungku dalam MWO hingga mencapai suhu tinggi dalam waktu yang relatif singkat berdasarkan variasi parameter yang digunakan. Proses optimasi suhu tungku disimulasikan menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* yang dapat memecahkan permasalahan fisika yang kompleks. Penelitian ini diharapkan memberikan data yang valid untuk implementasi pemrosesan material dalam MWO untuk berbagai aplikasi fisis dan dapat menjadi data dasar dalam mengkonstruksi sistem pemanasan tungku dengan MWO.

Material dan Metode

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* 5.5 versi trial yang dilengkapi dengan CAD (*Computer Aided Design*) dan dioperasikan pada laptop dengan memori RAM 4,00 dan sistem operasi 64-bit *Windows* 10.

Metode

Proses pemanasan tungku Silikon Karbida (SiC) di dalam MWO dilakukan dengan cara simulasi numerik menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics*. Modul fisika yang diterapkan pada *software* COMSOL *Multiphysics* adalah *Heat Transfer - Electromagnetic Heating - Microwave Heating*.

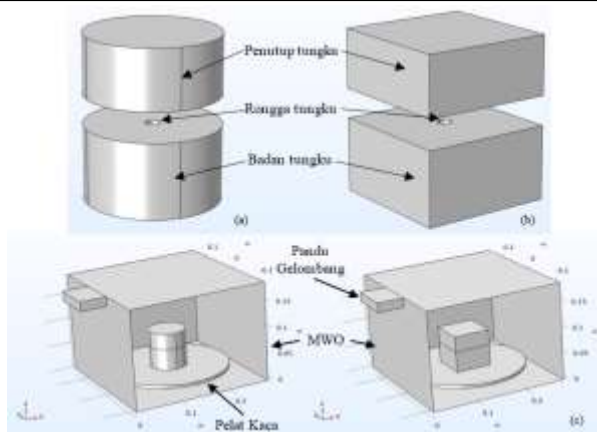
Rumusan Asumsi Dasar

Terdapat beberapa asumsi dasar untuk memudahkan proses simulasi dan analisis:

- (i) Material di dalam tungku terdistribusi merata dan memiliki sifat fisis yang sama di setiap titik dengan suhu awal tungku sebesar 20°C.
- (ii) Gelombang mikro hanya merambat di dalam oven dari pandu gelombang dan diserap oleh tungku sehingga menghasilkan panas.
- (iii) Sifat fisis material tungku konstan selama perambatan gelombang mikro dan pemanasan tungku bergantung pada waktu.
- (iv) Tungku memiliki struktur yang tidak kasar dan dianggap dapat mentransmisikan gelombang mikro yang datang dengan baik.

Konstruksi Geometri dan Sifat Material

Model geometri tungku, MWO, pelat kaca dan pandu gelombang yang dikonstruksi dengan COMSOL *Multiphysics* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Geometri Tungku (a) Silinder, (b) Kubus, (c) Masing-masing tungku di dalam MWO

Berikut spesifikasi geometri yang digunakan dan disesuaikan dengan kondisi yang sebenarnya baik dari komponen MWO dan tungku:

- Pandu Gelombang; terbuat dari tembaga dan berbentuk persegi panjang dengan ukuran 50 × 78 × 18 mm dalam mode TE.
- MWO (*Microwave Oven*); terbuat dari tembaga dengan ukuran 267 × 270 × 188 mm.
- Pelat; terbuat dari kaca dengan permeabilitas relatif bernilai 1 dan permitivitas relatif bernilai 2,55, yang berdiameter 113,5 mm dan tebal 6 mm untuk ditempatkan di dasar MWO.
- Tungku; terbuat dari Silikon Karbida (SiC) dan terdiri dari 3 tipe ukuran yaitu tipe I dengan ukuran 50 mm, tipe II dengan ukuran 70 mm dan tipe III dengan ukuran 90 mm. Di mana sisi tungku baik panjang sisi, diameter dan tinggi tungku dibuat sama untuk setiap tipe. Untuk bentuk tungku terdiri dari bentuk silinder dan kubus.

Di bagian tengah masing-masing tungku terdapat rongga tungku yang berisi udara dengan ukuran 10 mm, sehingga ketebalan masing-masing tipe tungku yaitu 20 mm, 30 mm dan 40 mm.

