



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TL 141584**

# **SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DALAM OBJEK BERBENTUK SILINDER DAN BALOK AKIBAT RADIASI GELOMBANG MIKRO MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**FERDIANSYAH IQBAL RAFANDI**  
NRP 2713 100 040

Dosen Pembimbing :  
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.  
Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 20





**TUGAS AKHIR - TL141584**

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DALAM  
OBJEK BERBENTUK SILINDER DAN BALOK  
AKIBAT RADIASI GELOMBANG MIKRO  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Ferdiansyah Iqbal Rafandi  
NRP. 2713 100 040

Dosen Pembimbing :

Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



FINAL PROJECT - TL141584

# **SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CYLINDRICAL AND RECTANGULAR SHAPED OBJECTS DUE TO MICROWAVE RADIATION USING FINITE ELEMENT METHOD**

Ferdiansyah Iqbal Rafandi  
NRP. 2713 100 040

Supervisor :

Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc.

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DALAM  
OBJEK BERBENTUK SILINDER DAN BALOK  
AKIBAT RADIASI GELOMBANG MIKRO  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Material Inovasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Ferdiansyah Iqbal Rafandi**  
NRP. 2713 100 040

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat ..... (Pembimbing I)
2. Dian Mughni Felicia ..... (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **Simulasi Distribusi Temperatur dalam Objek Berbentuk Silinder dan Balok akibat Radiasi Gelombang Mikro dengan Metode Elemen Hingga**

**Nama** : Ferdiansyah Iqbal Rafandi  
**NRP** : 2713100040  
**Jurusan** : Teknik Material & Metalurgi  
**Dosen Pembimbing** : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.  
Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc.

## **Abstrak**

*Pemanasan menggunakan gelombang mikro merupakan salah satu metode alternatif yang efisien, efektif dan lebih ramah lingkungan untuk proses pengolahan material. Sayangnya, metode ini dapat menghasilkan distribusi temperatur yang tidak merata selama proses pemanasannya. Penelitian ini diawali oleh proses simulasi silinder daging sapi dan balok daging salmon dengan menggunakan variasi ketinggian objek untuk mendapatkan prosedur simulasi yang benar berdasarkan referensi. Kemudian, analisis difokuskan pada distribusi temperatur di dalam material  $FeTiO_3$  setelah dipanaskan menggunakan gelombang mikro dengan variasi berupa diameter sampel sebesar 7 cm dan 10 cm, daya pemanasan sebesar 1,2 kW dan 5,5 kW, bentuk sampel berupa silinder dan balok serta ketinggian sampel sebesar 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm. Selanjutnya proses simulasi dilanjutkan pada pemanasan  $FeTiO_3$  dalam sistem Microwave Batch Furnace dengan variasi berupa ketinggian sampel sebesar 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm dan arah datangnya sumber gelombang elektromagnetik yang berasal dari satu arah dan dua arah. Dari hasil simulasi menggunakan ANSYS Mechanical APDL 17.0 didapatkan bahwa geometri sampel yang paling efektif adalah berupa silinder tanpa wadah dengan diameter 10 cm dan ketinggian 3 cm karena dapat menghasilkan temperatur maksimum*

*sebesar 1210,35 K dengan perbedaan temperatur sebesar 101,76 K untuk pemanasan dengan daya sebesar 5,5 kW selama 4 menit. Sedangkan geometri yang efektif dalam sistem Microwave Batch Furnace adalah berupa silinder dengan diameter 7 cm dan ketinggian 1,5 cm dengan arah sumber pemanasan berasal dari dua arah karena dapat menghasilkan temperatur maksimum sebesar 1240,59 K dan perbedaan temperatur sebesar 80,986 K untuk pemanasan selama 18 menit.*

***Kata Kunci: pemanasan gelombang mikro, distribusi temperatur, geometri, metode elemen hingga***

# **Simulation of Temperature Distribution in Cylindrical and Rectangular Shaped Objects due to Microwave Radiation using Finite Element Method**

**Name** : Ferdiansyah Iqbal Rafandi  
**NRP** : 2713100040  
**Department** : Teknik Material & Metalurgi  
**Supervisor** : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.  
Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc.

## **Abstract**

*Microwave assisted heating is one of potential alternative method because its efficiency, effectiveness and environmental aspect for material processing. However, this method could generate non-uniform temperature distribution during the heating process. Cylindrical beef and rectangular salmon fillet was initially simulated in this research with variation on its heights in order to obtain the correct simulation procedure based on reference. Then, this research concerns in analyzing the temperature distribution of  $FeTiO_3$  material after being heated using microwave with variation on its diameter with amount of 7 cm and 10 cm, heating power which are 1,2 kW and 5,5 kW, object's shape in the form of cylinder and rectangular also height of object which are 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm and 6 cm. Further the simulation was conducted for  $FeTiO_3$  heating process in Microwave Batch Furnace's system with variation on its height which are 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm and 6 cm also the direction of electromagnetic source which come from one side and two sides. From the simulation using ANSYS Mechanical APDL 17.0, it can be inferred that the most effective geometry is in the form of non-crucible cylinder with 10 cm in diameter and 3 cm in height because it can generate the maximum temperature 1210,35 K and temperature difference 101,76 K using 5.5 kW power for 4 minutes*

*heating process. While, the most effective geometry in Microwave Batch Furnace's system is in the form of cylinder with 7 cm in diameter, 1,5 cm in height and electromagnetic source from two directions because it can generate the maximum temperature 1240,59 K and temperature difference 80,986 K for 18 minutes heating process.*

***Keywords: microwave heating, temperature distribution, geometry, finite element method***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat, nikmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan menyusun laporan tugas akhir yang berjudul “**Simulasi Distribusi Temperatur dalam Objek Berbentuk Silinder dan Balok akibat Radiasi Gelombang Mikro Menggunakan Metode Elemen Hingga**”. Laporan tugas akhir ini disusun untuk melengkapi mata kuliah Tugas Akhir dan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan, bimbingan dan saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan serta masukan hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya :

1. Kedua orang tua serta keluarga tercinta yang selalu memberikan dukungan kepada penulis berupa doa, moral, tenaga dan materi.
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D. serta Ibu Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu serta saran kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
4. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Ibu Amaliya Rasyida, ST., M.Sc. selaku dosen wali penulis yang selalu membina penulis selama menjalani

- pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
6. Seluruh dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
  7. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
  8. Seluruh teman – teman mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
  9. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis selalu mengharapkan adanya kritik serta saran yang membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Simulasi Pemanasan Material dengan Gelombang Mikro .....	5
2.2 Gelombang Mikro .....	8
2.3 Interaksi Material dengan Gelombang Mikro .....	11
2.4 Mekanisme Pemanasan dengan Gelombang Mikro .....	16
2.4.1 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Listrik.....	16
2.4.2 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Magnet .....	19
2.5 Formulasi Energi Panas akibat Radiasi Gelombang Mikro... ..	23
2.6 Persamaan Perpindahan Panas dan Distribusi Temperatur pada Pemanasan Gelombang Mikro .....	27
2.6.1 Perpindahan Panas pada Objek Silinder.....	28
2.6.2 Perpindahan Panas pada Objek Balok.....	32
2.7 Proses Pemanasan Ilmenite dengan Gelombang Mikro .....	37
2.8 Metode Elemen Hingga.....	39
2.9 Aplikasi Metode Elemen Hingga pada Proses Perpindahan Panas.....	41
<b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	45

3.2	Material Penelitian.....	46
3.2.1	Objek Penelitian .....	46
3.2.2	Material Penyusun Dinding Furnace .....	50
3.2.3	Geometri Sampel Uji dan Furnace .....	58
3.3	Peralatan Penelitian .....	60
3.4	Pemodelan dengan ANSYS 17.0.....	61
3.4.1	Pemodelan Element Type.....	62
3.4.2	Pemodelan Sifat Material .....	62
3.4.3	<i>Meshing</i> .....	63
3.4.4	<i>Boundary Condition</i> .....	66
3.4.5	Pembebanan.....	66
3.4.6	Tipe Analisis.....	67
3.4.7	Validasi.....	67
3.5	Rancangan Penelitian .....	67
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Analisis Distribusi Temperatur pada Daging Sapi Berbentuk Silinder .....	75
4.2	Analisis Distribusi Temperatur pada Daging Salmon Berbentuk Balok .....	86
4.3	Analisis Distribusi Temperatur pada FeTiO <sub>3</sub> .....	95
4.3.1	Analisis Distribusi Temperatur pada FeTiO <sub>3</sub> berbentuk Silinder .....	98
4.3.2	Analisis Distribusi Temperatur pada FeTiO <sub>3</sub> berbentuk Balok .....	119
4.3.3	Analisis Distribusi Temperatur pada FeTiO <sub>3</sub> di dalam Sistem Microwave Batch Furnace .....	140
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan.....	152
5.2	Saran.....	153
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>xxvii</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>xxxiii</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>		<b>xlix</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Frekuensi dan Panjang Gelombang Elektromagnetik .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Skema Propagasi Gelombang Elektromagnetik ....	10
<b>Gambar 2.3</b> Interaksi Material dengan Gelombang Mikro .....	11
<b>Gambar 2.4</b> Jenis material berdasarkan interaksinya terhadap gelombang mikro .....	15
<b>Gambar 2.5</b> Mekanisme Pemanasan akibat Medan Listrik. (a) Polarisasi Dipolar (b) Konduksi Ionik .....	18
<b>Gambar 2.6</b> Mekanisme Pemanasan akibat Medan Magnet. (a) Eddy Current Loss (b) Hysteresis Loss .....	21
<b>Gambar 2.7</b> Mekanisme Pemanasan akibat Medan Magnet. (a) Perpindahan Domain Wall (b) Terganggunya Putaran Elektron.....	22
<b>Gambar 2.8</b> Skema 3 Dimensi dari Objek (a) Silinder (b) Balok. Pada Bidang Gelombang Uniform, Medan Magnet Selalu Tegak Lurus terhadap Medan Listrik .....	23
<b>Gambar 2.9</b> Proses Analisis Menggunakan Metode Elemen Hingga .....	40
<b>Gambar 2.10</b> Konduksi Panas pada Objek Homogen .....	42
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	45
<b>Gambar 3.2</b> Geometri Microwave Batch Furnace .....	60
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Alir Pemodelan Menggunakan Metode Elemen Hingga .....	61
<b>Gambar 3.4</b> Input untuk Sifat Material .....	63
<b>Gambar 3.5</b> Hasil Meshing Daging Sapi Silinder .....	64
<b>Gambar 3.6</b> Hasil Meshing Daging Salmon Balok .....	64
<b>Gambar 3.7</b> Hasil Meshing Silinder $\text{FeTiO}_3$ .....	65
<b>Gambar 3.8</b> Hasil Meshing Balok $\text{FeTiO}_3$ .....	65
<b>Gambar 3.9</b> Hasil Meshing <i>Microwave Batch Furnace</i> .....	66
<b>Gambar 4.1</b> Gambar 4.1 Kontur Distribusi Temperatur untuk Pemanasan Daging Sapi Berdiameter 1 cm Selama 120 s (a) $l = 1,25$ cm, (b) $l = 2,5$ cm, (c) $l = 3,75$ cm	

	dan (d) $l = 5$ cm .....	77
<b>Gambar 4.2</b>	Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Silinder dengan Waktu yang Berbeda (a) $l = 1,25$ cm, (b) $l = 2,5$ cm, (c) $l = 3,75$ cm dan (d) $l = 5$ cm .....	80
<b>Gambar 4.3</b>	Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah Silinder untuk Frekuensi Pemanasan 2450 MHz .....	81
<b>Gambar 4.4</b>	Variasi Perbedaan Temperatur untuk Silinder dengan Ketinggian yang Berbeda .....	84
<b>Gambar 4.5</b>	Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur antara Perhitungan Pemodelan dengan ANSYS dan Hasil Analitis yang Dilakukan Hossan pada Saat $l = 1.25$ cm .....	85
<b>Gambar 4.6</b>	Kontur Distribusi Temperatur untuk Pemanasan Daging Salmon dengan Panjang dan Lebar Sebesar 7 cm dan 4 cm Selama 75 s (a) $b = 0,5$ cm, (b) $b = 1,5$ cm, (c) $b = 2,5$ cm dan (d) $b = 5$ cm .....	88
<b>Gambar 4.7</b>	Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah Balok untuk Frekuensi Pemanasan 2450 MHz .....	89
<b>Gambar 4.8</b>	Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Balok dengan Waktu yang Berbeda (a) $b = 0,5$ cm, (b) $b = 1,5$ cm, (c) $b = 2,5$ cm dan (d) $b = 5$ cm .....	93
<b>Gambar 4.9</b>	Variasi Perbedaan Temperatur untuk Balok dengan Ketebalan yang Berbeda .....	95
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur antara Perhitungan Pemodelan dengan ANSYS dan Hasil Analitis yang Dilakukan Hossan pada Saat $l = 1,5$ cm .....	97

- Gambar 4.11** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder Menggunakan *Microwave Batch Furnace* selama 4 menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm ..... 100
- Gambar 4.12** Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah Silinder  $\text{FeTiO}_3$  untuk Pemanasan Menggunakan *Microwave Batch Furnace* ..... 102
- Gambar 4.13** Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah  $\text{FeTiO}_3$  Silinder Seiring Bertambahnya Waktu (a)  $L = 1,5$  cm, (b)  $L = 3$  cm, (c)  $L = 4,5$  cm dan (d)  $L = 6$  cm ..... 105
- Gambar 4.14** Variasi Perbedaan Temperatur untuk  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Ketebalan yang Berbeda ..... 107
- Gambar 4.15** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Diameter 10 cm Selama Pemanasan 4 Menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm ..... 109
- Gambar 4.16** Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah  $\text{FeTiO}_3$  Silinder dengan Diameter 10 cm Seiring Bertambahnya Waktu (a)  $L = 1,5$  cm, (b)  $L = 3$  cm, (c)  $L = 4,5$  cm dan (d)  $L = 6$  cm ..... 112
- Gambar 4.17** Variasi Perbedaan Temperatur untuk Silinder  $\text{FeTiO}_3$  Berdiameter 10 cm dengan Ketebalan yang Berbeda ..... 113
- Gambar 4.18** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Diameter 7 cm pada Pemanasan Menggunakan

	<i>Microwave</i> Konvensional Selama 1 jam (a) l = 1.5 cm (b) l = 3 cm (c) l = 4.5 cm (d) l = 6 cm .....	116
<b>Gambar 4.19</b>	Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang FeTiO <sub>3</sub> Berbentuk Silinder dengan Diameter 10 cm pada Pemanasan Menggunakan <i>Microwave</i> Konvensional Selama 1 jam (a) l = 1,5 cm (b) l = 3 cm (c) l = 4,5 cm (d) l = 6 cm .....	118
<b>Gambar 4.20</b>	Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang FeTiO <sub>3</sub> Berbentuk Balok dengan Sisi 7 cm pada Pemanasan Menggunakan <i>Microwave Batch Furnace</i> Selama 4 Menit (a) b = 1,5 cm (b) b = 3 cm (c) b = 4,5 cm (d) b = 6 cm .....	121
<b>Gambar 4.21</b>	Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Balok FeTiO <sub>3</sub> dengan Diameter 7 cm Seiring Bertambahnya Waktu (a) b = 1,5 cm, (b) b = 3 cm, (c) b = 4,5 cm dan (d) b = 6 cm .....	124
<b>Gambar 4.22</b>	Variasi Perbedaan Temperatur untuk Balok FeTiO <sub>3</sub> Bersisi 7 cm dengan Ketebalan yang Berbeda .....	125
<b>Gambar 4.23</b>	Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang FeTiO <sub>3</sub> Berbentuk Balok dengan Sisi 10 cm pada Pemanasan Menggunakan <i>Microwave Batch Furnace</i> Selama 4 Menit (a) b = 1,5 cm (b) b = 3 cm (c) b = 4,5 cm (d) b = 6 cm .....	128
<b>Gambar 4.24</b>	Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Balok FeTiO <sub>3</sub> dengan Diameter 10 cm Seiring Bertambahnya Waktu (a) b = 1,5 cm, (b) b = 3 cm, (c) b = 4,5 cm dan (d) b = 6 cm .....	131

- Gambar 4.25** Variasi Perbedaan Temperatur untuk Balok  $\text{FeTiO}_3$  Bersisi 10 cm dengan Ketebalan yang Berbeda ..... 132
- Gambar 4.26** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Balok dengan Sisi 7 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave* Konvensional Selama 50 menit (a)  $b = 1,5$  cm (b)  $b = 3$  cm (c)  $b = 4,5$  cm (d)  $b = 6$  cm ..... 135
- Gambar 4.27** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Balok dengan Sisi 10 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave* Konvensional Selama 50 menit (a)  $b = 1,5$  cm (b)  $b = 3$  cm (c)  $b = 4,5$  cm (d)  $b = 6$  cm ..... 137
- Gambar 4.28** Laju Kenaikan Temperatur pada Sampel Balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan Sisi 7 cm ..... 138
- Gambar 4.29** Laju Kenaikan Temperatur pada Sampel Balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan Sisi 10 cm ..... 139
- Gambar 4.30** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan *Microwave Batch Furnace* dengan Sumber Berasal dari 1 Sisi Selama 12 Menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm . 143
- Gambar 4.31** Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan *Microwave Batch Furnace* dengan Sumber Berasal dari 2 Sisi Selama 18 Menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm . 145
- Gambar 4.32** Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah  $\text{FeTiO}_3$  untuk Pemanasan Menggunakan *Microwave Batch Furnace* dengan Sumber Pemanasan 1 Sisi .. 146
- Gambar 4.33** Variasi Perbedaan Temperatur pada

	Pemanasan di Dalam <i>Microwave Batch</i> <i>Furnace</i> dengan Sumber 1 Sisi .....	148
<b>Gambar 4.34</b>	Variasi Perbedaan Temperatur pada Pemanasan di Dalam <i>Microwave Batch Furnace</i> dengan Sumber 2 Sisi .....	149

