



Artikel Penelitian

Optimalisasi Dimensi Tabung *Roasting* Kopi Kapasitas 2 kg dengan Pendekatan Model Elemen Hingga

Dedi Suryadi^{a*}, Bowo Anugrah^a, Ahmad Fauzan Suryono^a, Agus Suandi^a, Novalio Daratha^b

^aProgram Studi Teknik Mesin Universitas Bengkulu, Jl. WR Supratman Kandang Limun Bengkulu, 38371, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Elektro Universitas Bengkulu, Jl. WR Supratman Kandang Limun Bengkulu, 38371, Indonesia

*Corresponding Author

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 18 Maret 2022

Revisi Akhir: 22 April 2022

Diterbitkan Online: 30 April 2022

KATA KUNCI

Coffee Roasting

Drum Material

Drum Dimensions

Finite Element Model

Thermal Stress

KORESPONDENSI

*E-mail: dedi_suryadi@unib.ac.id

A B S T R A C T

Coffee roasting is an important process in the coffee industry that determines the quality of the coffee beverage obtained. The roasting process is carried out in a cylindrical tube having high temperature. Therefore, thermal stress on the cylindrical tube (drum) should be focused. In this paper, both appropriate materials selection and optimal dimension of the roaster drum are considered. Drum is given both thermal load of 200°C and a coffee load of 2 kg. Here, Aluminum Alloy 5083 and Stainless Steel 304 are analyzed as drum materials because these materials are recommended for foods. Finite element method is used for drum analysis with axisymmetric model. Moreover, optimal dimension of drum can be obtained by varying the length, diameter and thickness. The results show that Stainless Steel 304 is suitable material for drum under both thermal load and both thermal load of 200°C and a coffee load of 2 kg. While, dimensions of drum are length of 450 mm and diameter of 180 mm with thickness of drum larger than 1 mm.

1. PENDAHULUAN

Kopi merupakan salah satu komoditi terbesar di Indonesia. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya angka produksi kopi yang mencapai 773.409 ton pertahun [1]. Meningkatnya jumlah konsumsi kopi menjadi pendorong bagi industri pengolahan kopi. Beberapa cara telah dilakukan dalam pengolahan produk kopi oleh para petani, pedagang, maupun industri kecil (UMKM). Pada umumnya pengolahan kopi, khususnya proses penyangraian (*roasting*) dilakukan dengan cara tradisional menggunakan alat yang sederhana. Sedangkan untuk skala yang cukup besar, pengolahan

umumnya menggunakan mesin sangrai (*roasting coffee*) [2,3].

Roasting kopi dilakukan dengan tujuan untuk membentuk rasa dan aroma pada kopi. Proses *roasting* ini merupakan tahapan yang paling krusial dalam pengolahan kopi karena pembentukan *flavor* akan terjadi pada tahap ini [4]. Desain dari *roasting* kopi bisa bermacam-macam bisa *single wall drum*, *double wall drum* dan *solid cylinder* [5,6]. Proses *roasting* biasanya dilakukan secara tertutup dengan menggunakan tabung silinder yang diberi gaya putar. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan panas yang merata pada tabung.

Karena pentingnya peran tabung dalam proses *roasting* kopi ini, banyak penelitian yang sudah dilakukan untuk mendapatkan performa tabung yang baik. Salah satu faktor yang mempengaruhi performa tabung adalah distribusi temperatur [7,8]. Perpindahan panas ditribusi kecepatan udara yang terjadi di dalam tabung *roasting* dapat dilakukan dengan menggunakan *Computational Fluids Dynamics* (CFD) [7]. Selain itu, penggunaan CFD juga dapat dilakukan pada biji kopi konfigurasi 3D geometris yang menghasilkan fenomena perpindahan panas dan massa saat melakukan *roasting* kopi [8].

Beberapa penelitian tentang proses perpindahan panas dan aliran pada tabung *roasting* dengan menggunakan CFD masih mengabaikan beberapa aspek kekuatan struktur tabung. Analisis kekuatan atau tegangan sangat penting dikaji untuk mengetahui kemungkinan kegagalan yang akan terjadi pada tabung. Pada penelitian ini akan menganalisis tegangan termal pada tabung *roasting* kapasitas 2 kg dengan menentukan material dan dimensi yang optimal.