Berikut data sifat fisis material setiap komponen yang dipakai sebagai masukan data untuk simulasi numerik.

Tabel 1. Parameter Fisis Material

Parameter	Material yang digunakan			Satuan
	Cu (a,d)	SiC (b,c,d,e)	Udara (a)	
Permeabilitas relatif (μ^*)	1	1	1	1
Konduktivitas termal (k)	400	186,71	k(T)	W/(m.K)
Densitas (ρ)	8960	3100	ρ (pAT)	kg/m ³
Kapasitas panas Spesifik (Cp)	385	675,4	Cp(T)	J/(kg.K)

Permitivitas relatif (ϵ^*)	1	9,66 - 0,03i	1	1
Loss tangent ($\tan \delta$)	-	0,003	-	1
Kedalaman penetrasi	-	40	-	Mm
Konduktivitas listrik (σ)	5,99 8e7	0	0	S/m
Titik Leleh	1025	2730	-	°C

Sumber: a) *Software COMSOL Multiphysics*, b) Tamang dan Aravindan, (2019), c) Bhattacharya dan Basak, (2016), d) *MatWeb Material Property Data*, e) Mishra dan Sharma, (2016)

Persamaan Pengatur

Proses simulasi numerik dengan COMSOL *Multiphysics* menyelesaikan perpaduan persamaan elektromagnetik dan perpindahan panas.

Perambatan medan elektromagnetik di dalam MWO ditunjukkan pada persamaan Maxwell berikut.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

Di mana E adalah medan listrik (V/m), σ adalah konduktivitas listrik (S/m), ϵ_r dan ϵ_0 masing-masing adalah permitivitas relatif dan permitivitas vakum (F/m), ω adalah frekuensi sudut (rad/s), k_0 adalah bilangan gelombang (rad/m) dan μ_r adalah permeabilitas magnetik relatif (H/m).

Interaksi antara medan listrik dengan material tungku direpresentasikan dengan disipasi daya gelombang mikro, q_{abs} yang dapat diperoleh dengan menyelesaikan teorema Poynting.

$$q_{abs} = \omega \epsilon'' |E|^2 \quad (2)$$

Disipasi daya gelombang mikro digunakan untuk menyelesaikan persamaan perpindahan panas.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{abs} \quad (3)$$

Di mana ρ adalah densitas material (kg/m³), C_p adalah kapasitas panas pada temperatur konstan (J/(kg.K)), T adalah suhu, t adalah waktu, dan k adalah konduktivitas termal (W/(K.m)).

Syarat Batas

Syarat batas yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan pengatur secara numerik pada penelitian ini diantaranya:

Syarat batas *port* diterapkan pada saluran pandu gelombang persegi panjang seperti Gambar 2a bekerja dengan frekuensi 2,45 GHz. Input daya port bervariasi yaitu 650 W, 975 W hingga 1300 W. Konstanta propagasi β bergantung pada frekuensi f dan frekuensi *cut-off* f_c dinyatakan dengan:

$$\beta = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} \quad (4)$$

Untuk menghilangkan pengaruh pada bidang imajiner dari proses simulasi diterapkan syarat batas konduktor magnetik sempurna seperti Gambar 2b.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0 \quad (5)$$

Dinding MWO diterapkan syarat batas impedansi untuk menghambat medan listrik keluar dari rongga MWO seperti pada Gambar 2c yang diwakili oleh:

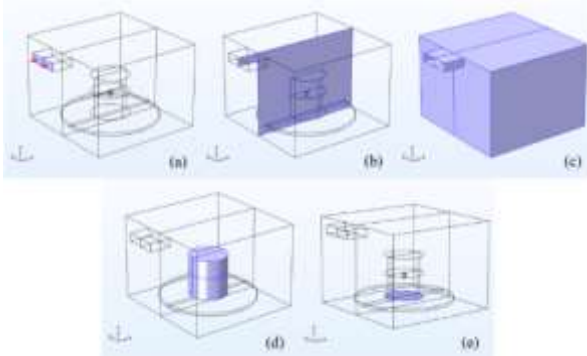
$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j\sigma/\omega}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})\mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_s)\mathbf{n} - \mathbf{E}_s \quad (6)$$

Panas yang hilang ke udara sekitar tungku dihitung dengan koefisien perpindahan panas $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Syarat batas fluks panas pada permukaan tungku seperti pada Gambar 2d dinyatakan dengan:

$$-\mathbf{n} \times \mathbf{q} = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (7)$$

Bagian bawah tungku tidak ada aliran panas atau syarat batas isolasi termal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2e.