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Jenis Gelombang Mikro Berdasarkan Frekuensi Kerjanya .....	9
<b>Tabel 2.2</b>	Kemampuan Material dalam Penyerapan Gelombang Mikro .....	16
<b>Tabel 3.1</b>	Sifat Dielektrik Daging Sapi pada Frekuensi 2450 MHz.....	47
<b>Tabel 3.2</b>	Sifat Termal Daging Sapi .....	48
<b>Tabel 3.3</b>	Sifat Dielektrik Daging Salmon pada Frekuensi 2450 MHz .....	48
<b>Tabel 3.4</b>	Sifat Termal Daging Salmon .....	48
<b>Tabel 3.5</b>	Sifat Dielektrik dan Densitas Ilmenite pada Frekuensi 2450 MHz .....	49
<b>Tabel 3.6</b>	Kapasitas Panas Spesifik Ilmenite .....	49
<b>Tabel 3.7</b>	Konduktivitas Termal Ilmenite .....	50
<b>Tabel 3.8</b>	Tabel Komposisi Kimia baja AISI 1006 .....	51
<b>Tabel 3.9</b>	Kapasitas Panas Spesifik baja AISI 1006.....	52
<b>Tabel 3.10</b>	Konduktivitas Termal baja AISI 1006.....	53
<b>Tabel 3.11</b>	Densitas baja AISI 1006.....	54
<b>Tabel 3.12</b>	Konduktivitas Termal Keramik Alumina-Silika .....	55
<b>Tabel 3.13</b>	Kapasitas Panas Spesifik Keramik Alumina-Silika .....	56
<b>Tabel 3.14</b>	Kapasitas Panas Spesifik Aluminium 6061-T6 .....	56
<b>Tabel 3.15</b>	Konduktivitas Termal Aluminium 6061-T6.....	57
<b>Tabel 3.16</b>	Densitas Aluminium 6061-T6 .....	57
<b>Tabel 3.17</b>	Geometri dari Daging Sapi .....	58
<b>Tabel 3.18</b>	Geometri dari Daging Salmon .....	58
<b>Tabel 3.19</b>	Geometri dari Wadah crucible .....	59
<b>Tabel 3.20</b>	Rancangan Penelitian untuk Pemanasan Daging Sapi .....	68
<b>Tabel 3.21</b>	Rancangan Penelitian untuk Pemanasan Daging Salmon .....	68
<b>Tabel 3.22</b>	Rancangan Penelitian untuk $\text{FeTiO}_3$ .....	70
<b>Tabel 3.23</b>	Rancangan Penelitian untuk $\text{FeTiO}_3$ di Dalam Sistem <i>Microwave Batch Furnace</i> .....	73

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR SIMBOL

$A$	Koefisien (V/m)
$B$	Koefisien (V/m)
$\vec{B}$	Induksi magnetik (Wb/m <sup>2</sup> )
$b$	Ketebalan dari objek balok (m)
$C$	Kecepatan cahaya (m/s)
$c_p$	Kapasitas panas spesifik (J/kg.K)
$\vec{D}$	<i>Electric displacement</i> (C/m <sup>2</sup> )
$D_p$	Kedalaman Penetrasi (m)
$D_s$	Ketebalan kulit (m)
$\vec{E}$	Kuat medan listrik (V/m)
$E_0$	Kuat medan listrik yang terjadi (V/m)
$E_{rms}$	Akar kudrat rata – rata dari medan listrik (V/m)
$f$	Frekuensi (Hz)
$\vec{H}$	Kuat medan magnet (A/m)
$H_{rms}$	Akar kudrat rata – rata dari medan magnet (A/m)
$h$	koefisien heat transfer (W/m <sup>2</sup> K)

$I$	Fluks energi akibat gelombang mikro (W/m <sup>2</sup> )
$\vec{J}$	Rapat arus (A/m <sup>2</sup> )
$K$	Faktor Kernel
$k$	Konduktivitas termal (W/m.K)
$L$	Panjang dari objek silinder (m)
$N$	Integral normalisasi
$\vec{n}$	Satuan vektor normal
$P_y$	Energi yang terserap (W)
$P_0$	Energi yang terjadi pada permukaan material (W)
$Q$	Generasi panas (W/m <sup>3</sup> )
$\vec{q}$	Vektor Poynting
$R_{01}$	Koefisien Refleksi
$r$	Jari – jari objek (m)
$T$	Temperatur (° K)
$t$	Waktu (s)
$T_{01}$	Koefisien Transmisi
$y$	Jarak dimana energi diukur (m)
$z$	Arah aksial

### *Simbol Yunani*

$\alpha$	Difusivitas termal ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\beta$	Faktor Atenuasi ( $\text{rad}/\text{m}$ )
$\chi$	Konstanta propagasi ( $\text{m}^{-1}$ )
$\delta$	Sudut fasa ( $\text{rad}$ )
$\varepsilon$	Permitivitas ( $\text{F}/\text{m}$ )
$\varepsilon_0$	Pemitivitas ruang hampa ( $\text{F}/\text{m}$ )
$\gamma$	Rasio antara koefisien heat transfer dan konduktivitas termal ( $\text{m}^{-1}$ )
$\phi$	Arah azimut
$\zeta$	Impedansi ( $\Omega$ )
$\theta$	Temperatur yang termodifikasi ( $^{\circ}\text{K}$ )
$\kappa'$	Konstanta dielektrik
$\kappa''$	Dielektrik loss
$\mu$	Permeabilitas magnetik ( $\text{H}/\text{m}$ )
$\mu_0$	Permeabilitas magnetik udara ( $\text{H}/\text{m}$ )
$\rho$	Densitas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_v$	Rapat muatan listrik ( $\text{C}/\text{m}^3$ )
$\sigma$	Faktor fasa ( $\text{rad}/\text{m}$ )
$\sigma'$	Konduktivitas listrik ( $\text{S}/\text{m}$ )
$\omega$	Kecepatan sudut ( $\text{rad}/\text{s}$ )
$\lambda_0$	Panjang gelombang yang terjadi ( $\text{m}$ )

$\rho'$  Resistivitas Listrik ( $\Omega\text{m}$ )

***Subscript***

$i$  Awal

$m$  Indeks Eigenvalue

$n$  Indeks Eigenvalue

$\infty$  Sekitar

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Gelombang mikro merupakan salah satu spektrum gelombang elektromagnetik yang sudah banyak ditemukan aplikasinya dalam kehidupan sehari – hari seperti untuk menghangatkan bahan makanan dan bahan organik, penyiaran saluran televisi dan pemanfaatan radar. Di samping itu, gelombang mikro juga memiliki potensi yang menjanjikan apabila digunakan dalam proses pengolahan logam dan mineral karena tingginya biaya bahan bakar menyebabkan industri pengolahan logam dan mineral berlomba – lomba untuk mencari metode pemanasan yang lebih cepat, efisien dan ekonomis (Benedetto, 2010). Dibandingkan dengan proses pemanasan konvensional, pemanasan dengan gelombang mikro lebih memiliki banyak keuntungan seperti tidak adanya polusi yang dihasilkan, prosesnya cepat, lebih mudah dikontrol dan *energy lost* yang terjadi sangat minimal (Mishra, 2013). Oleh karena itu, pemanasan gelombang mikro merupakan salah satu alternatif yang tepat untuk menjawab tantangan di dalam sektor industri yang mengharuskan proses produksinya memiliki efisiensi yang tinggi, hemat waktu dan ramah lingkungan.

Proses perambatan gelombang mikro pada material, seperti logam dan mineral sangat bergantung pada sifat dielektrik bahan tersebut, seperti konstanta dielektrik dan *dielectric loss*. Perambatan ini mengakibatkan terciptanya generasi panas secara volumetrik. Meskipun gelombang mikro merambat secara volumetrik, pemanasan yang tidak merata masih sering dijumpai dan hal ini menyebabkan terjadinya *overheating* atau terbakarnya beberapa bagian dari material (Acevedo, 2015). Kondisi ini diakibatkan oleh adanya gelombang yang terkumpul pada satu titik sehingga terdapat daerah yang terbakar dan di daerah lain temperaturnya minimum. Selain itu, penyebaran panas yang tidak merata juga dapat mempengaruhi fasa yang terjadi di dalam



material. Jika terjadi perbedaan temperatur terlalu signifikan pada beberapa daerah di dalam logam atau mineral, maka fasa yang ingin dicapai setelah proses pemanasan tidak akan tercapai seluruhnya dan hal ini akan mengakibatkan sifat dari produk akhir sangat berbeda jauh dari yang diharapkan (Chandrasekaran, 2011).

Karena kompleksnya tantangan dalam proses pemanasan logam dan mineral menggunakan gelombang mikro, simulasi numerik dan pemodelan matematis menjadi salah satu metode yang diperlukan dalam membantu para peneliti untuk mengobservasi, mengontrol dan memprediksi fenomena yang terjadi, terutama untuk memahami terjadinya pemanasan yang tidak merata dalam sistem pemanasan gelombang mikro. Analisis dengan menggunakan Metode Elemen Hingga merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk menyelesaikan dan memberikan solusi atas permasalahan tersebut. Metode Elemen Hingga merupakan metode yang tepat untuk meneliti fenomena yang terjadi selama proses pemanasan dengan gelombang mikro karena lebih fleksibel dan lebih menguntungkan ketika benda yang kompleks diaplikasikan (Metaxas, 1997).

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan sebagai objek studi adalah daging sapi berbentuk silinder dan potongan balok daging ikan salmon yang kemudian diaplikasikan pada mineral ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ). Ilmenite dipilih karena mineral ilmenit merupakan salah satu mineral yang penting dan memiliki harga jual yang tinggi apabila dapat diekstrak menjadi titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) yang sering diaplikasikan sebagai bahan utama dalam pembuatan pigmen rutil. Pigmen ini banyak digunakan pada industri cat, tinta, kertas, pulp dan aplikasi pewarnaan lainnya. Proses pemanasan ilmenite ini disimulasikan dengan menggunakan aplikasi ANSYS yang berprinsip pada metode elemen hingga. Aplikasi ANSYS dipilih karena lebih efisien dan dapat digunakan dalam berbagai disiplin ilmu keteknikan (Madenci, 2015).



## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang digunakan dalam penelitian antara lain:

1. Bagaimana cara simulasi distribusi temperatur akibat radiasi gelombang mikro dalam objek berbentuk silinder dan balok ?
2. Bagaimana analisis distribusi temperatur dalam ilmenite akibat pemanasan menggunakan gelombang mikro dan pengaruh geometri, bentuk objek serta daya pemanasan terhadap distribusi temperatur ?
3. Bagaimana analisis distribusi temperatur yang terjadi dalam proses pemanasan ilmenite di dalam sistem *Microwave Batch Furnace* dan pengaruh geometri dan arah sumber pemanasan terhadap distribusi temperatur ?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengotor di dalam mineral Ilmenite diabaikan.
2. Dianggap tidak ada panas yang keluar maupun masuk dari sistem (adiabatik).
3. Sifat dielektrik material dianggap tidak terpengaruh oleh perubahan temperatur (independen).
4. Sifat konduktivitas termal, panas spesifik dan densitas dari daging sapi dan daging salmon dianggap tidak terpengaruh oleh perubahan temperatur (independen).
5. Densitas dari Ilmenite dan keramik silika-alumina dianggap tidak terpengaruh oleh perubahan temperatur (independen).
6. Densitas Ilmenite yang digunakan diasumsikan menggunakan densitas yang telah terkompaksi.
7. Crucible dianggap dapat mentransmisikan 100 % gelombang mikro yang datang.



#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang diharapkan dari penelitian adalah :

1. Mensimulasikan distribusi temperatur akibat radiasi gelombang mikro dalam objek berbentuk silinder dan balok.
2. Menyelidiki dan menganalisis distribusi temperatur yang terjadi dalam ilmenite akibat pemanasan menggunakan gelombang mikro serta pengaruh geometri, bentuk objek serta daya pemanasan terhadap distribusi temperatur.
3. Menyelidiki dan menganalisis distribusi temperatur yang terjadi dalam proses pemanasan ilmenite di dalam sistem *Microwave Batch Furnace* dan pengaruh geometri dan arah sumber pemanasan terhadap distribusi temperatur.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Dengan penelitian ini diharapkan dapat diketahui informasi dimensi objek yang maksimum ketika diradiasi oleh gelombang mikro dan dapat diaplikasikan di dalam proses pengolahan mineral, khususnya Ilmenite menggunakan pemanasan gelombang mikro, serta memberikan kontribusi dalam bidang simulasi dan pemodelan khususnya dalam proses pengolahan material menggunakan gelombang mikro sehingga dapat dimanfaatkan sebagai referensi penelitian berikutnya khususnya di Teknik Material dan Metalurgi ITS.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Simulasi Pemanasan Material dengan Gelombang Mikro**

Pemanasan dengan gelombang mikro telah banyak diaplikasikan dalam proses penghangatan bahan makanan secara cepat. Tidak seperti pada proses pemanasan pada umumnya, dimana panas berpindah dari permukaan luar menuju inti bahan, panas yang dihasilkan dalam proses pemanasan menggunakan gelombang mikro, muncul dari dalam bahan akibat transmisi gelombang elektromagnetik dan panas tersebut dapat berpindah ke segala arah. Pemanasan dengan gelombang mikro merupakan metode yang efisien karena selain prosesnya yang cepat, metode ini juga ramah lingkungan dan tidak menimbulkan polusi. Oleh karena itu, metode ini menjadi populer dan banyak diaplikasikan di tidak hanya di bidang industri makanan, melainkan juga industri kayu, tekstil, bioteknologi, pengolahan material dan sebagainya.

Walaupun prosesnya berjalan dengan cepat, namun teknik pemanasan dengan gelombang mikro ini memiliki kekurangan yakni adanya distribusi temperatur yang tidak merata selama proses pemanasan, dimana terdapat perbedaan temperatur yang signifikan. Akibat perbedaan temperatur ini, dapat menyebabkan beberapa konsekuensi seperti, adanya bagian material yang terbakar karena di salah satu bagian temperatur sudah terlalu tinggi sedangkan bagian lain temperatur masih rendah. Selain itu, penyebaran panas yang tidak merata juga dapat mempengaruhi tekstur akhir yang dihasilkan setelah proses pemanasan. Sehingga, hasil yang ingin dicapai setelah proses pemanasan tidak akan sesuai prediksi dan hal ini akan mengakibatkan sifat dari produk akhir sangat berbeda jauh dari yang diharapkan. Sedangkan untuk bahan makanan, adanya perbedaan temperatur yang besar juga dapat menyebabkan masih adanya bakteri – bakteri berbahaya tinggal di dalam bagian bahan yang masih bertemperatur rendah. Oleh karena itu, untuk menghindari dampak akibat penyebaran



panas yang tidak merata selama proses pemanasan dengan gelombang mikro, banyak peneliti tertarik untuk mengoptimalkan proses pemanasan dengan gelombang mikro baik secara eksperimental maupun simulasi. Karena penyebaran panas yang tidak merata dapat disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya sifat dielektrik dari material, seberapa dalam gelombang mikro dapat menembus material, ketebalan material, bentuk material dan ukuran dari produk (Goksoy,1999).

Yang menjadi acuan pertama dalam penelitian ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Oliveira pada tahun 2002 tentang simulasi proses pemanasan gelombang mikro beragam produk makanan seperti daging sapi, udang, dan kentang pada beragam frekuensi radiasi. Dalam penelitian ini metode simulasi yang digunakan adalah metode elemen hingga secara dua dimensi (2D). Kemudian pada tahun 2003, Funawatashi dan Suzuki telah menyimulasikan proses pemanasan suatu material dielektrik dengan gelombang mikro menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) dan mendapatkan bahwa adanya penyebaran panas yang tidak merata dipengaruhi oleh posisi material dielektrik dan besar gelombang mikro yang meradiasi. Selanjutnya pada tahun 2004, Yang dan Gunasekaran berhasil memprediksi distribusi temperatur pada agar – agar berbentuk silinder dan menyatakan bahwa teorema Poynting lebih akurat dibandingkan dengan Hukum Lambert dalam memperhitungkan generasi panas yang dihasilkan selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro. Romano (2005) juga menguatkan dengan penelitiannya tentang pemodelan pemanasan dengan gelombang mikro pada bahan makanan menggunakan metode elemen hingga bahwa penyebaran panas yang tidak merata juga dipengaruhi oleh dimensi sampel. Lalu pada tahun 2010, Hossan melakukan penelitian tentang penyelesaian analitis distribusi temperatur pada proses pemanasan gelombang mikro dari daging sapi berbentuk silinder dengan ketebalan yang berbeda – beda, kemudian pada tahun 2011, ia juga melanjutkan risetnya tentang penyelesaian analitis distribusi temperatur pada proses pemanasan



gelombang mikro dari daging salmon berbentuk fillet dengan ketebalan yang berbeda - beda dan menyatakan bahwa penyebaran temperatur yang tidak merata dipengaruhi oleh bentuk dan dimensi dari sampel yang dipanaskan. Selain itu pada tahun 2012, ia melanjutkan kembali risetnya tentang pengaruh sifat dielektrik material terhadap distribusi temperatur selama proses pemanasan dengan gelombang mikro.

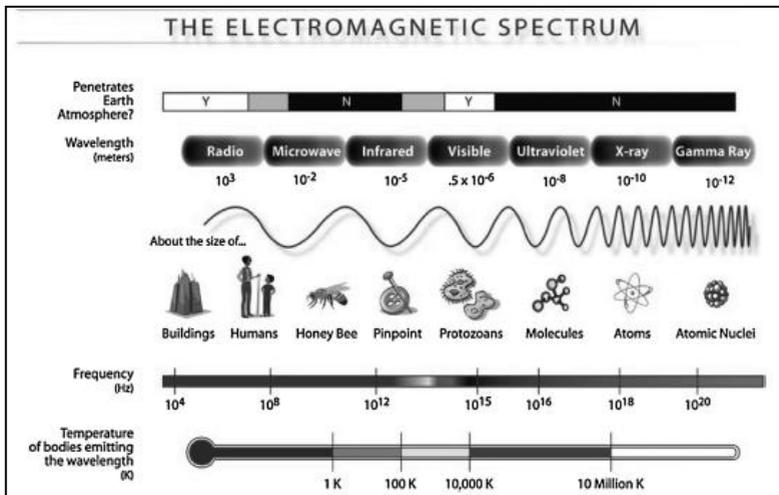
Selain berfokus pada meminimalisir perbedaan temperatur yang terjadi selama pemanasan gelombang mikro, beberapa penelitian dilaporkan juga menggunakan simulasi dan pemodelan sebelum melakukan proses pemanasan gelombang mikro pada bermacam – macam material. Pada tahun 2008, Buchelnikov dkk menjelaskan secara teoritis mekanisme penetrasi gelombang mikro dalam lapisan serbuk logam. Kemudian pada tahun 2010, Lovas menyatakan bahwa sifat permitivitas dari mineral *andesite*, sulfida dan karbonat dapat mempengaruhi perubahan temperatur selama proses pemanasan dengan gelombang mikro pada frekuensi 2216 MHz. Yakovlev (2011) telah berhasil memodelkan proses pemanasan zirkonia berbentuk silinder dengan gelombang mikro dan menganalisis pengaruh frekuensi gelombang dan sifat material yang bergantung terhadap temperatur.

Berdasarkan penelitian yang telah disebutkan di atas mengenai simulasi proses pemanasan gelombang mikro untuk meminimalisir perbedaan temperatur yang terjadi, dibutuhkan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga secara 3 dimensi dan berdasarkan teorema Poynting untuk melihat fenomena yang terjadi yang kemudian proses simulasi tersebut diaplikasikan pada suatu material, yakni Ilmenite. Metode elemen hingga dipilih karena metode elemen hingga lebih fleksibel, familiar dan lebih menguntungkan ketika benda kompleks diaplikasikan.