Material yang dianalisis untuk tabung *roasting* ini adalah material *Aluminium Alloy 5083* dan *Stainless Steel 304*. Sedangkan ketebalan dan dimensi berupa panjang dan diameter tabung divariasikan untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Variasi material dan dimensi ini dipilih berdasarkan perbedaan sifat dari masing-masing material. Analisis tabung akan menggunakan pendekatan model elemen hingga dengan model *axisimmetry*. Model *axisimmetry* ini dilakukan untuk mengurangi waktu komputasi dan mengurangi pemakaian memori komputer [9].

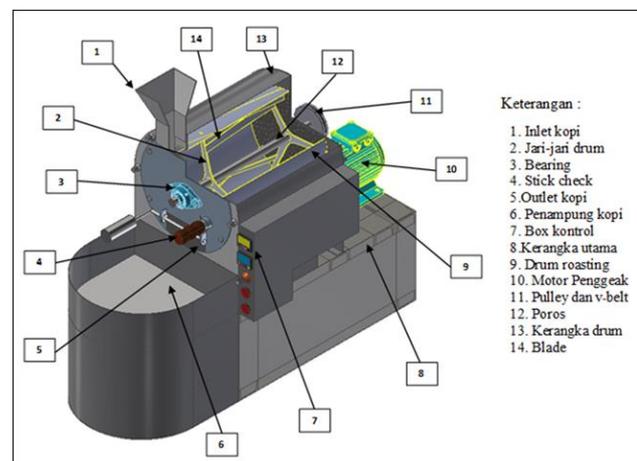
2. METODOLOGI

Penelitian ini menganalisis tegangan termal pada tabung mesin *roasting* kopi kapasitas 2 kg untuk mendapatkan dimensi tabung *roasting* yang optimum dengan memvariasikan diameter, panjang, diameter, dan material tabung. Pada penelitian ini, tegangan termal diperoleh dengan cara analisis menggunakan pendekatan model elemen hingga.

2.1. Dimensi dan Material Tabung Roasting

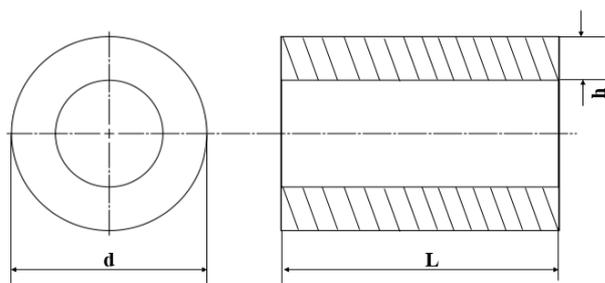
Tabung merupakan salah satu komponen utama yang penting dari mesin *roasting* biji kopi yang berfungsi melakukan proses penyangraian seperti terlihat pada Gambar 1. Oleh karena itu kajian tentang dimensi dan material yang tepat sangat ditekankan pada penelitian ini.

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah penentuan dimensi tabung *roasting* yang dapat menampung kapasitas kopi seberat 2 kg. Dimana, untuk mendapatkan dimensi tabung yang optimal, parameter yang divariasikan adalah ketebalan tabung (h), Panjang tabung (L), dan diameter tabung (d). Ketebalan tabung divariasikan dari 1 mm sampai 5 mm. Sedangkan variasi kombinasi panjang dan diameter tabung dilakukan untuk mendapatkan kapasitas tabung 2 kg [10]. Ada tiga (3) variasi dimensi tabung dengan kapasitas 2 kg dengan kombinasi panjang (L) dan diameter tabung (d). Variasi pertama adalah Tabung 1 yaitu $L=350 \text{ mm}/d = 200 \text{ mm}$, Tabung 2 adalah $L=400 \text{ mm}/d = 190 \text{ mm}$, dan Tabung 3 adalah $L=450 \text{ mm}/d = 180 \text{ mm}$. Dimensi pemodelan tabung *roasting* kopi secara rinci dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Model Mesin Roasting Kapasitas 2 kg

Selanjutnya, material tabung *roasting* kopi juga divariasikan untuk mendapatkan hasil yang baik. Material yang dianalisis adalah *Aluminium Alloy 5083* dan *Stainless Steel 304*. *Properties* dari masing-masing material ini disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. Dimensi Model Tabung *Roasting* Kopi Kapasitas 2 kg