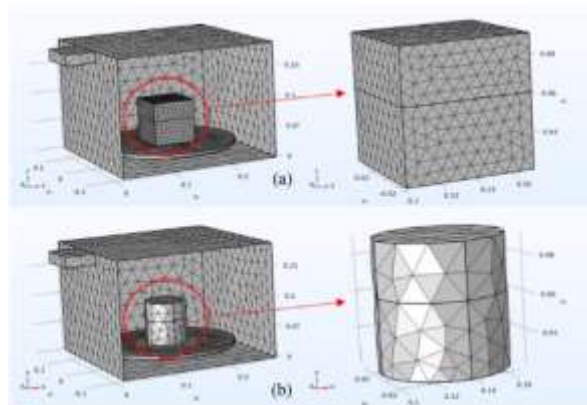
$$-\mathbf{n} \times \mathbf{q} = 0 \quad (8)$$



Gambar 2. Syarat Batas (a) pada Port, (b) Konduktor Magnetik Sempurna, (c) Impedansi, (d) Fluks Panas, (e) Isolasi Termal

Meshing

Elemen *mesh* yang digunakan pada model geometri ini adalah tetrahedral bebas, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Meshing MWO-Tungku (a) Kubus dan (b) Silinder.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Bentuk dan Ukuran Tungku

Simulasi pemanasan dengan variasi bentuk dan ukuran tungku dilakukan pada daya 1,3 kW dan lama pemanasan 60 menit. Berdasarkan Tabel 3, perubahan ukuran geometri tungku berpengaruh pada capaian suhu di dalam tungku. Perbedaan distribusi suhu yang diperoleh setiap tungku berkaitan dengan perbedaan bentuk geometri yang menyebabkan perbedaan pola transmisi dan refleksi gelombang mikro serta serapan energi gelombang

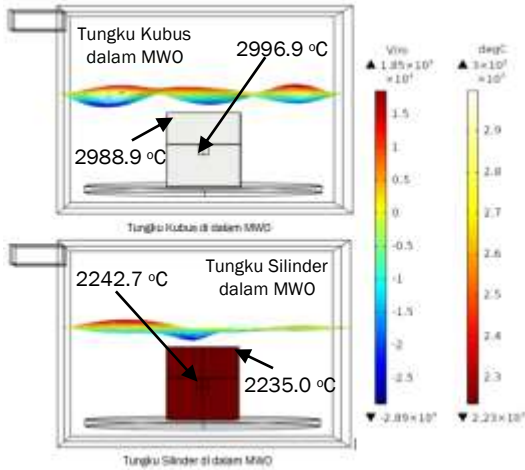
mikro pada bidang permukaan tungku dari kedua bentuk geometri tersebut. Perubahan ukuran geometri tungku berarti perubahan volume tungku, sehingga berpengaruh pada kuantitas serapan energi gelombang mikro dan suhu yang dihasilkan. Dari hasil tersebut, tungku tipe II menghasilkan suhu yang lebih tinggi dari tipe tungku lain dimana pada bentuk tungku kubus mencapai 2997°C dan pada bentuk tungku silinder mencapai 2243°C. Hal ini dikarenakan ketebalan setiap ukuran tungku terhadap kedalaman penetrasi material tungku yang adalah daerah interaksi gelombang elektromagnetik dan sifat fisis material. Perbedaan suhu pada tungku terletak pada bagian permukaan dan bagian dalam tungku sehingga suhu permukaan tungku lebih kecil daripada suhu bagian dalam tungku yang disebabkan oleh peristiwa konveksi antara permukaan tungku dengan udara di sekitar tungku.