## 2.2 Gelombang Mikro

Gelombang mikro adalah salah satu jenis gelombang elektromagnetik dengan besar panjang gelombang antara 1 cm hingga 1 m seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Gelombang ini memiliki rentang frekuensi antara 300 MHz hingga 30 GHz untuk 1 cm panjang gelombangnya (Collin, 2001). Berdasarkan frekuensi kerjanya, gelombang mikro dapat dibagi menjadi bermacam – macam jenis seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.



Gambar 2. 1 Frekuensi dan Panjang Gelombang Elektromagnetik  
(Sumber: Gupta, 2007)

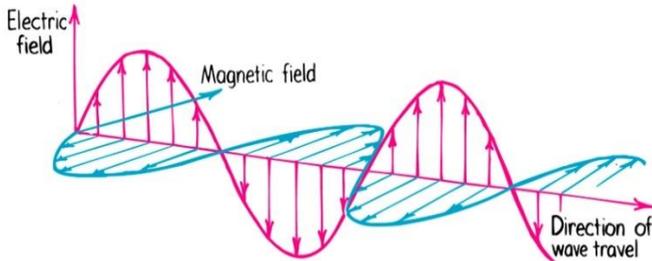


Tabel 2. 1 Jenis Gelombang Mikro Berdasarkan Frekuensi Kerjanya

Jenis Gelombang Mikro	Frekuensi Kerja
Medium frequency	300 kHz–3 MHz
High frequency (HF)	3 MHz–30 MHz
Very high frequency (VHF)	30 MHz–300 MHz
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz–3 GHz
Super high frequency (SHF)	3 GHz – 30 GHz
Extremely high frequency (EHF)	30 Hz – 300 GHz

(Sumber: David M. Pozar, 2012)

Pada umumnya, gelombang mikro banyak dimanfaatkan dalam bidang telekomunikasi sejak zaman perang dunia kedua. Namun pada tahun 1946, Spencer untuk pertama kali melakukan eksperimen dengan memanfaatkan gelombang mikro untuk memanaskan material dan mulai dipublikasikan pada tahun 1950. Sejak saat itu, gelombang mikro menjadi salah satu potensi yang menjanjikan dan banyak diimplementasikan dalam proses – proses pengolahan baru di dunia industri seperti untuk memasak makanan, penemperan, pencairan, proses *curing* dari produk kayu, pengolahan limbah medis, devulkanisir karet, dan perlakuan panas pada beberapa material seperti endapan lumpur, limbah kimia pada industri perminyakan dan aplikasi di bidang nuklir. Sehingga selanjutnya, pemanasan gelombang mikro menjadi sangat populer untuk pengolahan material berbasis keramik, polimer dan logam serta material – material maju seperti komposit bermatriks logam (MMC), komposit bermatriks keramik (CMC) dan komposit bermatriks polimer (PMC) (Clark,1996).



Gambar 2. 2 Skema Propagasi Gelombang Elektromagnetik  
(Sumber: Paul G. Hewitt, 2006)

Gelombang mikro merupakan salah satu gelombang elektromagnetik yang terdiri atas gabungan gelombang listrik dan gelombang magnet yang merambat saling tegak lurus satu sama lain dan tegak lurus terhadap arah propagasinya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Mekanisme propagasi dan eksitasi gelombang mikro dapat dipelajari melalui persamaan Maxwell yang ditunjukkan sebagai berikut (Roussy,1995):

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

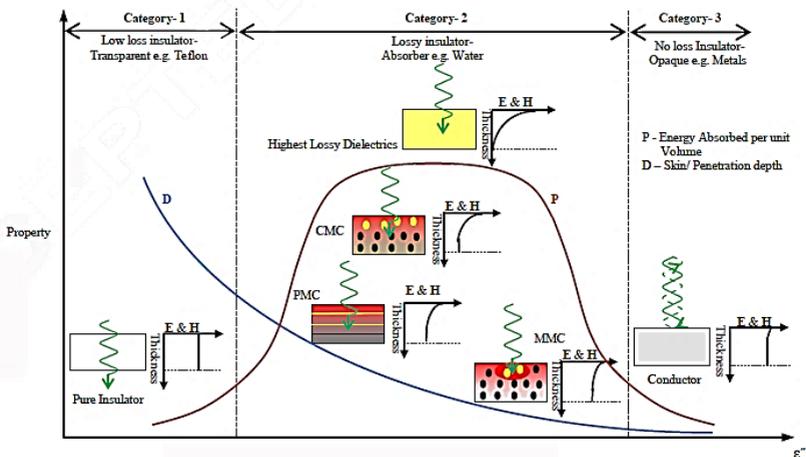
dimana

$\vec{E}$	= medan listrik (V/m)
$\vec{B}$	= induksi magnetik (Wb/m <sup>2</sup> )
$\vec{H}$	= medan magnet (A/m)
$\vec{J}$	= kerapatan arus (A/m <sup>2</sup> )
$\vec{D}$	= <i>electric displacement</i> (C/m <sup>2</sup> )
$\rho_v$	= rapat muatan listrik (C/m <sup>3</sup> )



### 2.3 Interaksi Material dengan Gelombang Mikro

Beragam material menunjukkan karakteristik yang berbeda dalam penyerapan gelombang mikro pada saat saling saling berinteraksi, tergantung dari besarnya kekuatan medan listrik ( $E$ ) dan kekuatan medan magnet ( $M$ ) yang dapat menembus ketebalan suatu material. Hubungan antara kekuatan medan listrik dan medan magnet yang beragam terhadap ketebalan material dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Mishra, 2015).



Gambar 2. 3 Interaksi Material dengan Gelombang Mikro  
(Sumber: Mishra, 2015)

Dari ilustrasi diatas dapat dilihat bahwa semakin besar nilai ketebalan suatu material, maka didapatkan bahwa semakin turun pula nilai kekuatan medan listrik dan kekuatan medan magnetnya. Dari Gambar 2.3 dapat dilihat pula bahwa material dengan kategori 1 menunjukkan tidak mengalami penurunan medan listrik dan medan magnet sama sekali. Berbeda dengan material kategori 2 yang menunjukkan nilai penurunan kekuatan medan listrik dan



medan magnet seiring dengan meningkatnya faktor *dielectric loss* ( $\epsilon''$ ). Sedangkan pada material berkategori 3 terjadi penurunan kekuatan medan listrik dan medan magnet yang sangat kecil atau bisa diabaikan pada kenaikan ketebalan material beberapa mikro, kemudian kembali stabil pada ketebalan yang lebih tinggi.

Besar energi gelombang mikro yang diserap per unit volume suatu material merupakan fungsi dari salah satu sifat material, yaitu faktor *dielectric loss* ( $\epsilon''$ ), yang juga dipengaruhi oleh kekuatan medan listrik dari gelombang mikro itu sendiri. Untuk material yang tipis, besar energi gelombang mikro yang diserap per unit volume berbanding lurus terhadap faktor *dielectric loss* dan hubungan tersebut ditunjukkan oleh persamaan berikut (Thostenson, 1999) :

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E_{rms}^2 + 2\pi f \mu_0 \mu'' H_{rms}^2 \quad (2.5)$$

dimana :

- $\mu_0$  = permeabilitas magnetik udara (H/m)
- $\mu''$  = permeabilitas magnetik komponen imajiner / *magnetic loss factor* (H/m)
- $E_{rms}$  = Akar kudrat rata – rata dari medan listrik (V/m)
- $H_{rms}$  = Akar kudrat rata – rata dari medan magnet (A/m)

Sedangkan untuk material yang tebal, kekuatan medan magnet akan menurun seiring bertambah tebalnya suatu material dan konsep dari kedalaman penetrasi gelombang mikro menjadi lebih diperhatikan sesuai dengan persamaan berikut (Chandrasekaran, 2012) :

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\kappa''} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{\kappa''}{\kappa'}\right]^2}\right) - 1} \right\}}} \quad (2.6)$$



$$D_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma'}} = 0.029 (\rho' \lambda_0)^{0.5} \quad (2.7)$$

$$P_y = P_0 e^{-2\beta y} \quad (2.8)$$

dimana:

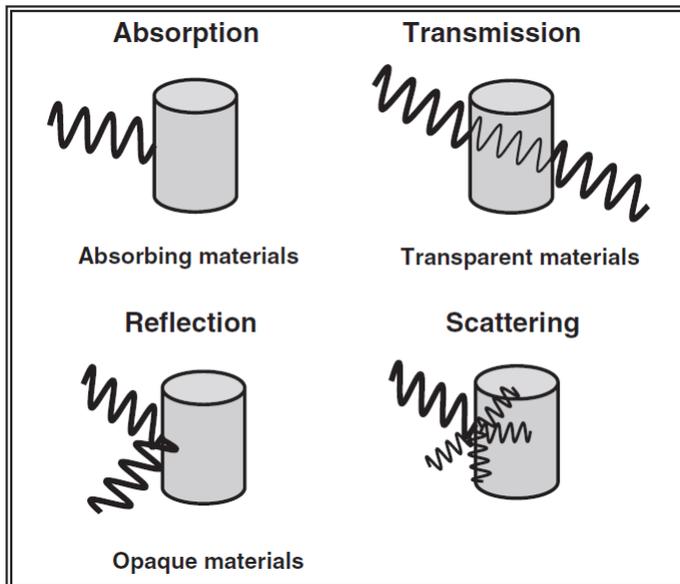
$D_p$	= Kedalaman Penetrasi (m)
$\kappa''_{eff}$	= faktor <i>dielectric loss</i> efektif (F/m)
$\kappa'$	= konstanta dielektrik (F/m)
$\epsilon_0$	= permitivitas ruang hampa (F/m)
$D_s$	= Ketebalan kulit (m)
$f$	= Frekuensi (Hz)
$\sigma'$	= Konduktivitas listrik (S/m)
$\rho'$	= Resistivitas Listrik ( $\Omega\text{m}$ )
$\lambda_0$	= Panjang gelombang yang terjadi (m)
$P_y$	= Energi yang terserap (W)
$P_0$	= Energi yang terjadi pada permukaan material (W)
$y$	= Jarak dimana energi diukur (m)
$\beta$	= Faktor Atenuasi (dB/m)

Beberapa material seperti teflon, *quartz*, dan beberapa material yang memiliki nilai faktor *dielectric loss* hampir mendekati 0 menunjukkan bahwa material tersebut dapat menyerap energi gelombang mikro per satuan unit volume dan memiliki kedalaman penetrasi gelombang mikro yang tinggi juga. Dengan semakin naiknya faktor dielectric loss pada suatu material, maka kemampuan penyerapan energi gelombang mikro per unit volume ikut meningkat namun kedalaman penetrasinya menjadi berkurang. Karakteristik seperti itu banyak ditemukan pada material *lossy* dan material tersebut sangat cocok digunakan dalam proses pengolahan menggunakan gelombang mikro. Nilai faktor dielectric loss tertinggi ditunjukkan oleh sebagian material yang berbasis logam. Material ini dapat memantulkan pancaran gelombang mikro dan menyebabkan penyerapan energi gelombang mikro menjadi kecil (Thostenson, 1999).



Berdasarkan interaksinya terhadap gelombang mikro dan kemampuannya dalam menyerap energi gelombang mikro, material dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis dengan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4, yakni:

1. Material Transparan  
Material ini memiliki nilai *dielectric loss* yang rendah atau sering disebut material isolator. Gelombang mikro dapat dengan mudah melewati material transparan tanpa mengalami penyerapan. Contoh : Teflon, gelas, udara dan quartz.
2. Material Absorber  
Material ini memiliki sifat beragam dari yang paling konduktor hingga paling isolator. Nilai *dielectric loss*nya yang tinggi menyebabkan energi elektromagnetik dapat diserap dan dikonversikan menjadi panas. Contoh: Air dan SiC.
3. Material Buram (*Opaque*)  
Material ini didominasi oleh sebagian besar material konduktor. Gelombang mikro dengan mudah dipantulkan dan penyerapan energi gelombang mikro hanya terjadi pada bagian permukaan material dan besar energi yang dapat diserap sangatlah kecil. Contoh: Sebagian besar logam; baja, aluminium dan sebagainya.
4. Material Semi-Absorber  
Material ini memiliki dua fasa atau lebih dimana salah satu fasa memiliki nilai *dielectric loss* tinggi sedangkan fasa lain nilainya rendah. Material ini dapat menyerap gelombang mikro dengan mengkonversi energi yang terlokalisasi. Contoh: Sebagian besar komposit baik MMC, CMC dan PMC.



Gambar 2. 4 Jenis Material Berdasarkan Interaksinya Terhadap Gelombang Mikro  
(Sumber: Gupta, 2007)

Interaksi antara beberapa mineral dengan gelombang mikro dapat ditunjukkan pada Tabel 2.2. Beberapa mineral memiliki interaksi yang baik dengan gelombang mikro sehingga dapat dengan mudah menyerap panas dan mineral dengan sifat seperti ini dapat digolongkan sebagai material absorber. Sedangkan mineral yang memiliki interaksi yang kurang baik dengan baik dapat digolongkan menjadi material transparan atau material buram. Ilmenite termasuk dalam golongan material absorber sehingga disimpulkan ilmenite dapat dipanaskan dengan gelombang mikro.



Tabel 2. 2 Kemampuan Material dalam Penyerapan Gelombang Mikro

Mineral	Pemanasan microwave
<i>Pyrrhotite</i> ( $Fe_{1-x}S$ )	Cepat panas
<i>Pentlandite</i> ( $Fe.Ni$ ) <sub>9</sub> S	Cepat panas
<i>Chalcopyrite</i> ( $CuFeS_2$ )	Cepat panas
<i>Ilmenite</i> ( $FeTiO_3$ )	Cepat panas
<i>Magnetite</i> ( $Fe_3O_4$ )	Cepat panas
<i>Plagioclase</i> ( $Na,Ca$ )( $Si,Al$ ) <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	Tidak panas
<i>Pyroxene</i> ( $Ca,Na$ )( $Mg,Al,Fe,Ti$ )( $Si,Al$ ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Tidak panas

(sumber: Cober Electronic, 1998)

## 2.4 Mekanisme Pemanasan dengan Gelombang Mikro

Mekanisme terjadinya generasi panas selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro sangatlah kompleks. Sebagai salah satu spektrum gelombang elektromagnetik, gelombang mikro terdiri atas komponen medan listrik dan komponen medan magnet. Komponen yang berbeda ini menyebabkan terjadinya mekanisme yang berbeda pula. Medan listrik dan medan magnet ini dapat mengacaukan orientasi, posisi dan perpindahan momen dipol, elektron bebas, *domain wall* dan putaran elektron. Sehingga mekanisme terjadinya panas akibat radiasi gelombang mikro dapat dibagi menjadi dua yaitu mekanisme pemanasan akibat medan listrik dan mekanisme pemanasan akibat medan magnet (Crane, 2013).

### 2.4.1 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Listrik

Komponen medan listrik pada gelombang mikro berperan penting dalam pemanasan dielektrik. Pada rentang frekuensi kerja dari gelombang mikro, pemanasan dielektrik dipengaruhi oleh dua mekanisme yaitu polarisasi dipolar dan konduksi ionik. Pada mekanisme polarisasi, dipol sangat sensitif terhadap medan listrik



eksternal dan akan berusaha untuk menyesuaikan diri pada medan tersebut dengan cara berotasi. Pada frekuensi yang lebih tinggi, dipol tidak memiliki waktu yang cukup untuk merespon medan yang berosilasi sehingga menyebabkan dipol – dipol saling bertabrakan satu sama lain ketika mereka mencoba untuk mengikuti medan listrik yang diberikan. Akibat tabrakan antar dipol tersebut, dihasilkan panas di dalam material. Mekanisme ini dapat terjadi pada beberapa material polar dan air. Sedangkan pada mekanisme konduksi, setiap mobilitas pembawa muatan bergerak maju mundur di dalam material akibat pengaruh medan listrik dari gelombang mikro, sehingga menyebabkan arus listrik. Timbulnya arus tersebut menyebabkan terjadinya pemanasan secara induksi pada sampel karena adanya hambatan listrik akibat terjadinya tabrakan antara muatan tersebut dengan molekul ataupun atom di sebelahnya (Jing Sun, 2016). Ilustrasi yang lebih rinci dapat dijelaskan melalui Gambar 2.5.

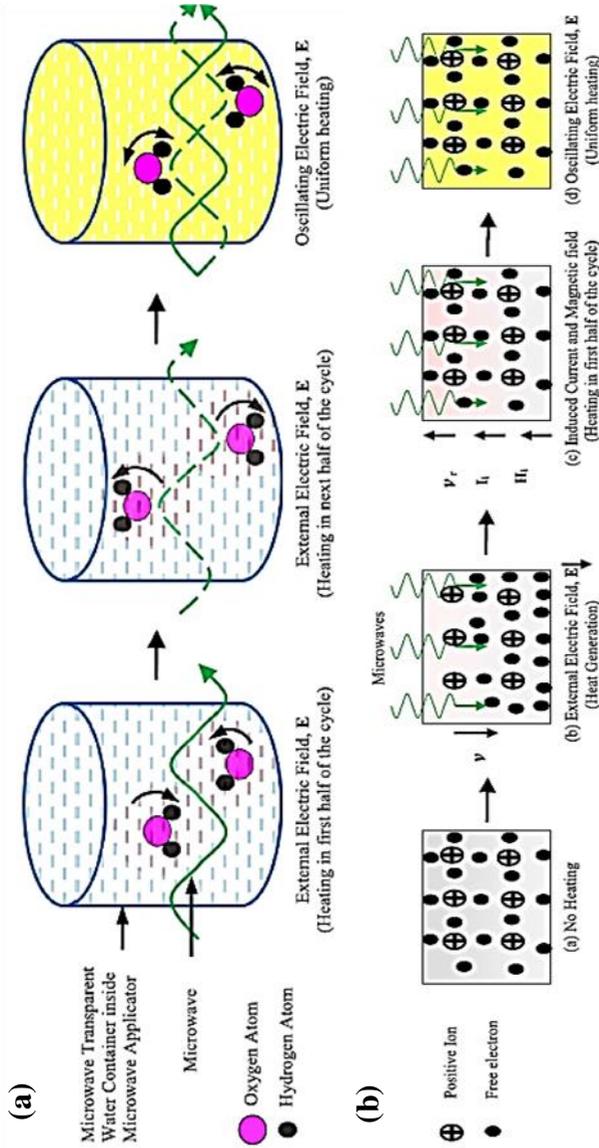
Untuk mengetahui besar energi yang dihasilkan akibat pemanasan dielektrik dapat ditunjukkan oleh persamaan (Rosa, 2013) :

$$P = \omega \cdot \kappa''_{eff} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2_{rms} \quad (2.9)$$

dimana P menunjukkan rapat energi suatu material ( $W/m^3$ ) pada tiap posisi ( $x,y,z$ ),  $\omega = 2\pi f$  (Hz),  $f$  adalah frekuensi gelombang mikro yang terjadi,  $\epsilon''_{eff}$  adalah faktor dielectric loss efektif,  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang hampa ( $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m),  $E_{rms}$  menunjukkan medan listrik lokal (V/m).