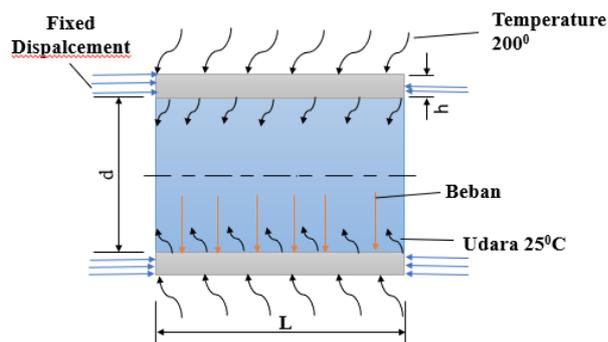
Tabel 1. Properties material *aluminium alloy 5083*, dan *Stainless Steel 304* [11, 12]

No	Material properties	Aluminium Alloy 5083	Stainless Steel 304
1	Density (Kg/m^3)	2660	7930
2	Young Modulus (MPa)	71000	200000
3	Thermal Conductivity ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	162	14,5
4	Thermal Expansion Coefficient ($1/^\circ\text{C}$)	$2,38 \times 10^{-5}$	$1,68 \times 10^{-5}$
5	Specific Heat ($\text{J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	917	480
6	Poisson Ratio	0,33	0,3
7	Yield Strength (MPa)	276	210

2.2. Kondisi Batas Model Tabung *Roasting*

Gambar 3 menunjukkan kondisi batas dari tabung *roasting* kopi. Tabung mengalami dua jenis pembebanan, yaitu beban akibat berat kopi sebesar 2 kg dan beban temperatur sebesar 200°C akibat proses pemanasan [13]. Beban akibat berat kopi terdistribusi secara merata di permukaan dalam tabung, sedangkan beban temperatur dialami oleh permukaan luar tabung. Sementara di kedua sisi tabung ditumpu dengan tumpuan jepit. diberi tumpuan jepit pada kedua sisinya. *Initial condition* diberikan temperatur awal 25°C .

Setelah kondisi batas diberikan pada tabung *roasting*, selanjutnya dilakukan proses analisis model. Prosedur penyelesaian analisa menggunakan pendekatan metode elemen hingga dengan pemodelan *axisymmetric*. Proses analisis model ini dilakukan untuk mendapatkan waktu yang dibutuhkan untuk temperatur *steady* di dalam tabung dan tegangan yang terjadi pada tabung.



Gambar 3. Kondisi Batas Tabung *Roasting* Kopi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Temperatur *Steady* dalam Tabung

Sebelum melakukan analisis tegangan pada tabung, langkah pertama yang harus dilakukan adalah analisis temperatur *steady* di dalam tabung *roasting*. Langkah ini bertujuan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi temperatur *steady* di dalam tabung. Dalam penelitian ini, ketebalan tabung (h) divariasikan dari 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm dan 5 mm. Sedangkan variasi material tabung adalah *aluminium alloy 5083* dan *Stainless Steel 304*.

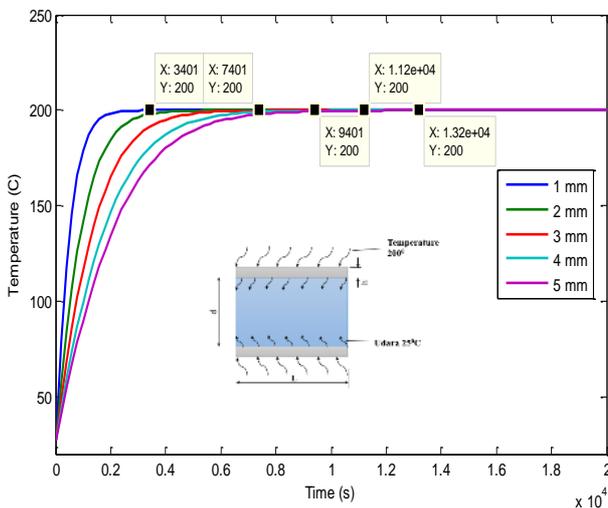
Gambar 4 dan 5 menampilkan hubungan antara waktu pemanasan dan kenaikan temperatur di dalam tabung untuk masing-masing material *Aluminium Alloy 5083* dan *Stainless Steel 304* dengan variasi ketebalan dari 1-5 mm. Secara umum, dari gambar terlihat jelas bahwa semakin tebal tabung, maka semakin lama waktu pemanasan yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi temperatur *steady*. Hal ini dikarenakan ketebalan tabung menyebabkan kenaikan nilai tahanan termal pada tabung [14].