Tabel 2. Suhu Setiap Bentuk dan Ukuran Tungku

Geometri	Suhu Tungku (°C)		
	Maksimum	Minimum	Selisih
Kubus Tipe I	735,6	734,3	1,3
Kubus Tipe II	2996,9	2988,9	8
Kubus Tipe III	1877,4	1872,8	4,6
Silinder Tipe I	1307,3	1305,5	1,8
Silinder Tipe II	2242,7	2235,0	7,7
Silinder Tipe III	1359,8	1356,2	3,6

Tungku kubus dan silinder tipe II dengan capaian suhu tertinggi menghasilkan distribusi suhu yang merata dengan medan listrik pada sumbu z relatif lebih tinggi baik untuk tungku kubus tipe II yang berkisar -22000 V/m hingga 14000 V/m dan tungku silinder tipe II yang berkisar -28900 V/m hingga 17600 V/m seperti pada Gambar 4. Terlihat bahwa suhu terdistribusi merata pada tungku karena selisih suhu pada tungku jauh lebih kecil dibandingkan dengan suhu tungku. Pola distribusi suhu digambarkan dengan warna merah untuk suhu rendah hingga warna putih untuk suhu tinggi, sedangkan pola distribusi medan listrik digambarkan dengan warna biru untuk medan listrik rendah hingga warna merah untuk medan listrik tinggi yang disebabkan oleh interferensi pantulan gelombang medan listrik dan adanya perbedaan sifat dielektrik material yang digunakan.

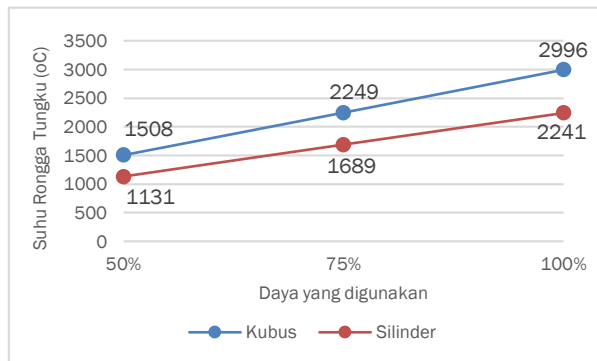
Pemanasan gelombang mikro yang volumetrik dengan kedalaman penetrasi material yang sesuai menyebabkan suhu tungku yang dihasilkan akan semakin besar seiring dengan bertambahnya ukuran tungku. Hal inilah yang menyebabkan tungku tipe II menghasilkan suhu terbesar. Untuk tungku tipe III mengalami penurunan suhu karena melebihi kedalaman penetrasi material dan energi internal tungku menjadi lebih besar, sehingga gelombang mikro tidak dapat diserap habis oleh tungku untuk dikonversi menjadi panas.



Gambar 4. Distribusi Suhu pada Tungku Kubus dan Silinder Tipe II

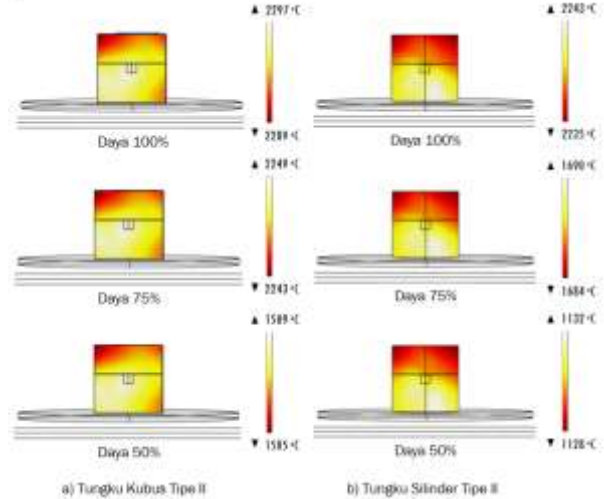
Pengaruh Daya MWO

Untuk mengetahui pengaruh daya MWO, tungku kubus dan silinder tipe II dipanaskan dengan variasi daya 1,3 kW (100%), 975 W (75%) dan 650 W (50%) selama 60 menit. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5 dimana suhu rongga tungku meningkat seiring bertambahnya daya MWO yang digunakan, sehingga semakin besar daya MWO yang digunakan maka semakin besar suhu yang dihasilkan. Pada grafik, tungku kubus menghasilkan suhu lebih besar daripada tungku silinder karena setelah dikalkulasi dengan COMSOL *Multiphysics* tungku kubus tipe II menyerap daya sekitar 61% dibandingkan dengan tungku silinder tipe II yang menyerap daya sekitar 35,8% masing-masing dari besarnya daya yang digunakan.