Dengan pertimbangan polarisasi dipolar, konduksi ionik dan polarisasi Maxwell-Wagner, maka faktor dielectric loss efektif ( $\epsilon''_{eff}$ ) untuk pemanasan dielektrik dapat dinyatakan sebagai :

$$\kappa''_{eff} = \kappa''_{Polarisasi} + \kappa''_{Konduksi} = \kappa''_{dipolar} + \kappa''_{interfacial} + \sigma' / \omega \epsilon_0 \quad (2.10)$$



Gambar 2.5 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Listrik. (a) Polarisasi Dipolar

(b) Konduksi Ionik

(Sumber : Mishra, 2016)



## 2.4.2 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Magnet

Medan magnet memiliki kontribusi besar dalam pemanasan gelombang mikro terutama untuk material – material magnetik, seperti besi, nikel, kobalt dan sebagainya. Material tersebut sangat mudah terpengaruh oleh medan listrik maupun medan magnet. Mekanisme pemanasan akibat medan listrik didasarkan pada perpindahan elektron bebas, sedangkan pemanasan akibat medan magnet dapat mempengaruhi perputaran elektron, *domain wall* dan orientasi dari domain. Mekanisme pemanasan akibat medan magnet terdiri atas beberapa mekanisme lain, diantaranya adalah :

### 1. Mekanisme *Eddy Current Loss*

Timbulnya arus Eddy selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro diakibatkan ketika sebuah material konduktor terkena medan magnet yang berubah - ubah karena perpindahan relatif dari sumber medan magnet dengan konduktor atau karena adanya variasi medan magnet terhadap waktu. Dibandingkan dengan proses pemanasan Ohmic yang sama – sama disebabkan oleh induksi medan magnet, mekanisme *Eddy Current Loss* lebih banyak bergantung pada resistivitas listrik dari suatu material. Mekanisme *Eddy Current Loss* merupakan mekanisme utama yang terjadi pada proses pemanasan gelombang mikro pada berbagai material konduktor dan semikonduktor (Cheng, 2002).

### 2. Mekanisme *Hysteresis Loss*

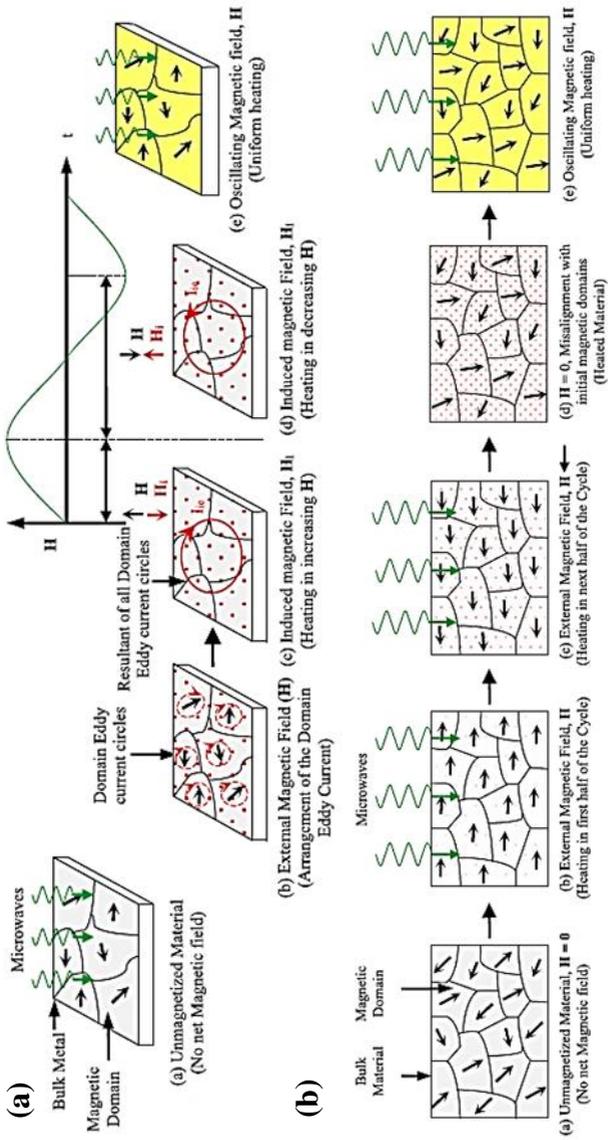
*Hysteresis Loss* disebabkan oleh proses magnetisasi ireversibel pada medan magnet bolak - balik. *Hysteresis Loss* hanya terjadi pada bahan – bahan magnetik seperti baja, nikel dan beberapa logam lainnya. Ketika material magnetik dikenai medan magnet bolak – balik, dipol magnet akan bergetar karena kutub magnet mengubah orientasi kutubnya pada setiap siklus. Proses pembolak balikan medan magnet yang secara cepat menyebabkan terjadinya gesekan yang cukup besar pada dipol magnet dan menyebabkan terjadi panas di dalam material (Haimbaugh, 2003).



Ilustrasi terjadinya mekanisme *Hysteresis Loss* dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.6

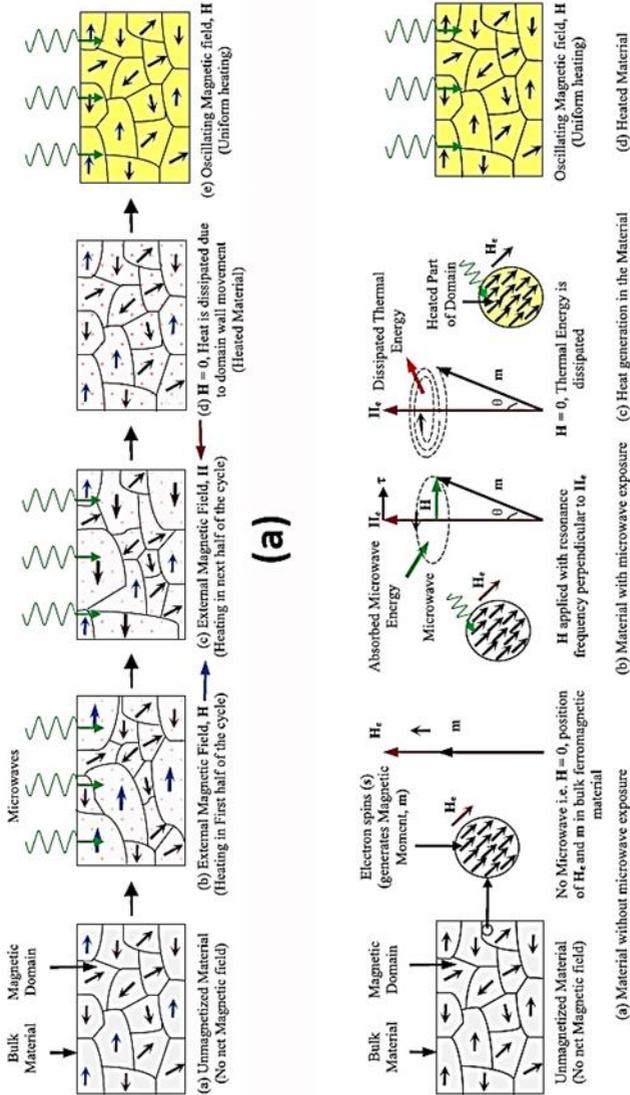
### 3. Mekanisme *Residual Loss* atau *Magnetic Resonance Loss*

Dibandingkan dengan *Eddy Current* dan *Hysteresis Loss*, *Residual Loss* memiliki kontribusi besar terhadap proses pemanasan gelombang mikro pada material jenis metal oksida, seperti ferrit dan material magnetik lainnya. *Residual loss* dapat terjadi akibat perpindahan *domain wall* atau timbulnya gangguan pada putaran elektron akibat adanya medan magnet eksternal (Hirokoshi, 2012). Mekanisme terjadinya *residual loss* dan *magnetic resonance loss* dapat dijelaskan lebih rinci pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Magnet. (a) Eddy Current Loss

(b) Hysteresis Loss  
(Sumber : Mishra, 2016)



Gambar 2.7 Mekanisme Pemanasan akibat Medan Magnet. (a) Perpindahan Domain Wall (b) Terganggunya Putaran Elektron (Sumber : Mishra, 2016)



## 2.5 Formulasi Energi Panas akibat Radiasi Gelombang Mikro

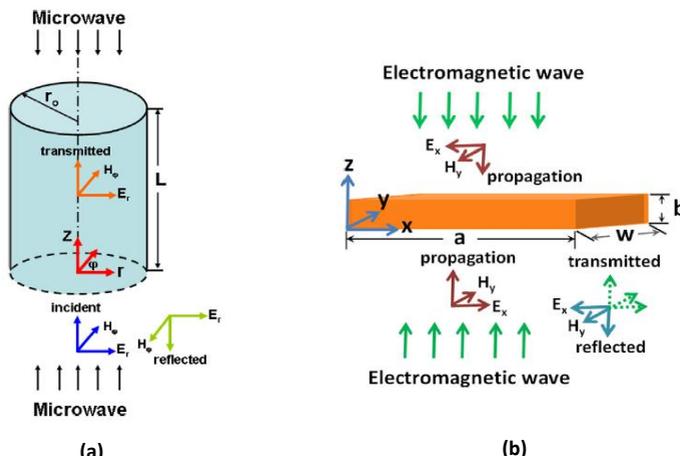
Gelombang elektromagnetik yang berpropagasi terdiri atas medan listrik dan medan magnet yang berosilasi. Dengan mengasumsikan bahwa gelombang mikro seragam pada semua bidang, maka persamaan Maxwell dapat disederhanakan menjadi (Roussy, 1995) :

$$\vec{J} = \sigma' \vec{E} \quad (2.11)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.12)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.13)$$

dimana  $\sigma'$  adalah konduktivitas listrik,  $\varepsilon$  adalah konstanta dielektrik dan  $\mu$  adalah permeabilitas magnetik.



Gambar 2. 8 Skema 3 Dimensi dari Objek (a) Silinder (b) Balok. Pada Bidang Gelombang Uniform, Medan Magnet Selalu Tegak Lurus Terhadap Medan Listrik (Sumber : Hossan, 2009)



Jika sinar datang gelombang mikro hanya terjadi pada bidang axial baik untuk objek silinder maupun balok seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8, maka persamaan medan listriknya dapat disederhanakan sebagai :

$$\frac{d^2 E_r}{dz^2} + \chi^2 E_r = 0 \quad (2.14)$$

dimana  $\chi$  adalah konstanta propagasi dan konstanta tersebut dapat didapatkan dari persamaan  $\chi^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 (\kappa' + i\kappa'')$ . Konstanta propagasi tersebut juga dapat dinyatakan sebagai  $\chi = \sigma + i\beta$ , dimana faktor fasa formulasikan sebagai (Ayappa, 1991) :

$$\sigma = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\kappa''(\sqrt{1+\tan^2 \delta}+1)}{2}} \quad (2.15)$$

sedangkan faktor atenuasi dinyatakan dalam persamaan :

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\kappa''(\sqrt{1+\tan^2 \delta}-1)}{2}} \quad (2.16)$$

Untuk objek silinder yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (a), dengan radiasi gelombang mikro yang terjadi pada bagian permukaan atas dan permukaan bawah dari objek, maka *boundary condition* untuk bidang gelombang mikro uniform yang berpropagasi sepanjang sumbu z dapat dinyatakan sebagai :

$$E_{r,0}|_{z=0,L} = E_{r,1}|_{z=0,L} \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \omega} \frac{dE_{r,0}}{dz} |_{z=0} = \frac{1}{\mu_1 \omega} \frac{dE_{r,1}}{dz} |_{z=0} \quad (2.18)$$

dimana 0 dan 1 mengindikasikan batas masing – masing ruang kosong dalam silinder. Kemudian solusi dari persamaan Maxwell yang disederhanakan untuk objek silinder dapat ditulis :



$$E_{r,l} = A_l e^{i\chi_l z} + B_l e^{-i\chi_l z} \quad (2.19)$$

dimana  $l$  menunjukkan media yang ditembus oleh gelombang mikro selama ia berpropagasi ( $l=0$  untuk udara dan  $l=1$  objek silinder). Dengan menerapkan *boundary condition* pada persamaan di atas, maka koefisien  $A_l$  dan  $B_l$  di dalam sistem silinder tersebut didapatkan :

$$A_l = \frac{T_{01} E_0}{1 + R_{01} e^{i\chi_l L}} \quad (2.20)$$

$$B_l = \frac{T_{01} E_0 e^{i\chi_l L}}{1 + R_{01} e^{i\chi_l L}} \quad (2.21)$$

dimana koefisien transmisi dan refleksinya dinyatakan sebagai :

$$T_{01} = \frac{2\xi_1}{\xi_1 + \xi_0} \quad (2.22)$$

$$R_{01} = \frac{\xi_1 - \xi_0}{\xi_1 + \xi_0} \quad (2.23)$$

dengan impedansi elektrik,  $\xi = \frac{\mu\omega}{\chi}$ . Karena medan listrik hanya berpropagasi sepanjang arah axial, maka distribusi medan listrik di dalam sistem silinder dapat dirumuskan sebagai :

$$E = \frac{T_{01} E_0}{1 + R_{01} e^{i\chi_l L}} (e^{i\chi_l z} + e^{i\chi_l(L-z)}) \quad (2.24)$$

Ketika distribusi medan listrik sudah dapat ditentukan, maka distribusi medan magnet juga nantinya juga dapat diketahui berdasarkan hubungan :

$$\frac{dE_{r,l}}{dz} = i\mu_l \omega H_{\phi,l} \quad (2.25)$$

dengan menerapkan teorema Poynting, maka besar energi yang didisipasikan tiap satuan volume dinyatakan oleh:



$$Q(z) = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \kappa'' |E|^2 \quad (2.26)$$

dengan mensubstitusikan persamaan distribusi medan listrik untuk objek silinder ke dalam persamaan di atas, maka besar energi panas yang dihasilkan pada objek silinder akibat radiasi gelombang mikro dapat dirumuskan sebagai :

$$Q(z) = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \kappa'' |E_0|^2 |T_{01}|^2 \times \frac{e^{-2\beta z} + e^{-2\beta(L-z)} + 2e^{-\beta L} \cos(2\sigma z - \sigma L)}{1 + 2|R_{01}|e^{-\beta L} \cos(\delta_{01} + \sigma L) + |R_{01}|^2 e^{-2\beta L}} \quad (2.27)$$

Sedangkan untuk bidang balok seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8 (b), *boundary condition* pada permukaan bagian atas dan bawah objek dinyatakan sebagai :

$$E_0 = E_1 \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \omega} \frac{dE_0}{dz} = \frac{1}{\mu_1 \omega} \frac{dE_1}{dz} \quad (2.29)$$

dimana 0 dan 1 mengindikasikan nilai bebas dan nilai pada objek. Distribusi medan listrik didalam objek balok dapat ditentukan sebagai :

$$E = \frac{T_{01} E_0}{1 + R_{01} e^{i\chi_1 b}} (e^{i\chi_1 z} + e^{i\chi_1(b-z)}) \quad (2.30)$$

dari persamaan di atas, besar koefesien transmisi, koefisien refleksi dan impedansi instrinsik secara berturut - turut didapatkan dari persamaan :

$$T_{01} = \frac{2\xi_1}{\xi_1 + \xi_0} \quad (2.31)$$

$$R_{01} = \frac{\xi_1 - \xi_0}{\xi_1 + \xi_0} \quad (2.32)$$

$$\xi = \frac{\mu \omega}{\chi} \quad (2.33)$$



Seperti pada objek silinder, ketika distribusi medan listrik sudah diketahui maka distribusi medan magnet dapat ditentukan berdasarkan hubungan :

$$\frac{dE_x}{dz} = i\mu\omega H_y \quad (2.34)$$

Sehingga, energi yang didisipasikan tiap unit volume objek balok dapat dinyatakan sebagai :

$$Q(z) = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \kappa'' |E|^2 \quad (2.35)$$

dan dengan mensubstitusikan persamaan distribusi medan listrik pada objek balok ke dalam persamaan di atas, maka didapatkan besar energi yang dihasilkan akibat radiasi gelombang mikro pada objek balok sebagai fungsi :

$$Q(z) = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \kappa'' |E_0|^2 |T_{01}|^2 \times \frac{e^{-2\beta z} + e^{-2\beta(b-z)} + 2e^{-\beta L} \cos(2\sigma z - \sigma b)}{1 + 2|R_{01}|e^{-\beta b} \cos(\delta_{01} + \sigma L) + |R_{01}|^2 e^{-2\beta b}} \quad (2.36)$$

## 2.6 Persamaan Perpindahan Panas dan Distribusi Temperatur pada Pemanasan Gelombang Mikro

Meskipun gelombang mikro memiliki kemampuan untuk dimanfaatkan dalam pemanasan material, namun pesebaran temperatur yang tidak merata masih menjadi perbincangan dan menjadi topik utama bagi beberapa peneliti. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, penentuan temperatur yang akurat sangat diperlukan untuk meramalkan temperatur yang terjadi selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro. Oleh karena itu fenomena perpindahan panas selama pemanasan gelombang mikro dapat dipelajari berdasarkan objek yang dipanaskan (Peng, 2012). Dalam studi penelitian ini, proses perpindahan panas dibagi dalam kedua objek, yaitu objek silinder dan objek balok.