Untuk material *Aluminium Alloy 5083* (Gambar 4), waktu pemanasan minimum yang dibutuhkan untuk temperatur *steady* adalah pada ketebalan tabung (h) 1 mm yaitu selama 3.401 detik atau setara dengan 57 menit. Sedangkan waktu yang paling maksimum adalah pada ketebalan tabung (h) 5 mm selama 13.200 detik atau setara dengan 3 jam 40 menit.

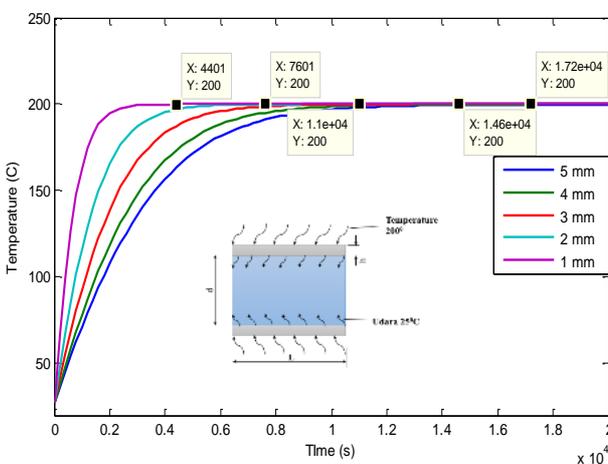
Sedangkan untuk material *Stainless Steel 304* (Gambar 5), waktu pemanasan minimum yang

dibutuhkan untuk temperatur *steady* adalah pada ketebalan tabung (h) 1 mm yaitu selama 4.401 detik atau setara dengan 1 jam 13 menit. Sedangkan waktu yang paling maksimum adalah pada ketebalan tabung (h) 5 mm selama 17.200 detik atau setara dengan 4 jam 47 menit.

Berdasarkan hasil analisis dari kedua material ini, terlihat bahwa material *Aluminium Alloy 5083* membutuhkan waktu untuk mencapai temperatur *stady* lebih cepat dibanding *Stainless Steel 304*. Hal ini dikarenakan perbedaan nilai *thermal conductivity* dari masing-masing material, dimana *Aluminium Alloy 5083* memiliki *thermal conductivity* jauh lebih besar dibanding *Stainless Steel 304* [11, 12].



Gambar 4. Temperatur *Steady* *Aluminium Alloy 5083*



Gambar 5. Temperatur *Steady* *Stainless Steel 304*

3.2. Pengaruh Ketebalan dan Panjang Tabung Terhadap Tegangan Termal (σ) pada Tabung

Analisis pengaruh ketebalan dan panjang tabung *roasting* kopi terhadap tegangan termal (σ) sangat penting dikaji. Hal ini berkaitan dengan kekuatan dan umur pakai tabung. Selain itu, pemilihan material yang tepat juga dilakukan dalam penelitian ini.

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan antara ketebalan dan panjang tabung terhadap tegangan termal (σ) yang muncul pada permukaan tabung untuk material *Aluminium Alloy 5083*. Ketebalan tabung divariasikan dari 1 mm sampai 5 mm dengan selisih *range* 1 mm digunakan untuk menentukan ketebalan yang diizinkan. Variasi panjang tabung adalah 350 mm, 400 mm, dan 450 mm.

Dari Gambar 6 terlihat bahwa ketebalan dinding tabung berbanding terbalik dengan tegangan termal yang terjadi. Semakin meningkat ketebalan tabung, semakin kecil tegangan termal yang terjadi pada dinding tabung. Begitupun dengan panjang tabung, semakin meningkat panjang tabung, semakin kecil tegangan termal yang terjadi.