Gambar 5. Grafik Suhu untuk Variasi Daya MWO

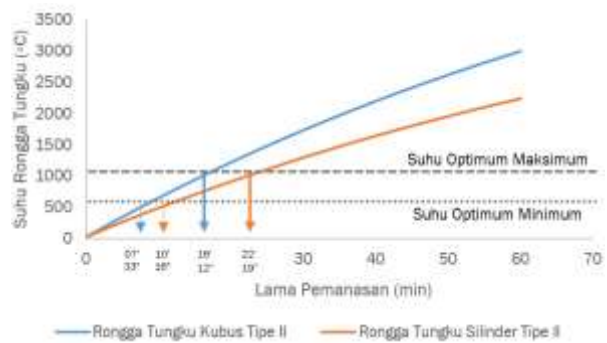
Gambar 6 menunjukkan distribusi suhu di dalam tungku kubus dan silinder tipe II seiring bertambahnya daya MWO. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa pada tungku kubus dan silinder dengan daya 50% selisih suhunya sebesar 4°C, dengan daya 75% selisih suhunya 6°C dan dengan daya 100% selisih suhunya 8°C. Selisih suhu tungku merepresentasikan merata tidaknya distribusi suhu di dalam tungku dan diperoleh bahwa daya 50% distribusi suhu tungku merata, tetapi dengan daya 100% distribusi suhu di dalam tungku sekitar rongga tungku lebih merata. Penggunaan daya MWO maksimum yaitu daya MWO 100% akan menghasilkan suhu yang tinggi dengan distribusi suhu yang merata juga.



Gambar 6. Distribusi Panas pada Tungku Kubus dan Silinder terhadap Variasi Daya MWO

Pengaruh Waktu Pemanasan

Perilaku suhu terhadap waktu pemanasan seperti kenaikan suhu dan laju pemanasan difokuskan pada bagian rongga tungku. Pada Gambar 7, suhu pada tungku kubus dan silinder tipe II masing-masing naik menjadi 2996°C dan 2241°C dari 20°C selama 60 menit pemanasan. Hal ini menunjukkan bahwa lama pemanasan memengaruhi suhu rongga tungku yang dihasilkan, di mana suhu rongga tungku mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu pemanasan. Grafik tersebut cenderung tidak linier yang menunjukkan penurunan laju kenaikan suhu seiring bertambahnya waktu pemanasan. Selain itu, tungku kubus tipe II lebih cepat mencapai suhu tinggi dibandingkan tungku silinder tipe II.

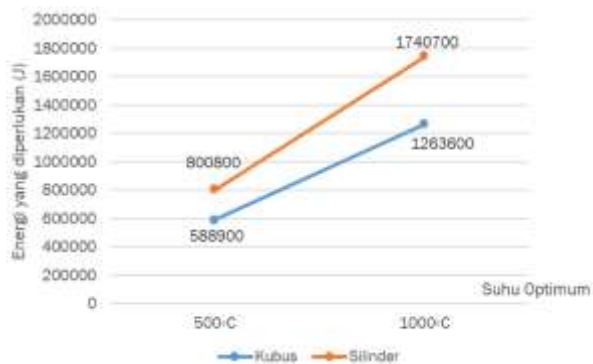


Gambar 7. Pengaruh Lama Pemanasan terhadap Suhu Rongga Tungku dan Penentuan Waktu Pemanasan mencapai Suhu Optimal

Suhu optimum yang hendak dicapai terdiri dari suhu optimum minimum sebesar 500°C berdasarkan suhu minimum yang diperlukan untuk pemrosesan material dan suhu optimum maksimum sebesar 1000°C berdasarkan titik lebur dari material MWO yaitu tembaga. Proses optimasi dilakukan untuk menentukan waktu tempuh suhu optimum minimum dan maksimum. Berdasarkan Gambar 7, pemanasan relatif cepat pada tungku kubus tipe II yang mencapai suhu optimum minimum dalam waktu 7 menit 33 detik dan suhu optimum maksimum dalam waktu 16 menit 12 detik

sedangkan pemanasan pada tungku silinder tipe II mencapai suhu optimum minimum dalam waktu 10 menit 16 detik dan suhu optimum maksimum dalam waktu 22 menit 19 detik.

Pemanasan tungku kubus tipe II untuk mencapai suhu optimum memerlukan energi yang sedikit dibandingkan dengan pemanasan tungku silinder tipe II, misalnya pemanasan tungku kubus dan silinder tipe II memerlukan energi masing-masing sebesar 588900 J dan 800800 J untuk mencapai suhu 500°C.