### 2.6.1 Perpindahan Panas pada Objek Silinder

Persamaan konservasi energi untuk objek silinder selama pemanasan gelombang mikro dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q(z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \text{ pada } 0 \leq r < r_0; 0 < z < L \quad (2.37)$$

dimana  $\alpha$  adalah difusivitas termal,  $k$  adalah konduktivitas termal dan  $T$  adalah temperatur. Sedangkan besar sumber panas  $Q(z)$  didapatkan dari besar energi termal akibat radiasi gelombang mikro pada objek silinder. Sedangkan kondisi awal dan boundary condition pada persamaan energi tersebut adalah :

$$T = T_i \quad \text{pada } t = 0 \quad (2.38)$$

$$T = \text{finite} \quad \text{pada } r = 0; t > 0 \quad (2.39)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty) \quad \text{pada } r = r_0; t > 0 \quad (2.40)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty) \quad \text{pada } z = 0; t > 0 \quad (2.41)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty) \quad \text{pada } z = L; t > 0 \quad (2.42)$$

Persamaan untuk distribusi temperatur bisa didapatkan dari persamaan 2.37 yang memiliki orde 2, yaitu persamaan diferensial parsial non homogen menggunakan cara transformasi integral. Untuk menerapkan teknik transformasi integral, maka persamaan 2.37 dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{Q(z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ pada } 0 \leq r \leq r_0; 0 < z < L \quad (2.43)$$

dimana  $\theta(r, z, t) = T - T_\infty$ . Oleh karena itu, kondisi awal dan boundary condition untuk persamaan baru tersebut direduksi menjadi :



$$\theta = \theta_i \quad \text{pada } t = 0 \quad (2.44)$$

$$\theta = \text{finite} \quad \text{pada } r = 0; t > 0 \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} + \gamma \theta = 0 \quad \text{pada } r = r_0; t > 0 \quad (2.46)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} + \gamma \theta = 0 \quad \text{pada } z = 0; t > 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} + \gamma \theta = 0 \quad \text{pada } z=L; t > 0 \quad (2.48)$$

dimana  $\theta_i = T_i - T_\infty$  dan  $\gamma = \frac{h}{k}$ . Turunan parsial terhadap  $r$  dapat dieleminasi berdasarkan persamaan konservasi energi pada persamaan 2.43 dengan memasukkan transformasi Hankel menjadi :

$$\bar{\theta}(\lambda_m, z, t) = \int_0^{r_0} K(\lambda_m, r) \cdot \theta(r, z, t) r dr \quad (2.49)$$

Faktor Kernels  $K(\lambda_m, r)$  pada persamaan 2.49 merupakan fungsi karakteristik normal dari permasalahan eigenvalue berikut :

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \lambda^2 r^2 R^2 = 0 \quad (2.50)$$

$$R = \text{finite} \quad \text{pada } r = 0; t > 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{dR}{dr} + \gamma R = 0 \quad \text{pada } r = r_0; t > 0 \quad (2.52)$$

dimana  $\lambda$  adalah faktor eigenvalue. Untuk permasalahan eigenvalue di atas, fungsi karakteristiknya adalah  $J_0(\lambda_m, r)$ , integral normalisasinya adalah  $N_m = \int_0^{r_0} r J_0^2(\lambda_m r) dr$  dan faktor Kernalnya adalah  $K(\lambda_m, r) = \frac{J_0(\lambda_m, r)}{\sqrt{N_m}}$ . Faktor eigenvalue ( $\lambda_m$ ) adalah akar positif dari :

$$-\lambda_m J_1(\lambda_m r_0) + \gamma J_0(\lambda_m r_0) = 0 \quad (2.53)$$

Transformasi dari persamaan konservasi energi pada persamaan 2.43 terhadap  $r$ , akan menghasilkan :



$$-\lambda_m^2 \bar{\theta} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} + \frac{\bar{Q}(z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \quad (2.54)$$

dimana  $\bar{Q}(z) = Q(z) \frac{r_0}{\lambda_m} J_1(\lambda_m r)$ . Selanjutnya untuk menghilangkan turunan parsial terhadap  $z$  dari transformasi persamaan konservasi energi di atas. Maka transformasi Fourier dimasukkan menjadi :

$$\bar{\bar{\theta}}(\lambda_m, \eta_n, t) = \int_0^L K(\eta_n, z) \bar{\theta}(\lambda_m, z, t) dz \quad (2.55)$$

Dari persamaan di atas, faktor Kernel  $K(\eta_n, z)$  adalah fungsi karakteristik yang dinormalisasi berdasarkan persamaan eigenvalue berikut :

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \eta^2 Z^2 = 0 \quad (2.56)$$

$$-\frac{dZ}{dz} + \gamma Z = 0 \quad \text{pada } z=0; t > 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{dZ}{dz} + \gamma Z = 0 \quad \text{pada } z = L; t > 0 \quad (2.58)$$

dimana  $\eta$  adalah hasil eigenvalue. Untuk permasalahan eigenvalue pada arah  $z$ , faktor Kernel dapat nyatakan sebagai  $K(\eta_n, z) = \frac{\sqrt{2}(\eta_n \cos \eta_n z + \gamma \sin \eta_n z)}{\sqrt{L(\eta_n^2 + \gamma^2) + 2\gamma}}$  dan eigenvalue  $\eta_n$  adalah akar positif dari :

$$\tan(\eta_n L) = \frac{2\gamma \eta_n}{\eta_n^2 - \gamma^2} \quad (2.59)$$

Kini transformasi persamaan 2.54 terhadap  $z$ , dengan menggunakan transformasi Fourier pada persamaan 2.55 akan menghasilkan :

$$-\alpha(\lambda_m^2 + \eta_n^2) \bar{\bar{\theta}} + \Phi = \frac{d\bar{\bar{\theta}}}{dt} \quad (2.60)$$



dimana :

$$\Phi = \frac{\alpha \bar{Q}(\eta_n)}{k} = \frac{\alpha r_0}{k \lambda_m} J_1(\lambda_m r_0) \int_0^L Q(z) (\eta_n \cos \eta_n z + \gamma \sin \eta_n z) dz \quad (2.61)$$

Transformasi kedua dari persamaan 2.60 akan memberikan persamaan diferensial sederhana dan dapat diselesaikan sebagai :

$$\bar{\theta}(\lambda_m, \eta_n, t) = \frac{\Phi}{\alpha(\lambda_m^2 + \eta_n^2)} + \left( \bar{\theta} - \frac{\Phi}{\alpha(\lambda_m^2 + \eta_n^2)} \right) e^{-\alpha(\lambda_m^2 + \eta_n^2)t} \quad (2.62)$$

dimana

$$\bar{\theta}_i = \frac{\theta_i r_0}{\lambda_m} J_1(\lambda_m r_0) \left( \sin \eta_n L - \frac{\gamma}{\eta_n} \cos \eta_n L + \frac{\gamma}{\eta_n} \right) \quad (2.63)$$

Selanjutnya dengan menerapkan teknik inversi yang tepat, maka akan didapatkan persamaan analitis untuk distribusi temperatur.

Pertama – tama, invers dari transformasi Fourier yaitu

$\bar{\theta}(\lambda_m, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} K(\eta_n, z) \bar{\theta}(\lambda_m, \eta_n, t)$  digunakan untuk mendapatkan persamaan transformasi temperatur sebagai :

$$\bar{\theta}(\lambda_m, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\eta_n \cos \eta_n z + \gamma \sin \eta_n z)}{L(\eta_n^2 + \gamma^2) + 2\gamma} \bar{\theta}(\lambda_m, \eta_n, t) \quad (2.64)$$

Selanjutnya invers dari transformasi Henkel  $\theta(r, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} K(\lambda_m, r) \bar{\theta}(\lambda_m, z, t)$  diterapkan untuk mencari penyelesaian akhir dari persamaan distribusi temperatur pada objek silinder seperti :

$$\theta(r, z, t) = T(r, z, t) - T_{\infty} \quad (2.65)$$



$$\theta(r, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_m^2 J_0(\lambda_m r) (\eta_n \cos \eta_n z + \gamma \sin \eta_n z)}{[r_0^2 J_0^2(\lambda_m r_0) (\gamma^2 + \lambda_m^2)] [L(\eta_n^2 + \gamma^2) + 2\gamma]} \bar{\theta}(\lambda_m, \eta_n, t) \quad (2.66)$$

### 2.6.2 Perpindahan Panas pada Objek Balok

Persamaan konservasi energi untuk bidang balok secara 3 dimensi akibat pemanasan menggunakan gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q(T, z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{pada } 0 \leq x < a; 0 \leq y < w, 0 < z < b \quad (2.67)$$

dimana  $\alpha$  adalah difusivitas termal,  $k$  adalah konduktivitas termal dan  $T$  adalah temperatur. Kondisi awal dan *boundary condition* untuk sistem objek balok seperti pada Gambar 2.8 adalah :

$$T = T_i \quad \text{pada } t = 0 \quad (2.68)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{pada } x = 0; t > 0 \quad (2.69)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{pada } x = a; t > 0 \quad (2.70)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{pada } y = 0; t > 0 \quad (2.71)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{pada } y = w; t > 0 \quad (2.72)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{pada } z = 0; t > 0 \quad (2.73)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{pada } z = b; t > 0 \quad (2.74)$$

Persamaan 2.67 adalah persamaan non linear karena bergantung terhadap perubahan temperatur. Oleh karena itu, untuk mencari penyelesaian analitis secara singkat dari sistem tersebut bukanlah hal yang mudah. Sehingga dengan menganggap bahwa sistem mengikuti hukum konstitutif material linier, variasi sifat



dielektrik dapat diabaikan karena hanya akan menghasilkan perubahan temperatur yang sangat kecil di dalam sistem. Penyelesaian persamaan berorde dua dengan menggunakan teknik transformasi integral sangatlah cocok karena dapat dikerjakan dalam waktu yang lebih singkat, tetapi periode waktu yang digunakan terbatas dan penyelesaian akhir digunakan kembali untuk menyelesaikan rentang waktu selanjutnya. Langkah selanjutnya adalah menyelesaikan persamaan 2.67 dalam suatu periode waktu ( $t \rightarrow t + \tau$ ). (Hossan, 2012)

Untuk pemanasan gelombang mikro, nilai  $\tau$  harus  $\leq 1$  detik dimana hasilnya akan tetap konstan. Sehingga untuk pemanasan dengan gelombang mikro dalam waktu yang singkat ( $\tau$ ), persamaan yang dipakai menjadi :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{Q(z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ pada } 0 \leq x < a; 0 \leq y < w; 0 < z < b \quad (2.75)$$

maka kondisi awal dan *boundary condition* untuk persamaan di atas menjadi :

$$\theta = \theta_i \quad (2.76)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial x} + \gamma \theta = 0 \text{ pada } x = 0 \quad (2.77)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \gamma \theta = 0 \text{ pada } x = a \quad (2.78)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial y} + \gamma \theta = 0 \text{ pada } y = 0 \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} + \gamma \theta = 0 \text{ pada } y = w \quad (2.80)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} + \gamma \theta = 0 \text{ pada } z = 0 \quad (2.81)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} + \gamma \theta = 0 \text{ pada } z = b \quad (2.82)$$

dimana  $\gamma = \frac{h}{k}$ . Kemudian persamaan 2.75 diturunkan secara parsial menggunakan transformasi Fourier ditunjukkan seperti berikut (Kakac, 1985) :



$$\bar{\theta}(\lambda_m, y, z, t) = \int_0^a K(\lambda_m, x)\theta(x, y, z, t)dx \quad (2.83)$$

dimana faktor Kernels  $K(\lambda_m, x)$  adalah fungsi karakteristik dari permasalahan eigenvalue berikut :

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \lambda^2 X^2 = 0 \quad (2.84)$$

$$-\frac{dX}{dx} + \gamma X = 0 \quad \text{pada } x = 0 \quad (2.85)$$

$$\frac{dX}{dx} + \gamma X = 0 \quad \text{pada } x = a \quad (2.86)$$

dimana  $\lambda$  adalah eigenvalue. Untuk permasalahan eigenvalue di atas, maka faktor Kernel dapat dinyatakan sebagai  $K(\lambda_m, x) = \frac{\sqrt{2}(\lambda_n \cos \lambda_n x + \gamma \sin \lambda_n x)}{\sqrt{a(\lambda_n^2 + \gamma^2) + 2\gamma}}$ . Dan eigenvalue  $\lambda_n$  adalah akar positif dari :

$$\tan(\lambda_n, a) = \frac{\lambda_n(2\gamma)}{\lambda_n^2 - \gamma^2} \quad (2.87)$$

Transformasi dari persamaan 2.75 terhadap  $x$  melalui persamaan 2.83 akan menghasilkan :

$$-\lambda_n^2 \bar{\theta} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} + \frac{\bar{Q}(z)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \quad (2.88)$$

dimana  $\bar{Q}(z) = Q(z) \left[ \sin(\lambda_n a) - \frac{\gamma}{\lambda_n} \cos(\lambda_n a) + \frac{\gamma}{\lambda_n} \right]$ . Demikian pula dengan turunan parsial terhadap  $y$  dan  $z$  dan kemudian dihilangkan dengan transformasi Fourier dan persamaan energinya menjadi persamaan diferensial sederhana terhadap waktu sebagai berikut :

$$-\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)\bar{\theta} + \Phi = \frac{d\bar{\theta}}{dt} \quad (2.89)$$



dimana

$$\Phi = \left[ \sin(\lambda_n a) - \frac{\gamma}{\lambda_n} \cos(\lambda_n a) + \frac{\gamma}{\lambda_n} \right] \left[ \sin(\xi_p w) - \frac{\gamma}{\xi_p} \cos(\xi_p w) + \frac{\gamma}{\xi_p} \right] \times \int_0^b Q(z) (\eta_q \cos \eta_q z + \gamma \sin \eta_q z) dz \quad (2.90)$$

Nilai eigenvalue pada arah y dan z dapat dihasilkan dari  $\tan(\xi_p w) = \frac{\xi_p (2\gamma)}{\xi_p^2 - \gamma^2}$  dan  $\tan(\eta_p b) = \frac{\eta_q (2\gamma)}{\eta_q^2 - \gamma^2}$  secara berturut – turut. Sehingga persamaan diferensial sederhana pada persamaan 2.89 untuk transformasi temperatur dapat menjadi :

$$\bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t) = \frac{\Phi}{\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)} \left( 1 - e^{-\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)t} \right) + \bar{\theta}_i e^{-\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)t} \quad (2.91)$$

dimana

$$\bar{\bar{\theta}}_i = C(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, a, w, b, \theta_i) = \int_0^a \int_0^w \int_0^b \theta_i (\lambda_n \cos \lambda_n x + \gamma \sin \lambda_n x) \times (\xi_p \cos \xi_p y) (\eta_q \cos \eta_q z + \gamma \sin \eta_q z) dx dy dz \quad (2.92)$$

Selanjutnya dengan menerapkan teknik inversi yang tepat untuk mendapatkan penyelesaian analitis dari distribusi temperatur, maka fungsi invers dari transformasi Fourier pada arah z,  $\bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t) = \sum_{q=1}^{\infty} K(\eta_q, z) \bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t)$  digunakan untuk mendapatkan fungsi transformasi temperatur sebagai :

$$\bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t) = \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2}(\eta_q \cos \eta_q z + \gamma \sin \eta_q z)}{\sqrt{b(\eta_q^2 + \gamma^2) + 2\gamma}} \bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t) \quad (2.93)$$



Lalu transformasi Fourier tersebut diinvers pada arah  $y$   
 $\bar{\theta}(\lambda_n, y, z, t) = \sum_{q=1}^{\infty} K(\xi_p, z) \bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, z, t)$  diterapkan untuk  
mendapatkan fungsi transformasi temperatur sebagai :

$$\bar{\theta}(\lambda_n, y, z, t) = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \sqrt{4} \times \frac{(\xi_p \cos \xi_p y + \gamma \sin \xi_p y)(\eta_q \cos \eta_q z + \gamma \sin \eta_q z)}{\sqrt{(w(\xi_p^2 + \gamma^2) + 2\gamma)(b(\eta_q^2 + \gamma^2) + 2\gamma)}} \times \bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t) \quad (2.94)$$

Maka, fungsi inver dari transformasi Fourier pada arah  $x$   
 $\theta(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} K(\lambda_n, x) \bar{\theta}(\lambda_n, y, z, t)$  diterapkan untuk  
mendapatkan penyelesaian analitis dari fungsi temperatur sebagai :

$$\theta(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, x, y, z) \bar{\bar{\theta}}(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, t) \quad (2.95)$$

$$\text{dimana } A(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, x, y, z) = \sqrt{8} \frac{(\lambda_n \cos \lambda_n x + \gamma \sin \lambda_n x)(\xi_p \cos \xi_p y + \gamma \sin \xi_p y)(\eta_q \cos \eta_q z + \gamma \sin \eta_q z)}{\sqrt{(a(\lambda_n^2 + \gamma^2) + 2\gamma)(w(\xi_p^2 + \gamma^2) + 2\gamma)(b(\eta_q^2 + \gamma^2) + 2\gamma)}}$$

Persamaan di atas hanya berlaku untuk periode waktu yang singkat ( $\tau$ ) pada proses pemanasan menggunakan gelombang mikro. Untuk mendapatkan distribusi temperatur pada suatu waktu yang diinginkan ( $t_f$ ), persamaan 2.75 harus diselesaikan untuk  $N$  kali, dimana  $N = \frac{t_f}{\tau}$ . Untuk setiap tahapan waktu, kondisi awal pada persamaan 2.75 adalah hasil dari tahapan waktu sebelumnya dengan waktu awal,  $t = 0$  dan *boundary condition* pada setiap waktu ditunjukkan oleh persamaan 2.76 – 2.82. Sehingga bentuk penyelsaian analitis yang paling tepat untuk mendapatkan distribusi temperatur pada waktu,  $t_f$  menjadi :



$$\theta(x, y, z, t) = T(x, y, z, t_f) - T_\infty = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, x, y, z) \times \left[ \frac{\Phi(x, y, z, t_f - \tau)}{\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)} \left( 1 - e^{-\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)\tau} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, x, y, z) \times C(\lambda_n, \xi_p, \eta_q, a, w, b, \theta(x, y, z, t_f - \tau)) e^{-\alpha(\lambda_n^2 + \xi_p^2 + \eta_q^2)\tau} \quad (2.96)$$

## 2.7 Proses Pemanasan Ilmenite dengan Gelombang Mikro

Ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ) merupakan sumber utama yang digunakan dalam produksi titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ). Titanium dioksida banyak dimanfaatkan sebagai pigmen dalam industri cat maupun industri lain yang membutuhkan bahan pewarna. Metode umum yang sering digunakan untuk mengekstrak titanium dioksida dari ilmenite adalah dengan cara reduksi termal yang diikuti dengan proses leaching untuk menghilangkan unsur besi di dalam produk akhir. Proses reduksi karbotermik dari ilmenite terjadi pada temperatur sekitar  $1200^\circ$  dan menghasilkan produk berupa besi metalik dan titanium dioksida yang tereduksi. Reaktivitas ilmenite juga dapat ditingkatkan dengan menggunakan proses pre oksidasi, selain meningkatkan reaktivitas dari ilmenite, proses ini juga akan meningkatkan laju pereduksian ilmenite (Wang, 2014).

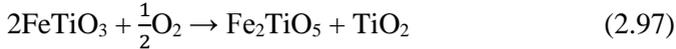
Indonesia memiliki deposit titanium dalam bentuk pasir placer ilmenite, alluvial, dan lateritik. Deposit placer ilmenite di Indonesia mencapai 71.314.810 ton dengan kandungan  $\text{TiO}_2$  sebesar 0,15 % – 25,15%, sedangkan perkiraan cadangan di Pulau Jawa sekitar 21.922.229 dengan kadar  $\text{TiO}_2$  berkisar 8,92- 9,629% (pusat sumber daya geologi, 2013). Oleh karena itu, pengembangan teknologi pemrosesan yang baru sangat dibutuhkan dalam pengolahan ilmenite secara efisien untuk kemajuan industri pigmen titanium dioksida (Francis, 2008). Pemanasan menggunakan gelombang mikro merupakan salah satu alternatif yang dapat menjawab tantangan tersebut karena pemanasan gelombang mikro memiliki beberapa keuntungan diantaranya adalah penetrasi pemanasan yang dalam, distribusi medan



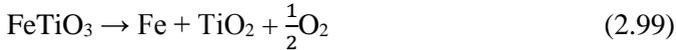
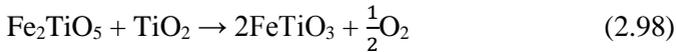
listriaknya dapat dikontrol dan proses pemanasannya terjadi secara volumetrik (Zhu, 2014).

Selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro hingga temperatur 1200°C, ilmenite mengalami reaksi pre-oksidasi dan reduksi berdasarkan :

#### Proses Oksidasi



#### Proses Reduksi



dari persamaan reaksi 2.99, dapat dilihat bahwa terbentuk besi metalik pada hasil akhir reaksi. Terbentuknya besi metalik ini terjadi pada temperatur sekitar 950° C (Gupta, 1991).

Ilmenite menunjukkan karakteristik pemanasan dielektrik yang bagus. Akan tetapi, ketika besi teroksidasi menjadi besi *ferric* maka kemampuan material tersebut untuk membentuk dipol akan hilang sehingga material tersebut tidak dapat panas dengan adanya radiasi gelombang mikro. Oleh karena itu dibutuhkan zat tambahan (*coupling agent*) yang dapat dengan mudah memanaskan ketika berada di dalam medan listrik. *Coupling agent* dapat menyalurkan energi menuju sampel yang dipanaskan sehingga elektron dalam sampel tersebut dapat mudah bergerak. Adanya pergerakan elektron ini menyebabkan terbentuknya dipol sehingga material dapat menjadi panas. Biasanya material yang digunakan sebagai *coupling agent* dalam pengolahan ilmenite adalah grafit (Kelly, 1995).

Kondisi di atas merupakan kondisi yang terjadi ketika ilmenite dipanaskan dalam microwave dengan keadaan vacuum. Miftakhur Rohmah pada tahun 2015 telah melakukan eksperimen berupa pemanasan ilmenite menggunakan *Microwave Batch Furnace* dengan daya sebesar 5,55 kW dengan variasi komposisi



perbandingan ilmenite dengan grafit. Di dapatkan bahwa pada hasil akhir pemanasan menggunakan gelombang mikro berupa pseudobrookite dan titanium dioksida seperti yang ditunjukkan oleh reaksi 2.97. Reaksi oksidasi tersebut terjadi pada temperatur sekitar  $1000^{\circ}\text{C}$  dengan pemanasan di dalam furnace selama 1 jam. Karena pseudobrookite masih mengandung titanium dioksida yang terpresipitasi di dalam hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ ) maka diperlukan proses yang lebih lanjut berupa leaching menggunakan asam klorida yang bertujuan untuk melepaskan titanium dioksida dengan hematite (Rohmah, 2015).

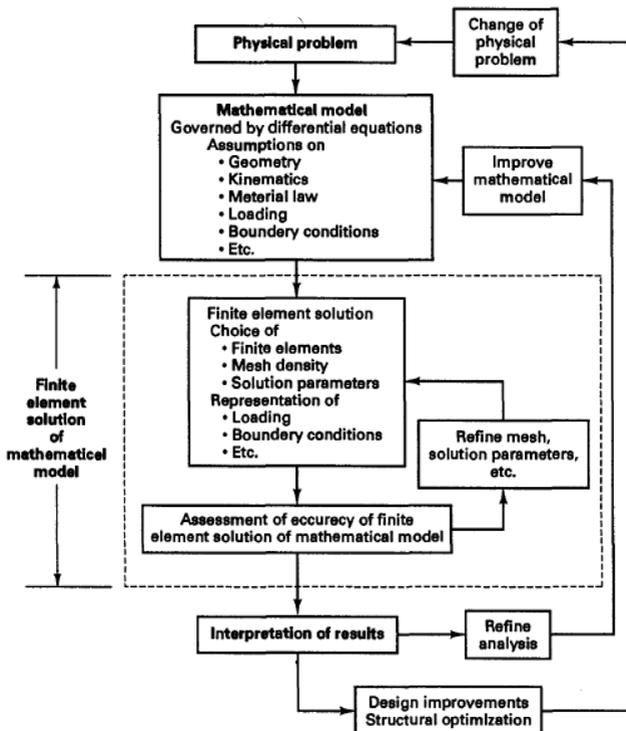
## 2.8 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah salah satu metode numerikal yang digunakan untuk memperkirakan suatu penyelesaian dari berbagai permasalahan di bidang keteknikan. Analisis Elemen Hingga menjadi salah satu langkah yang penting dalam proses pendesainan dan pemodelan fenomena – fenomena fisik yang banyak terjadi di dunia industri. Metode Elemen Hingga berprinsip pada dekomposisi suatu domain atau objek studi menjadi beberapa subdomain atau elemen dengan menerapkan metode residual berbobot atau metode variasiional untuk memperkirakan suatu penyelesaian. Analisis menggunakan Metode Elemen Hingga juga dapat digunakan untuk menyatakan variabel dasar yang belum diketahui dari fungsi perkiraan pada setiap elemen. Fungsi ini didefinisikan sebagai hasil dari variabel dasar pada letak yang spesifik dan sering disebut sebagai *nodes*. *Nodes* biasanya terletak pada batas – batas elemen dan berfungsi sebagai penghubung antar elemen yang berdekatan (Madenci, 2015).

Teknik analisis Elemen Hingga merupakan salah satu jenis prosedur numerikal, dimana akurasiya perlu untuk dinilai. Jika akurasiya tidak sesuai dengan kriteria, maka solusi numerikal tersebut harus diulang dengan parameter yang lebih halus (seperti, bentuk *mesh* yang halus) hingga akurasiya dianggap cukup sesuai dengan prosedur metode elemen hingga yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9. Metode Elemen Hingga hanya dapat menyelesaikan



model matematika tertentu dan semua asumsi yang digunakan akan berpengaruh terhadap respon dihasilkan. Kita tidak dapat mengharap informasi lain dapa fenomena fisik yang diprediksi selain informasi yang dikandung didalam model matematikanya. Sehingga pemilihan model matematika yang tepat sangatlah penting karena dapat menjelaskan dengan tepat sesuai dengan kenyataan di lapangan (Bathe, 1996).



Gambar 2. 9 Proses Analisis menggunakan Metode Elemen Hingga  
(Sumber: Bathe, 1996)



Dalam analisis Elemen Hingga terdapat tiga pendekatan yang digunakan untuk menyelesaikan dan memperkirakan solusi dari suatu permasalahan yaitu (Desai, 1971) :

1. Pendekatan Langsung  
Pendekatan ini digunakan untuk permasalahan yang simpel dan biasanya berfungsi sebagai sarana untuk menjelaskan konsep dasar dari Metode Elemen Hingga.
2. Pendekatan Residual Berbobot  
Pendekatan ini adalah metode yang serba guna, karena dapat memperbolehkan penggunaan analisis Elemen Hingga pada suatu permasalahan yang secara fungsional tidak dapat disusun. Pendekatan ini banyak menggunakan persamaan diferensial seperti pada fenomena perpindahan panas dan mekanika fluida.
3. Pendekatan Variasional  
Pendekatan ini bergantung pada variasi kalkulus dimana melibatkan fungsi – fungsi ekstrim, seperti pada penentuan energi potensial pada mekanika struktur.

## 2.9 Aplikasi Metode Elemen Hingga pada Kasus Perpindahan Panas

Jika kita asumsikan sebuah objek homogen seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10, dengan node “i” dan “j” pada masing – masing ujungnya, maka dapat dituliskan persamaan temperaturnya sebagai :

$$T = N_i T_i + N_j T_j \quad (2.100)$$

dimana  $N_i = \frac{x_j - x}{x_j - x_i}$  dan  $N_j = \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$ .

Pada lokal koordinat, nilai  $N_i$  dan  $N_j$  menjadi

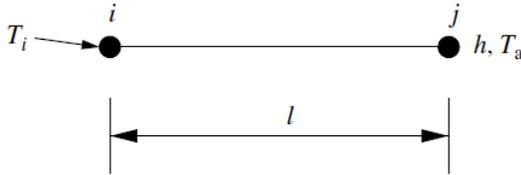


$$N_i = 1 - \frac{x}{l} \quad (2.101)$$

$$N_j = \frac{x}{l} \quad (2.102)$$

Dan turunan temperaturnya menjadi

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{1}{l}T_i + \frac{1}{l}T_j = \left[ -\frac{1}{l} \quad \frac{1}{l} \right] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} = [\mathbf{B}]\{T\} \quad (2.103)$$



Gambar 2.10 Konduksi Panas pada Objek Homogen

Matriks kekakuan pada masing – masing elemen dapat dinyatakan sebagai :

$$[K]_e = \int_{\Omega} [\mathbf{B}]^T [D] [\mathbf{B}] d\Omega + \int_{A_s} h [N]^T [N] dA_s + \int_l [\mathbf{B}]^T [D] [B] A dx + \int_{A_s} h [N]^T [N] dA_s \quad (2.104)$$

dimana  $\Omega$  adalah integral volume,  $A_s$  mengindikasikan luas permukaan dan  $h$  adalah koefisien heat transfer secara konveksi. Setelah persamaan 2.104 diintegrasikan, maka

$$[K]_e = \frac{Ak_x}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + hA_s \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.105)$$

Pada kasus 1-Dimensi,  $[D]$  hanya memiliki 1 nilai yaitu berupa  $k_x$ . Dan harus diperhatikan bahwa bahwa boundary



condition pada perpindahan panas secara konveksi diasumsikan berlaku pada sisi sebelah kanan dimana  $N_i = 0$  dan  $N_j = 1$ . Hal ini dikarenakan nilai  $h.A_s$  telah ditambahkan pada persamaan nodal terakhir pada persamaan 2.105. Pada kasus bidang datar ini, luas permukaan melintang  $A$  dianggap sama dengan permukaan yang dikenai konveksi  $A_s$ .

Vektor pembebanan dapat dituliskan sebagai

$$\{f\}_e = \int_{\Omega} G[N]^T d\Omega - \int_{A_s} q[N]^T dA_s + \int_{A_s} hT_a[N]^T dA_s \quad (2.106)$$

Dimana  $G$  adalah generasi panas internal per unit volume.,  $q$  adalah fluks pada permukaan batas dan  $T_a$  adalah temperatur udara. Jika tidak terjadi generasi panas dan fluks panas yang terjadi ( $G = 0$ ,  $q = 0$ ), maka persamaan elemen hingga untuk objek homogen dengan dua node menjadi

$$\left\{ \frac{k_x A}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + hA \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ hT_a A \end{Bmatrix} \quad (2.107)$$

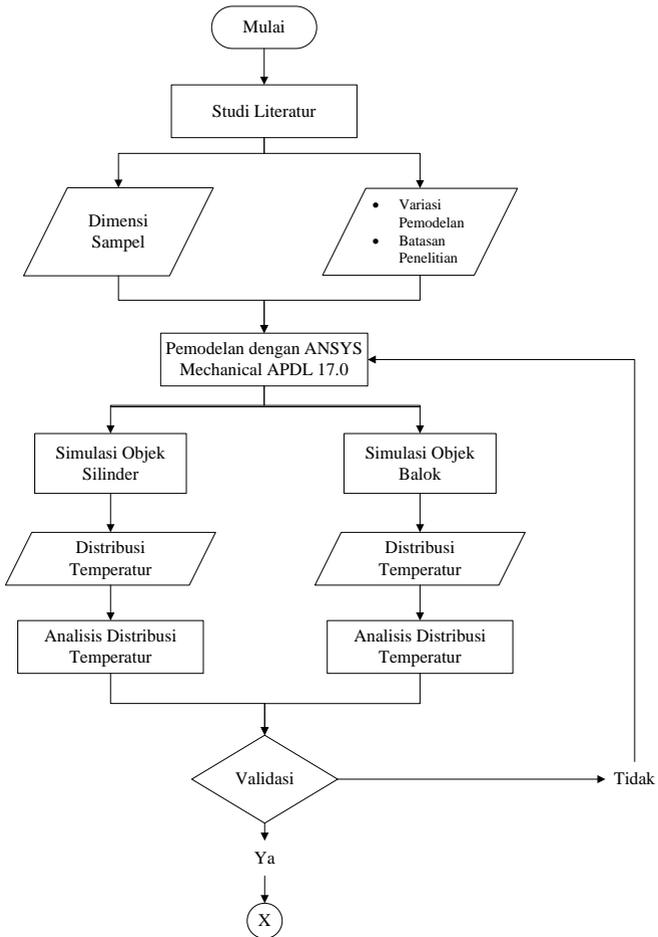


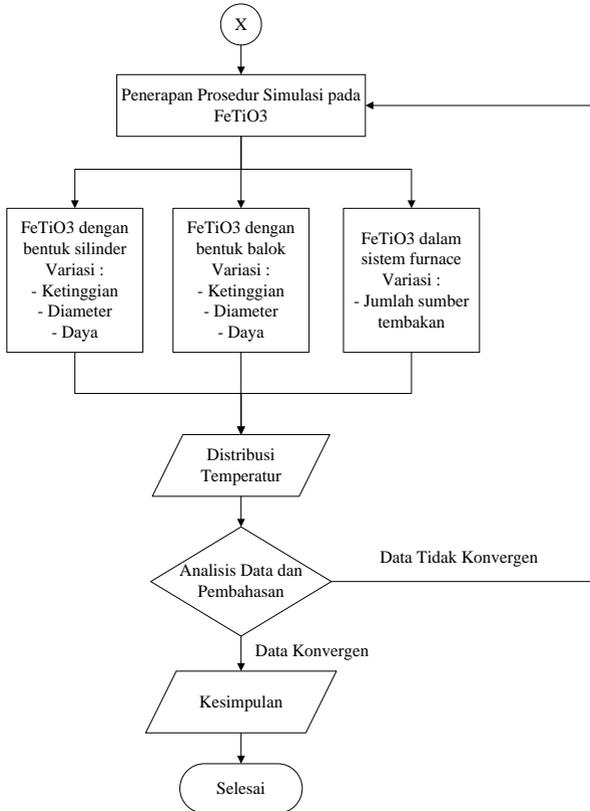
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

## 3.2 Material Penelitian

### 3.2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah daging sapi, daging salmon dan mineral ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ). Data – data material uji diperoleh dari beberapa sumber yaitu *Microwave Heating: An Evaluation of Power Formulations* dari Ayappa pada tahun 1991, *Analysis of Microwave Heating for Cylindrical Shaped Objects*



dari Hossan pada tahun 2010, *Dielectric Properties of Salmon Fillets as a Function of Temperature and Composition* dari Wang pada tahun 2008, *Effect of Temperature Dependent Properties in Electromagnetic Heating* dari Hossan pada tahun 2012, *Thermophysical Properties of Matter Volume 2 : Thermal Conductivity Non Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970, *Thermophysical Properties of Matter Volume 5 : Specific Heat Non Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970, *Thermophysical Properties of Matter Volume 13 : Thermal Expansion Non Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970, *An Investigation on Electrical Properties of Microwave Treated Natural Ilmenite (FeTiO<sub>3</sub>)* dari Chiteme pada tahun 2006 dan *Studi Variasi Komposisi Grafit Terhadap Proses Ekstraksi TiO<sub>2</sub> dari Pasir Besi Titanomagnetite dengan Memanfaatkan Pemanasan Gelombang Mikro dan Leaching Asam Klorida* dari Rohmah pada tahun 2015.

Sifat – sifat dari daging sapi, daging salmon dan mineral ilmenite dijabarkan pada Tabel 3.1 sampai dengan Tabel 3.7 sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Sifat Dielektrik Daging Sapi pada Frekuensi 2450 MHz

(Sumber: Ayappa,1991)

Sifat Dielektrik	Besaran
Konstanta Dielektrik $\kappa'$	30,5
Dielectric Loss $\kappa''$	9,6
Koefisien Transmisi $ T_{01} $	0,301
Koefisien Refleksi $ R_{01} $	0,7026
Sudut Fasa $\delta_{01}$ (rad)	-3,09
Faktor Fasa $\sigma$ (rad/m)	288
Faktor Atenuasi $\beta$ (rad/m)	44,2



Tabel 3. 2 Sifat Termal Daging Sapi  
(Sumber: Hossan, 2010)

Sifat Termal	Besaran
Konduktivitas Termal $k$ (W/m.K)	3200
Kapasitas Panas Spesifik $c_p$ (J/kg.K)	0,466
Densitas $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1030

Tabel 3. 3 Sifat Dielektrik Daging Salmon pada Frekuensi 2450  
MHz

Sifat Dielektrik	Besaran
Koefisien Transmisi $ T_{01} ^{[1]}$	0,243
Koefisien Refleksi $ R_{01} ^{[1]}$	0,761
Sudut Fasa $\delta_{01}$ (rad) <sup>[1]</sup>	3,095
Faktor Fasa $\sigma$ (rad/m) <sup>[1]</sup>	367,32
Faktor Atenuasi $\beta$ (rad/m) <sup>[1]</sup>	61,65
Konstanta Dielektrik $\kappa'^{[2]}$	51,2
Dielectric Loss $\kappa''^{[2]}$	18,24

Sumber : [1] Wang, 2008; [2] Hossan, 2012

Tabel 3. 4 Sifat Termal Daging Salmon  
(Sumber: Hossan, 2012)

Sifat Termal	Besaran
Kapasitas Panas Spesifik $c_p$ (J/kg.K)	3589,4
Konduktivitas Termal $k$ (W/m.K)	0,4711
Densitas $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1047,89



Tabel 3. 5 Sifat Dielektrik dan Densitas Ilmenite pada Frekuensi 2450 MHz

Sifat Dielektrik	Besaran
Konstanta Dielektrik $\kappa'^{[1]}$	16,8
Dielectric Loss $\kappa''^{[1]}$	8,6
Sudut Fasa $\delta_{01}$ (rad) <sup>[1]</sup>	2,93
Faktor Fasa $\sigma$ (rad/m) <sup>[1]</sup>	210,4
Faktor Atenuasi $\beta$ (rad/m) <sup>[1]</sup>	61,286
Koefisien Transmisi $ T_{01} ^{[2]}$	0,4602
Koefisien Refleksi $ R_{01} ^{[2]}$	0.0045
Densitas $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>[3]</sup>	4789

Sumber : [1] Chiteme, 2006; [2] Rohmah, 2015; [3] Mindat.org.

Tabel 3. 6 Kapasitas Panas Spesifik Ilmenite  
(Sumber: Touloukian, 1970)

Temperatur (K)	Panas Spesifik (J/kg.K)
273,15	545,0172
300	542,9242
400	550,8776
500	569,7146
600	593,1562
700	618,6908
900	672,2716
1000	699,4806
1100	727,1082
1200	755,1544
1300	783,2006



Tabel 3. 7 Konduktivitas Termal Ilmenite  
(Sumber: Toloukian, 1970)

Temperatur (K)	Konduktivitas Termal (W/m-K)
468,2	4,87
571,2	4,25
673	3,99
783,2	3,77
873	3,66
951,2	3,43
1055,7	3,33
1133,2	3,2
1218,2	3,18
1293,2	3,16
1373,2	3,1
1463,2	3,08

### 3.2.2 Material Penyusun Dinding Furnace

Untuk mendukung proses analisis di dalam penelitian ini, dibutuhkan spesifikasi dari material penyusun dinding furnace dimana terdiri dari 3 lapis material yaitu baja AISI 1006, keramik alumina-silika dan aluminium 6061-T6. Spesifikasi dan sifat – sifat dari material tersebut didapatkan dari berbagai sumber diantaranya adalah *Welding of a Metal-Polymer Laminate* oleh Gower pada tahun 2007, *Finite Element Modelling of Friction Stir Welding in Aluminum Alloy Joint* oleh Kiral pada tahun 2013, *Analysis of Transient Temperature and Residual Thermal Stresses in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6061-T6 via Numerical Simulation* oleh Riahi pada tahun 2011, *Thermophysical Properties of Matter Volume 2 : Thermal Conductivity Non*



*Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970, *Thermophysical Properties of Matter Volume 5 : Spesific Heat Non Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970 dan *Thermophysical Properties of Matter Volume 13 : Thermal Expansion Non Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970.