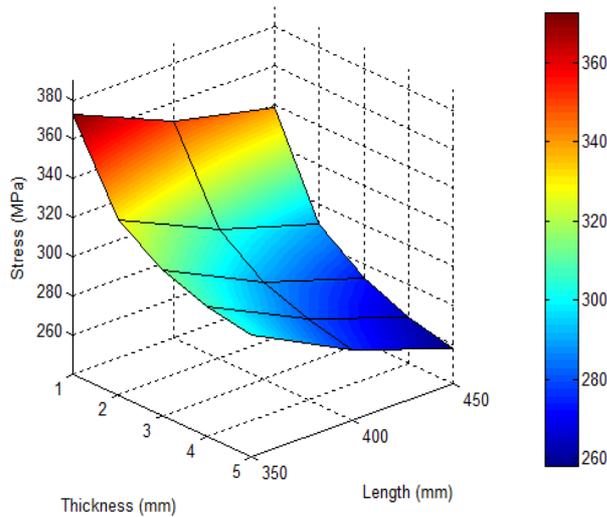
Tegangan termal terbesar, yaitu 370 MPa terjadi pada kondisi ketebalan tabung (h) sebesar 1 mm dengan panjang tabung (L) sebesar 350 mm. Sedangkan Tegangan termal terkecil yaitu sebesar 255 MPa. Ini terjadi pada kondisi ketebalan tabung (h) sebesar 5 mm dengan panjang tabung (L) sebesar 450 mm.

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara ketebalan dan panjang tabung terhadap tegangan termal (σ) yang muncul pada permukaan tabung untuk material *Stainless Steel 304*. Sama halnya dengan material *Aluminium Alloy 5083*, ketebalan dinding tabung dan panjang tabung berbanding terbalik dengan tegangan termal yang terjadi.

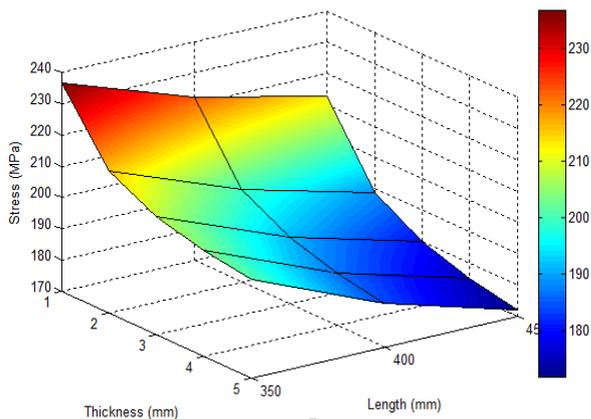
Tegangan termal terbesar, yaitu 237 MPa terjadi pada kondisi ketebalan tabung (h) sebesar 1 mm dengan panjang tabung (L) sebesar 350 mm. Sedangkan Tegangan termal terkecil yaitu sebesar 173 MPa. Ini terjadi pada kondisi ketebalan tabung

(h) sebesar 5 mm dengan panjang tabung (L) sebesar 450 mm.

Berdasarkan Gambar 6 dan 7, secara umum menunjukkan bahwa tegangan termal yang terjadi pada material *Stainless Steel 304* lebih besar dibandingkan dengan tegangan pada material *Aluminium Alloy 5083*. Hal ini dikarenakan perbedaan nilai *specific heat* material *Aluminium Alloy 5083* lebih besar dibanding *Stainless Steel 304* [11,12].



Gambar 6 Kurva Hubungan antara Ketebalan dan Panjang Tabung terhadap Tegangan Termal untuk Material *Aluminium Alloy 5083*

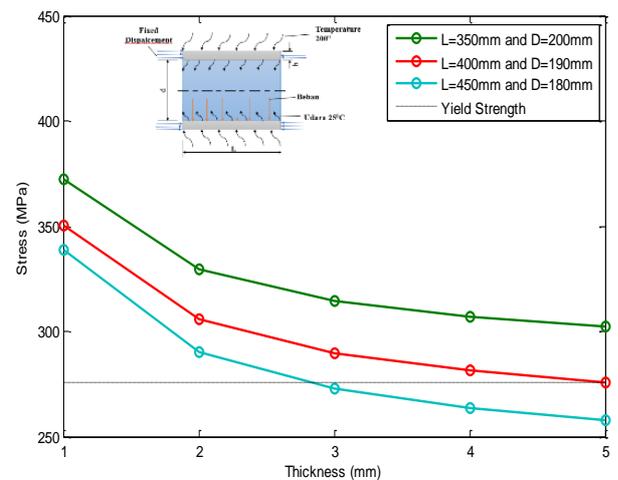


Gambar 7 Kurva Hubungan antara Ketebalan dan Panjang Tabung terhadap Tegangan Termal untuk Material *Stainless Steel 304*