Gambar 8. Konsumsi Energi Tungku Kubus dan Silinder

Dengan memvariasikan dimensi geometri tungku, daya MWO dan waktu pemanasan terhadap rongga tungku hingga mencapai suhu optimum minimum 500°C, diperoleh tungku kubus tipe II yang dipanaskan dengan daya MWO 100% mencapai suhu 500°C dan terdistribusi merata di dalam tungku dalam waktu yang relatif singkat yaitu 7 menit 33 detik dengan tidak memerlukan energi yang terlalu besar atau konsumsi energi yang relatif sedikit yaitu 588900 J.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis dari hasil simulasi numerik pemanasan tungku dapat disimpulkan bahwa bentuk dan ukuran tungku, daya MWO dan lama pemanasan memengaruhi suhu yang dihasilkan, kenaikan suhu dan distribusi suhu di dalam tungku. Dengan mengoptimasi parameter dimensi geometri tungku, daya MWO dan waktu pemanasan diperoleh tungku berbentuk kubus dengan ukuran 70 mm atau tipe II yang dipanaskan pada MWO menggunakan daya maksimum, menghasilkan suhu optimum 500°C dalam waktu yang relatif lebih cepat yaitu 7 menit 33 detik (453 detik) dan konsumsi energinya relatif lebih rendah yaitu sebesar $5,889 \times 10^5$ J.

Daftar Pustaka

- Bhattacharya, M., dan Basak, T. 2016. A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. *Energy*. **97**: 306–338.
- Chandrasekaran, S., Basak, T., dan Ramanathan, S. 2012. Microwave Material Processing—A Review. *AIChE Journal*. **58(2)**: 330–363.
- Datta, A. K., dan Rakesh, V. 2013. Principles of Microwave Combination Heating. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. **12(1)**: 24–39.

- Fakhri, M. S., Aziz, S. J., dan Abed, A. H. 2020. Investigation of microwaves furnace effect on the mechanical properties of composite material. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. **43(3)**: 1–11.
- Griffiths, J. D. 2017. *Introduction to Electrodynamics Fourth Edition*. Cambridge University Press.
- Hakim, A. R., Handoyo, W. T., dan Prasetyo, A. W. 2020. A simulation study of parameters influencing microwave heating of seaweed (*Eucheuma cottonii*). *Journal of Physics: Conference Series*. **1444(1)**.
- Mishra, R. R., dan Sharma, A. K. 2016. Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **81**: 78–97.
- MatWeb Material Property Data. (n.d.). Retrieved December 19, 2020, from <http://www.matweb.com/index.aspx>.
- Muley, P. D., Nandakumar, K., dan Boldor, D. 2019. Numerical modelling of microwave heating of a porous catalyst bed. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. **53(1)**: 24–47.
- Oghbaei, M., dan Mirzaee, O. 2010. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*. **494(1-2)**: 175–189.
- Permatasari, R. Annas, M.S, dan B. A. 2015. Distribusi Temperatur Pada Microwave menggunakan Metode CFD. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTT M XIV), September. Hlm. 7–8.
- Syarif, D. N. 2020. *Pemanfaatan Oven Gelombangmikro (Microwave) Rumah Untuk Sistem Pemanasan (Heating System) Temperatur Tinggi*. <http://repository.unsri.ac.id/id/eprint/24150>.
- Srikant, S. S., Mukherjee, P. S., dan Bhima Rao, R. 2013. Effect of heat treatment in microwave furnace for placer ilmenite. *International Journal of Applied Science and Engineering*. **11(3)**: 245–250.
- Tamang, S., dan Aravindan, S. 2019. 3D numerical modelling of microwave heating of SiC susceptor. *Applied Thermal Engineering*. **162(2019)**: 114250.
- Wang, H., Zhang, Y., Zhang, Y., Feng, S., Lu, G., dan Cao, L. 2019. Laboratory and numerical investigation of microwave heating properties of asphalt mixture. *Materials*. **12(1)**.
- Zhang, J., Luo, Y., Liao, C., Xiong, F., Li, X., Sun, L., dan Li, X. 2017. Theoretical investigation of temperature distribution uniformity in wood during microwave drying in three-port feeding circular resonant cavity. *Drying Technology*. **35(4)**: 409–416.