Sifat – sifat dari material baja AISI 1006, keramik silika-alumina dan aluminium 6061-T6 dijabarkan pada Tabel 3.8 sampai dengan Tabel 3.16 seperti di bawah ini :

Tabel 3. 8 Komposisi Kimia Baja AISI 1006

Unsur	Presentase (%)
C	0,052
Mn	0,25
S	0,01
P	0,01
Si	0,0078
Ni	0,02
Cr	0,05
Mo	0,01
Al	0,02
Cu	0,01
Fe	99,556



Tabel 3. 9 Kapasitas Panas Spesifik baja AISI 1006  
(Sumber: matweb.com)

<b>Temperatur (K)</b>	<b>Kapasitas Panas Spesifik ( J/kg-K)</b>
373	481
423	519
473	536
523	553
573	574
623	595
673	628,5
723	662
773	708
823	754
873	810,5
923	867
973	1105
1073	933
1123	846
1173	761
1273	589



Tabel 3. 10 Konduktivitas Termal baja AISI 1006  
(Sumber: Gower, 2007)

Temperatur (K)	Konduktivitas Termal (W/m-K)
273	51,9
348	51,3
373	51,1
448	49,5
473	49
498	48,3
548	46,8
573	46,1
598	45,3
648	43,6
673	42,7
748	40,2
773	39,4
848	36,6
873	35,6
948	32,8
973	31,8
1003	30,1
1023	28,9
1048	27,5
1073	26
1173	26,6
1273	27,2



Tabel 3. 11 Densitas baja AISI 1006  
(Sumber: Gower, 2007)

Temperatur (K)	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )
273	7872
348	7852
373	7845
448	7824
473	7816
498	7809
548	7763
573	7740
598	7717
648	7727
673	7733
748	7720
773	7711
848	7680
873	7669
948	7636
973	7625
1003	7612
1023	7602
1048	7590
1073	7578
1173	7565
1273	7552



Tabel 3. 12 Konduktivitas Termal Keramik Alumina-Silika  
(Sumber: Touloukian, 1970)

<b>Temperatur (K)</b>	<b>Konduktivitas Termal (W/m-K)</b>
373	0,94
473	1,01
573	1,08
673	1,15
773	1,22
873	1,29
973	1,35
1073	1,4
1173	1,45
1273	1,5
1373	1,54
1473	1,58
1573	1,61



Tabel 3. 13 Kapasitas Panas Spesifik Keramik Alumina-Silika  
(Sumber: Touloukian, 1970)

Temperatur (K)	Kapasitas Panas Spesifik (J/kg.K)
293	753,48
373	845,572
473	929,292
573	1004,64
673	1063,244
773	1121,848
873	1159,522
973	1205,568
1073	1243,242
1173	1280,916
1273	1318,59

Tabel 3. 14 Kapasitas Panas Spesifik Aluminium 6061-T6  
(Sumber: Kiral, 2013)

Temperature (K)	Specific Heat ( J/kg-K)
310,8	945
366,3	978
421,9	1004
477,4	1028
533	1052
588,6	1078
644,1	1104
699,7	1133
844,1	1230



Tabel 3. 15 Konduktivitas Termal Aluminium 6061-T6  
(Sumber: Kiral, 2013)

Temperatur (K)	Konduktivitas Termal (W/m-K)
310,8	162
366,3	177
421,9	184
477,4	192
533	201
588,6	207
644,1	217
699,7	223
844,1	253

Tabel 3. 16 Densitas Aluminium 6061-T6  
(Sumber: Riahi, 2011)

Temperatur (K)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )
298	2700
310,8	2685
366,3	2685
421,9	2667
477,4	2657
533	2657
588,6	2630
644,1	2620
699,7	2602



### 3.2.3 Geometri Sampel Uji dan Furnace

Di dalam penelitian ini, digunakan geometri sampel uji yang beragam yaitu objek silinder, objek balok dan juga objek silinder di dalam *crucible*. Dengan ketinggian masing – masing objek yang berbeda pula. Untuk simulasi terhadap daging sapi silinder dan daging salmon balok, perincian geometri yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 3.17 dan Tabel 3.18 sedangkan perincian geometri dari wadah *crucible* ditunjukkan oleh Tabel 3.19.

Tabel 3. 17 Geometri dari Daging Sapi

Parameter	Besaran
Panjang daging sapi	1,25 cm, 2,5 cm, 3,75 cm, 5 cm
Jari – jari daging sapi	0,5 cm

Tabel 3. 18 Geometri dari Daging Salmon

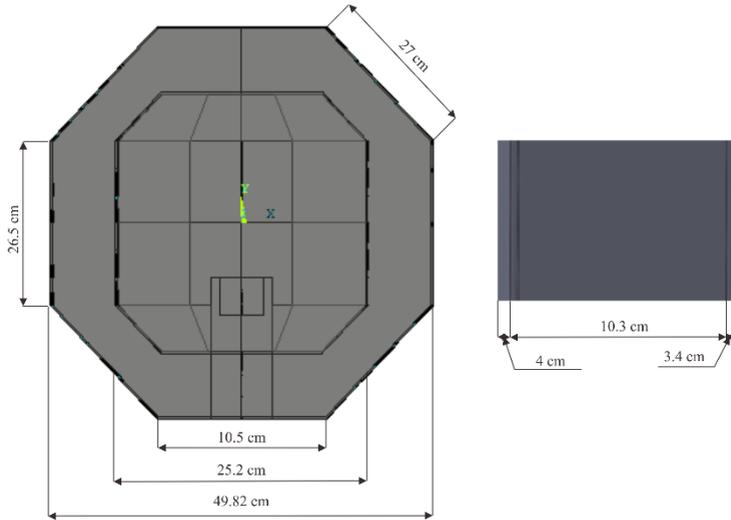
Parameter	Besaran
Tebal daging salmon	0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm, 5 cm
Panjang daging salmon	7 cm
Lebar daging salmon	4 cm



Tabel 3. 19 Geometri dari Wadah Crucible

Parameter	Besaran
Diameter luar crucible	5 cm
Diameter dalam crucible	7 cm
Tinggi crucible	12 cm
Kedalaman crucible	1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm, 6 cm

Setelah didapatkan prosedur simulasi dari objek berbentuk silinder, balok dan silinder di dalam wadah crucible menggunakan daging sapi dan daging salmon, prosedur pun diaplikasikan pada material  $\text{FeTiO}_3$  yang dipanaskan dengan menggunakan *Microwave* konvensional dengan daya 1,2 kW dan *Microwave Batch Furnace* dengan daya 5,55 kW. Geometri dari *Microwave Batch Furnace* yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Geometri *Microwave Batch Furnace*

### 3.3 Peralatan Penelitian

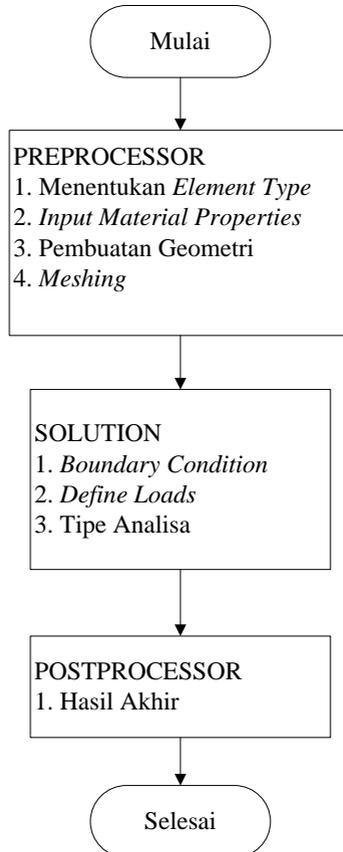
Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Solidworks 2014 x64 Edition adalah salah satu software CAD yang digunakan untuk membuat desain 3D dari *Microwave Batch Furnace* yang hasilnya kemudian diimport ke dalam software ANSYS dengan format *x\_t*.
2. ANSYS Mechanical APDL 17.0 adalah salah satu software simulasi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada pemanasan gelombang mikro dan menganalisis distribusi temperatur berbasis metode elemen hingga.



### 3.4 Pemodelan dengan ANSYS 17.0

Diagram alir dari pemodelan perpindahan panas pada pemanasan gelombang mikro dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL 17.0 dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pemodelan Menggunakan Metode Elemen Hingga

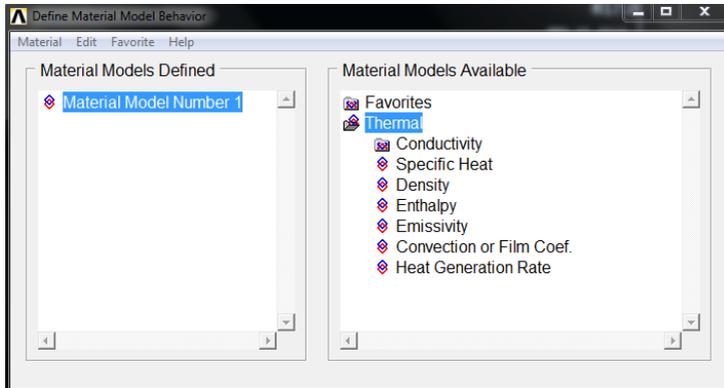


### 3.4.1 Pemodelan *Element Type*

Dalam penelitian ini, tipe elemen yang digunakan adalah SOLID70 (brick 8 node 70) dikarenakan elemen ini memiliki kapabilitas untuk digunakan dalam konduksi termal secara 3 dimensi. Elemen ini memiliki 8 *node* dengan jumlah derajat kebebasannya sebesar satu dan satu nilai temperatur pada setiap *node*. Elemen ini juga dapat diaplikasikan pada keadaan *steady state* 3D dan juga sangat tepat digunakan untuk analisis transien perpindahan panas.

### 3.4.2 Pemodelan Sifat Material

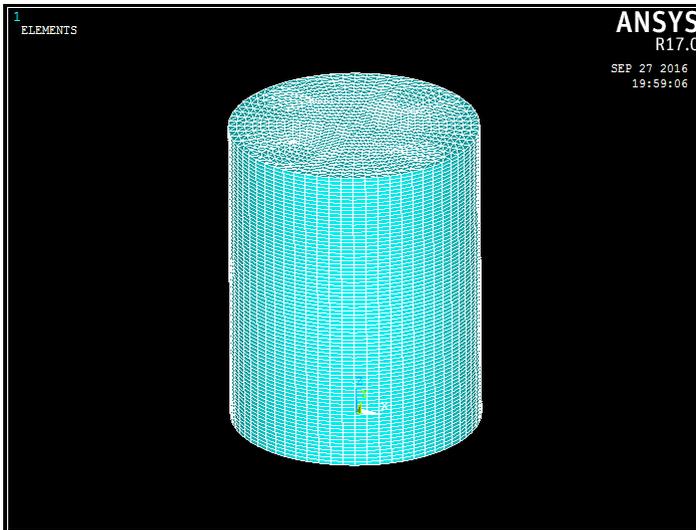
Pada penelitian ini proses pemasukan sifat material dibagi menjadi 5 tahap berdasarkan diagram alir penelitian yaitu sifat material dari daging sapi, sifat material dari daging salmon, sifat material  $\text{FeTiO}_3$  dengan bentuk silinder, sifat material  $\text{FeTiO}_3$  dengan bentuk balok dan sifat material dari  $\text{FeTiO}_3$ , crucible, dan material dari dinding furnace yaitu Aluminium 6061-T6, keramik silika-alumina dan baja AISI 1006. Jenis Material property yang digunakan dalam penelitian ini adalah sifat – sifat termal dari material meliputi konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik dan densitas. Semua sifat termal dari material yang ditunjukkan pada Tabel 3.2, 3.4, 3.6 hingga 3.7 serta Tabel 3.9 hingga 3.16 dimasukkan pada menu material properties seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



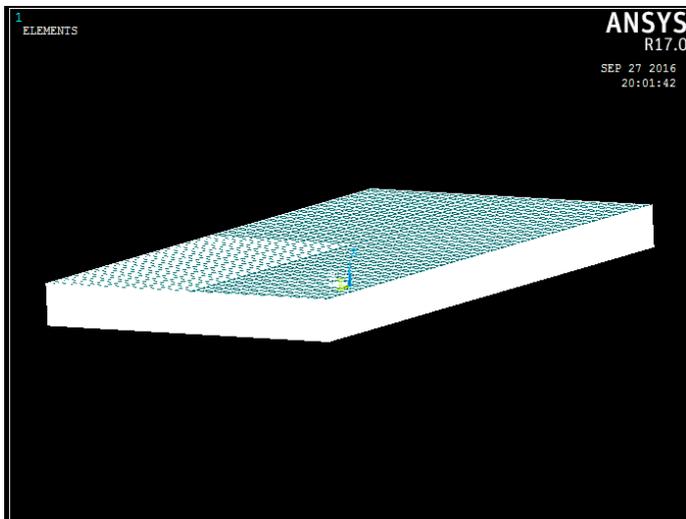
Gambar 3. 4 Input untuk Sifat Material

### 3.4.3 Meshing

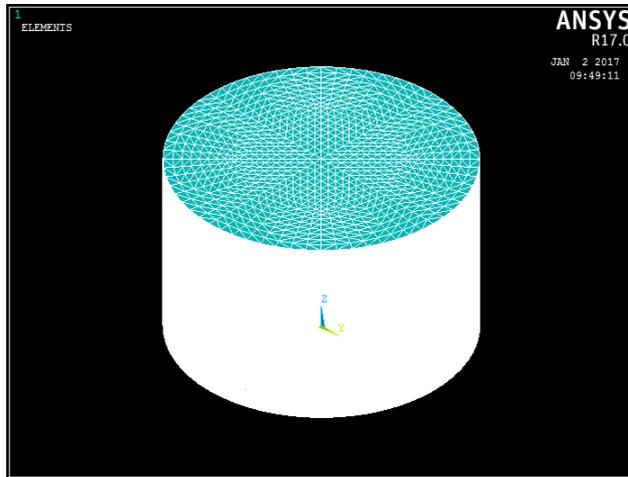
Metode meshing yang digunakan pada daging sapi silinder dan daging salmon balok adalah dengan cara sweeping luasan alas material lalu di *extrude* hingga sepanjang ketinggian material yang dikehendaki. Elemen yang digunakan berupa tetragonal dengan ukuran menggunakan pengaturan *smart size*. Sedangkan untuk proses mesh dari *Microwave Batch Furnace* digunakan metode *free mesh* dengan ukuran elemen ditentukan sebesar 0,01 dengan bentuk tetragonal. Hasil meshing dari daging sapi silinder, daging salmon balok, wadah *crucible* dan *Microwave Batch Furnace* ditunjukkan oleh Gambar 3.5 hingga 3.8.



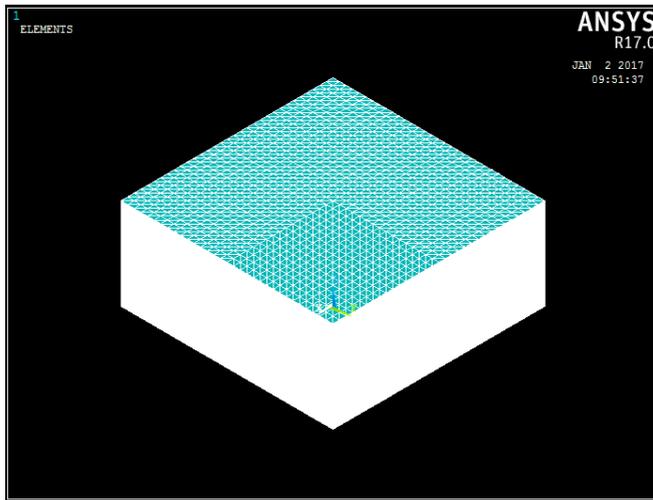
Gambar 3. 5 Hasil Meshing Daging Sapi Silinder



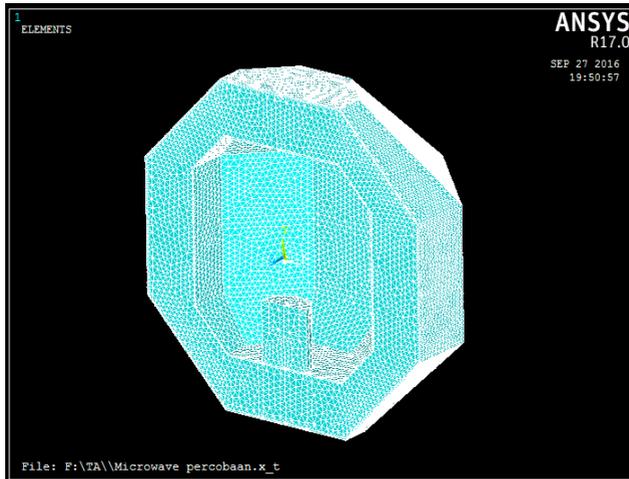
Gambar 3. 6 Hasil Meshing Daging Salmon Balok



Gambar 3.7 Hasil Meshing Silinder  $\text{FeTiO}_3$



Gambar 3.8 Hasil Meshing Balok  $\text{FeTiO}_3$



Gambar 3. 9 Hasil Meshing *Microwave Batch Furnace*

#### 3.4.4 Boundary Condition

Perpindahan panas yang terjadi pada proses pemanasan gelombang mikro diawali dengan adanya generasi panas yang muncul dari dalam material yang kemudian dikonduksikan ke segala arah dari dalam material dan terdapat konveksi di bagian permukaan material dengan udara dengan koefisien *heat transfer* sebesar  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dalam penelitian ini, dianggap tidak ada panas yang keluar maupun masuk ke dalam sistem atau adiabatik.

#### 3.4.5 Pembebanan

Dalam penelitian ini, pembebanan yang diberikan adalah berupa generasi panas yang dirumuskan oleh teorema Poynting pada persamaan 2.27 dan generasi panas tersebut diaplikasikan pada setiap  $1/80$  dari ketinggian material. Selain itu, flux energi akibat gelombang mikro dijaga konstan sebesar  $3 \text{ W/cm}^2$  untuk microwave konvensional dengan daya sebesar 1,2



kW. Sedangkan untuk *Microwave Batch Furnace*, flux energi akibat gelombang mikro juga dijaga konstan sebesar  $13,875 \text{ W/cm}^2$  dengan daya sebesar 5,55 kW. Lalu pada permukaan luar material terjadi konveksi dengan koefisien heat transfer sebesar  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$  dengan temperatur udara sebesar 298 K.