3.3. Pemilihan Dimensi Tabung untuk Mesin Roasting Kapasitas 2 kg

Gambar 8 menunjukkan hasil tegangan termal pada tabung *roasting* terhadap ketebalan tabung untuk material *Aluminium Alloy 5083* dengan tiga variasi kombinasi dimensi tabung. Variasi pertama Tabung 1 adalah L=350 mm/d=200 mm, Tabung 2 adalah L=400 mm/d=190 mm, dan Tabung 3 adalah L=450 mm/d=180 mm. Berdasarkan Gambar 8 terlihat dengan jelas bahwa tegangan termal pada tabung menurun dengan meningkatnya ketebalan tabung, dengan kata lain tegangan termal berbanding terbalik dengan ketebalan tabung. Tegangan pada variasi Tabung 1 lebih besar dibanding Tabung 2 atau Tabung 3.

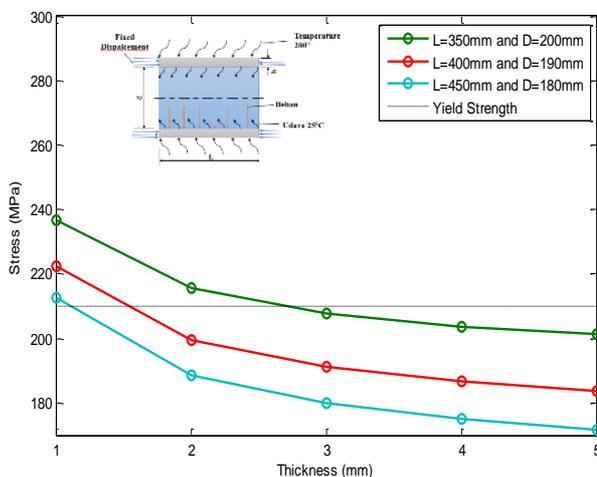
Pada Gambar 8, garis putus-putus merupakan *yield strength* material *Aluminium Alloy 5083* yaitu sebesar 276 MPa. Nilai ini sebagai indikator gagal atau tidaknya struktur/material. Variasi Tabung 1 (L=350 mm/d=200 mm) dan Tabung 2 (L=400 mm/d=190 mm) tidak dapat digunakan sebagai tabung mesin *roasting* kopi kapasitas 2 kg karena tegangan yang timbul pada tabung lebih besar dari *yield strength* material *Aluminium Alloy 5083* yaitu 276 MPa. Sedangkan variasi Tabung 3 (L=450 mm/d=180 mm) dapat digunakan sebagai tabung *roasting* dengan tebal tabung 4 mm atau 5 mm seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 8. Tegangan Termal (σ) pada Tabung *Roasting* terhadap ketebalan Tabung untuk Material *Aluminium Alloy 5083*

Gambar 9 menunjukkan hasil tegangan termal pada tabung *roasting* terhadap ketebalan tabung untuk material *Stainless Steel 304* dengan tiga variasi kombinasi dimensi tabung. Sama halnya dengan Gambar 8, bahwa tegangan termal yang muncul pada tabung berbanding terbalik dengan ketebalan tabung. Serta, tegangan pada variasi Tabung 1 lebih besar dibanding Tabung 2 atau Tabung 3. Dengan kata lain, variasi Tabung 3 menghasilkan tegangan yang paling kecil dibanding variasi tabung lainnya.

Berdasarkan Gambar 9 terlihat jelas bahwa variasi Tabung 1 (L=350 mm/d=200 mm) dapat digunakan sebagai tabung *roasting* apabila tebal tabung lebih besar dari 3 mm. Sedangkan variasi Tabung 2 (L=400 mm/d=190 mm) dan tabung 3 (L=450 mm/d=180 mm) dapat digunakan sebagai tabung *roasting* jika tebal tabung lebih besar dari 1 mm. Hal ini dikarenakan tegangan termal yang timbul pada tabung lebih kecil dari *yield strength* material *Stainless Steel 304* yaitu 210 MPa. Dari data yang didapat menunjukkan bahwa variasi Tabung 3, yaitu kombinasi L=450 mm/d=180 mm merupakan dimensi tabung *roasting* kopi yang terbaik untuk kapasitas 2 kg.



Gambar 9. Tegangan Termal (σ) pada Tabung *Roasting* terhadap ketebalan Tabung untuk Material *Stainless Steel 304*

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dari analisis *thermal stress* pada tabung *roasting* kopi penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Tegangan termal yang muncul pada tabung mesin *roasting* kopi kapasitas 2 kg berbanding terbalik dengan tebal dan panjang tabung. Semakin tebal dinding tabung, semakin rendah tegangan termal yang muncul. Selain itu, semakin Panjang tabung, semakin rendah pula tegangan termal yang terjadi pada tabung.
- Pemilihan material yang tepat untuk tabung *roasting* sangat penting. Pada penelitian ini material *Stainless Steel 304* lebih cocok digunakan untuk tabung karena tegangan termal yang dihasilkan jauh lebih rendah dibanding tegangan pada material *Aluminium Alloy 5083*.
- Berdasarkan variasi dimensi tabung *roasting* yang telah dianalisis dapat disimpulkan bahwa dimensi terbaik untuk tabung *roasting* kapasitas 2 kg dengan material *Stainless Steel 304* adalah tabung dengan panjang 450 mm, diameter 180 mm dan ketebalan lebih besar dari 1 mm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Bengkulu yang telah mendanai penelitian ini melalui Hibah Penelitian Unggulan Universitas Bengkulu 2021 dengan Nomor Kontrak 1787/UN30.15/PG/2021 Tanggal 22 Juni 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik, “Statistik perkebunan Indonesia”, Direktorat Jenderal Perkebunan, Jakarta, Indonesia, 2020.
- [2] Daywin, and F.J. Gozali, “Community service report: Designing the ergonomic *roasting* machine for coffee seed with additional electrical motor at Seduh Kopi coffee shop”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 852, No. 1, 2020.

- [3] I. Sofi'i, "Coffee's Roaster Design Machine with Rotating Mixer," *J. Ilm. Tek. Pertan. Politek. Negeri Lampung*, Vol. 6, No. 1, pp. 34-45, 2014.
- [4] J. Aggenstoss, L. Poisson, R. Kaegi, R. Perren and F. Escher, "Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions", *J. Agric. Food Chem.*, Vol 56, pp. 5836-5846, 2008.
- [5] C.C. Chiang, D.Y. Wu and D.Y. Kang, "Detailed Simulation of Fluid Dynamics and Heat Transfer in Coffee Bean Roaster", *Journal of Food Process Engineering*, vol. 40, No. 2, 2017.
- [6] O.A. Ogunjirin, O.M. Odeniyi, A.S. Olubo, A.J. Farounbi, O.A. Ola and S.A. Adeleke, "Design and construction of an electrically powered coffee roasting machine. *IOP*", *Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol.445, No. 1, 2020.
- [7] T.B. Alonso, P.J.A. Hernández, E.F. Sierra, S. Schenker, and C. Yeretjian, "Modeling and validation of heat and mass transfer in individual coffee beans during the coffee roasting process using computational fluid dynamics (CFD)", *Chimia*, Vol. 67, No. 4, pp. 291-294, 2013.
- [8] E.R. Dutra, L.S. Oliveira, A.S. Franca, V.P. Ferrez, and R.J. Afonso, "A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast", *Journal of Food Engineering*, Vol. 47, pp. 241-246, 2001.
- [9] N.A. Noda, D. Suryadi, S. Matsuda, Y. Takase and Y. Sano, "Proposal for New Hearth Roller Consisting of Ceramic Sleeve and Steel Shafts Used in the Heat Treat Furnace", *ISIJ International*, Vol. 55, No. 11, pp. 2416.2425, 2015.
- [10] R.S. Khurmi and J.K. Gupta, "Machine Design", *Eurasia Publ House LTD Ram Nagar, New Delhi-110 055*. 2005, Vol. 42, No. 3, pp. 59-59.
- [11] T.S. Patrick et. al., "Overview of Alluminium Alloy Mechanical Properties During and After Fires", *Departement Of Mechanical Engineering Virginia Tech USA*, 2015.
- [12] ASM Internasional, "Properties and Selection : Iron Steels and High Performance Alloy", *ASM Handbook, USA, 1993, Volume 1*.
- [13] A. Batubara, A. Widyasanti dan A. Yusuf, Uji "Kinerja dan Analisis Ekonomi Mesin Roasting Kopi (Studi Kasus di Taman Teknologi Pertanian Cikajang - Garut)", *Jurnal Teknotan*, Vol. 13, No. 1, 2019.
- [14] H.L.V. Jhon, "A Heat Transfer Textbook". *Philogiston Press, Cambrige Massachusetts, USA*, 2019, Edisi 5.