#### **3.4.6 Tipe Analisis**

Tipe analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan tipe analisis transien hingga temperatur mencapai 1223 K untuk mendapatkan distribusi temperatur yang dihasilkan selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro. Analisis transien dipilih karena analisis ini tepat digunakan untuk fenomena yang terjadi selama pemanasan gelombang mikro yang akan menghasilkan distribusi temperatur yang berbeda – beda seiring dengan bertambahnya waktu. Sedangkan temperatur 1223 K dipilih karena pada temperatur di atas 1223 K,  $\text{FeTiO}_3$  akan terdekomposisi.

#### **3.4.7 Validasi**

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini kemudian akan divalidasi dengan perhitungan analitis yang telah dilakukan oleh Mohammad Hossan pada tahun 2010 – 2012 dengan jurnalnya yang telah ditulis berjudul “Analysis of Microwave Heating for Cylindrical Shaped Objects” dan “Analytical Solution for Temperature Distribution in Microwave Heating of Rectangular Objects”.

### **3.5 Rancangan Penelitian**

Untuk pelaksanaan penelitian, rancangan penelitian yang dilakukan dibagi menjadi 4 yaitu rancangan penelitian untuk pemanasan daging sapi berbentuk silinder, rancangan penelitian untuk pemanasan daging salmon berbentuk balok, rancangan penelitian untuk pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  dengan beragam bentuk dan rancangan penelitian untuk pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  di dalam



*Microwave Batch Furnace* yang ditunjukkan oleh Tabel 3.20, 3.21, 3.22 dan 3.23 sebagai berikut

Tabel 3.20 Rancangan Penelitian untuk Pemanasan Daging Sapi

No.	Variabel Terikat	Variabel Bebas			
		L = 1,25 cm	L = 2,5 cm	L = 3,75 cm	L = 5 cm
1	Diameter 1 cm	v	v	v	v

Dalam penelitian ini, variasi yang digunakan untuk pemanasan daging sapi berupa ketinggian dari silinder yaitu 1,25 cm, 2,5 cm, 3,75 cm dan 5 cm. Diameter silinder diatur konstan sebesar 1 cm. Variasi ini dipilih dikarenakan variasi ini juga digunakan pada penelitian yang dilakukan oleh Hossan pada tahun 2009. Sehingga untuk memverifikasi hasil simulasi, maka variasi yang digunakan haruslah sama dengan referensi yang digunakan.

Tabel 3.20 Rancangan Penelitian untuk Pemanasan Daging Salmon

No.	Variabel Terikat	Variabel Bebas			
		b = 0,5 cm	b = 1,5 cm	b = 2,5 cm	b = 5 cm
1	Luas area 28 cm <sup>2</sup>	v	v	v	v

Sedangkan variasi yang digunakan pada pemanasan daging salmon berbentuk balok adalah ketebalan dari balok yaitu 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 5 cm. Variasi ini dipilih karena bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Hossan pada tahun 2011. Karena dengan variasi yang sama, maka proses validasi dapat dilakukan.



Pada pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  digunakan 4 parameter sebagai variasi yaitu diameter sampel, daya dari sumber penembak gelombang elektromagnetik, bentuk dari sampel dan ketinggian dari sampel. Hal ini dipilih karena keempat parameter tersebut merupakan faktor – faktor yang dapat mempengaruhi hasil akhir produk setelah dipanaskan menggunakan gelombang mikro (Kelen, 2006). Sehingga dari kombinasi beberapa parameter tersebut akan didapatkan kriteria dari masing – masing parameter yang dapat menghasilkan produk akhir yang paling optimum. Tanda cek pada Tabel 3.22 menandakan bahwa sampel memiliki sifat dari parameter yang diberi tanda tersebut. Sebagai contoh, sampel A memiliki diameter sebesar 7 cm dan dipanaskan dengan sumber gelombang elektromagnetik sebesar 1,2 Kw. Sampel tersebut memiliki bentuk silinder dengan ketinggian sebesar 1,5 cm.



Tabel 3.22 Rancangan Penelitian untuk  $\text{FeTiO}_3$

No.	Sampel	Variabel											
		Diameter (cm)		Daya (kW)		Silinder		Balok		Ketinggian (cm)			
		7	10	1,2	5,55					1,5	3	4,5	6
1	A	v		v		v				v			
2	B	v		v		v					v		
3	C	v		v		v						v	
4	D	v		v		v							v
5	E	v		v				v		v			
6	F	v		v				v			v		
7	G	v		v				v				v	
8	H	v		v				v					v
9	I	v			v				v	v			
10	J	v			v						v		
11	K	v			v							v	
12	L	v			v								v



No.	Sampel	Variabel													
		Diameter (cm)		Daya (kW)		Bentuk		Ketinggian (cm)							
		7	10	1,2	5,55	Silinder	Balok	1,5	3	4,5	6				
13	M	v			v		v				v				
14	N	v			v		v				v				
15	O	v			v		v				v			v	
16	P	v			v		v				v				v
17	Q		v	v		v					v				
18	R		v	v		v					v				
19	S		v	v		v					v			v	
20	T		v	v		v					v				v
21	U		v	v							v				
22	V		v	v							v			v	
23	W		v	v							v				v
24	X		v	v							v				v



No.	Sampel	Variabel											
		Diameter (cm)		Daya (kW)		Silinder		Balok		Ketinggian (cm)			
		7	10	1,2	5,55					1,5	3	4,5	6
25	Y		v		v	v				v			
26	Z		v		v	v					v		
27	A1		v		v	v						v	
28	B1		v		v	v							v
29	C1		v		v			v		v			
30	D1		v		v			v			v		
31	E1		v		v			v				v	
32	F1		v		v			v					v



Tabel 3.23 Rancangan Penelitian untuk  $\text{FeTiO}_3$  di Dalam Sistem  
*Microwave Batch Furnace*

No.	Variabel Terikat	Variabel Bebas			
		L = 1.5 cm	L = 3 cm	L = 4.5 cm	L = 6 cm
1	Pemanasan 1 sisi	v	v	v	v
2	Pemanasan 2 sisi	v	v	v	v

Simulasi pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  dalam *Microwave Batch Furnace* juga dilakukan dengan menggunakan variasi berupa arah datangnya sumber penembakan sumber gelombang elektromagnetik, yaitu penembakan yang berasal dari satu sisi atas dan penembakan yang berasal dari kedua sisi yaitu bagian atas dan bagian bawah. Selain itu, analisis juga dilakukan dengan ketinggian sampel yang berbeda – beda, 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm, pada masing – masing arah sumber penembakan.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

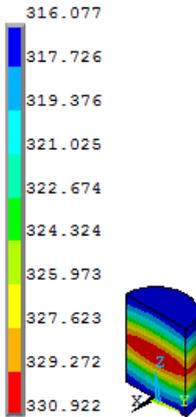
#### 4.1 Analisis Distribusi Temperatur pada Daging Sapi Berbentuk Silinder

Pada penelitian ini, simulasi dilakukan pada daging sapi berbentuk silinder dengan jari – jari yang dijaga konstan sebesar 0,5 cm, sedangkan ketinggian daging sapi divariasikan dari 1,25 cm, 2,5 cm, 3,75 cm dan 5 cm. Sifat dielektrik maupun termal dari daging sapi ditunjukkan oleh Tabel 3.1 dan 3.2. Temperatur awal benda sebelum dilakukan proses pemanasan dijaga pada temperatur kamar yaitu sebesar 298 K. Besar fluks energi akibat gelombang mikro yang datang ( $I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$ ) dijaga konstan sebesar 3 W/cm<sup>2</sup>. Nilai ini sesuai dengan besar energi yang dihasilkan oleh *microwave* konvensional dengan daya sebesar 1,2 kW. Waktu pemanasan yang digunakan adalah selama 120 detik. Selain dikenai fluks energi, benda uji juga mengalami konveksi dengan udara di sekitar yang berada di dalam furnace dimana konstanta *heat transfer* dari udara yang digunakan adalah sebesar 10 W/m<sup>2</sup>.K

Distribusi temperatur selama proses pemanasan adalah salah satu parameter yang dapat digunakan untuk mengukur keefektifan dari proses pemanasan menggunakan gelombang mikro. Gambar 4.1 menunjukkan distribusi temperatur pada daging sapi setelah dilakukan pemanasan selama 120 detik dengan frekuensi gelombang pemanasan sebesar 2450 MHz.

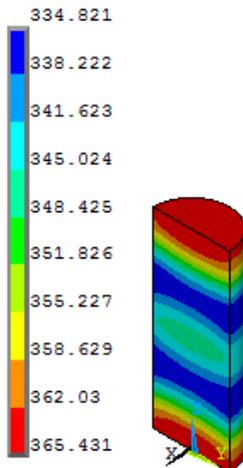


T (K)

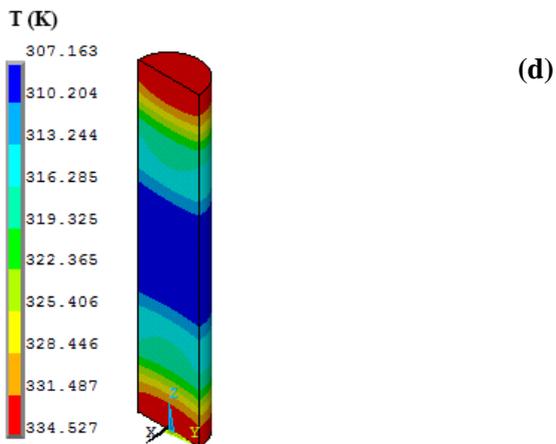
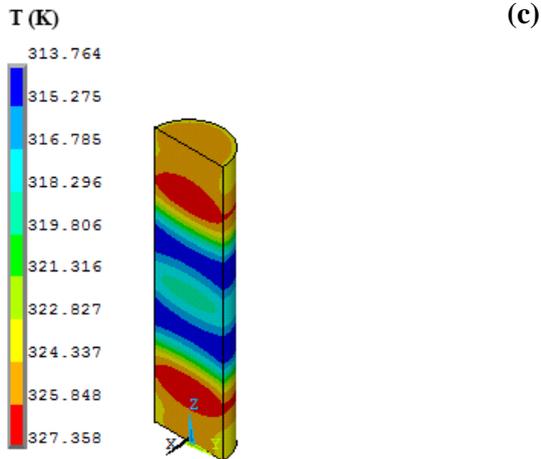


(a)

T (K)



(b)

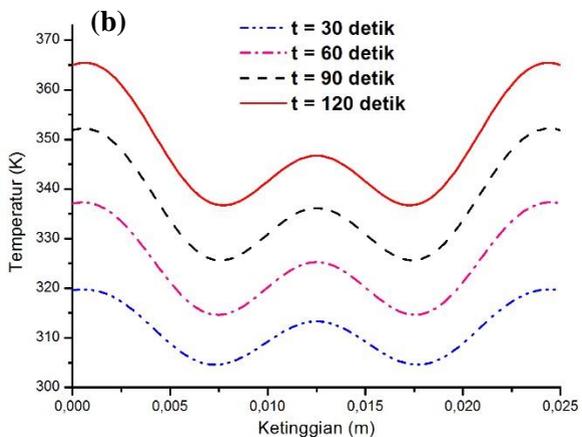
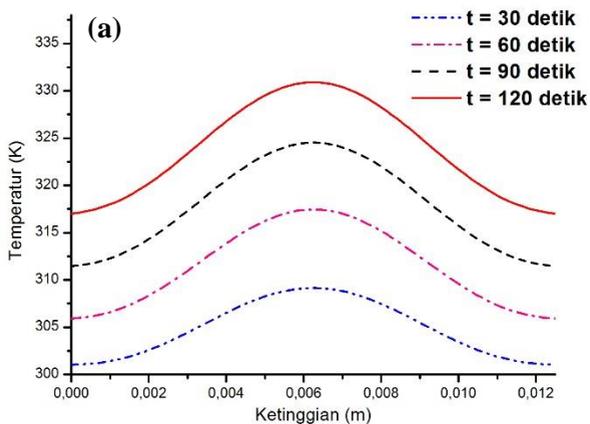


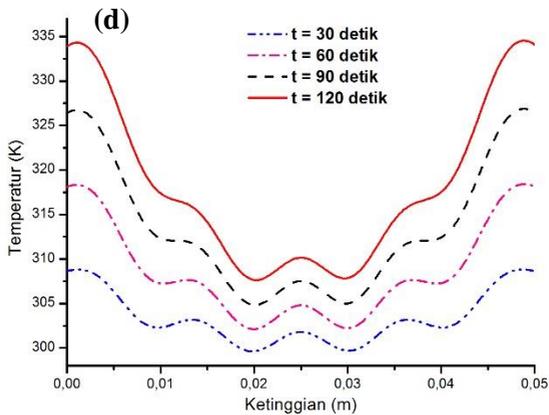
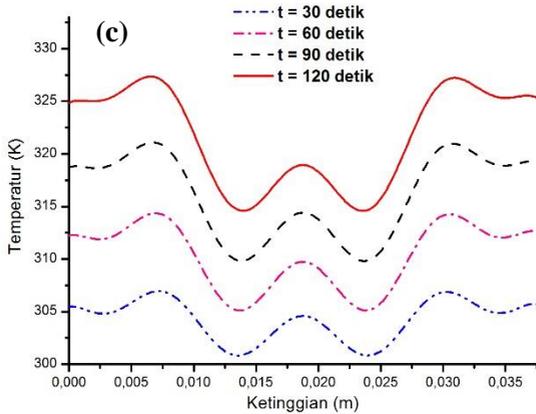
Gambar 4.1 Kontur Distribusi Temperatur untuk Pemanasan Daging Sapi Berdiameter 1 cm Selama 120 detik (a)  $l = 1,25$  cm, (b)  $l = 2,5$  cm, (c)  $l = 3,75$  cm dan (d)  $l = 5$  cm.



Pada sistem pemanasan konvensional, dengan besar energi yang diberikan, temperatur awal dan koefisien perpindahan panas secara konveksi dibuat sama maka dapat diprediksi bahwa kenaikan temperatur tertinggi akan dialami oleh silinder dengan ketebalan terendah ( $t = 1,25$  cm) sedangkan kenaikan temperatur terendah akan dialami oleh silinder yang memiliki ketebalan yang paling tinggi ( $t = 5$  cm). Namun berdasarkan hasil simulasi dari proses pemanasan gelombang mikro pada Gambar 4.1 didapatkan bahwa temperatur maksimum dialami oleh silinder dengan ketebalan 2,5 cm sebesar 365,431 K. Pada Gambar 4.1 ini juga dapat dilihat bahwa pada keempat silinder mengalami distribusi temperatur yang tidak merata. Hal ini mengindikasikan bahwa laju generasi panas yang terjadi selama proses pemanasan gelombang mikro lebih cepat dibandingkan laju konduksi panas yang diakibatkan oleh nilai konduktivitas termal dari material yang cukup rendah.

Distribusi temperatur pada bagian tengah dari silinder setelah pemanasan selama 120 detik ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Hasil menunjukkan bahwa pada silinder dengan ketebalan paling rendah, temperatur tertinggi berada pada bagian tengah dan pada masing – masing bagian ujung, temperaturnya minimum. Akan tetapi, tren ini berbalik seiring dengan naiknya ketebalan dari silinder. Seiring dengan bertambahnya ketebalan, daerah tengah dari silinder menjadi lebih dingin dibandingkan bagian ujung – ujungnya. Temperatur juga meningkat secara konstan seiring berjalannya waktu pada keempat jenis silinder.



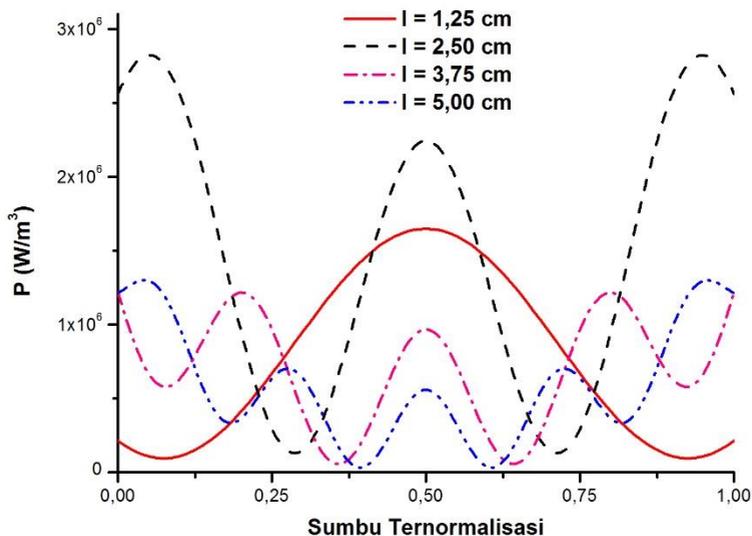


Gambar 4.2 Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Silinder dengan Waktu yang Berbeda (a)  $l = 1,25$  cm, (b)  $l = 2,5$  cm, (c)  $l = 3,75$  cm dan (d)  $l = 5$  cm

Pada silinder dengan ketinggian 1.25 cm, temperatur maksimum terdapat pada bagian tengah benda sedangkan pada



sampel lainnya temperatur maksimum terdapat pada bagian ujung – ujung benda. Hal ini disebabkan oleh generasi panas yang terjadi pada masing – masing spesimen. Generasi panas yang dihasilkan oleh masing – masing silinder ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Generasi panas maksimum pada silinder dengan ketinggian 1,25 cm juga dicapai pada bagian tengah benda uji sedangkan pada ketinggian lainnya, generasi panas tertinggi terjadi pada bagian ujung – ujung. Generasi panas tertinggi dicapai oleh silinder dengan ketinggian 2,5 cm sehingga menyebabkan silinder ini juga menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan silinder yang lain.



Gambar 4.3 Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah Silinder untuk Frekuensi Pemanasan 2450 MHz



Selain dari generasi panas yang terjadi, fenomena tidak meratanya temperatur ini dapat dijelaskan dari seberapa dalam gelombang mikro dapat berpenetrasi di dalam objek yang dipanaskan. Kedalaman penetrasi sendiri adalah ukuran seberapa jauh gelombang dapat diserap habis di dalam objek yang dipanaskan dan dikonversikan menjadi bentuk energi lain. Pada sampel dengan ketinggian 2,5 cm, 3,75 cm dan 5 cm, temperatur maksimum terjadi pada bagian ujung – ujung sampel. Hal ini menandakan bahwa pada bagian ujung terjadi penyerapan energi gelombang elektromagnetik yang paling besar sehingga menyebabkan dipol – dipol pada bagian ujung akan berotasi paling cepat dan temperatur yang terjadi juga menjadi lebih tinggi.

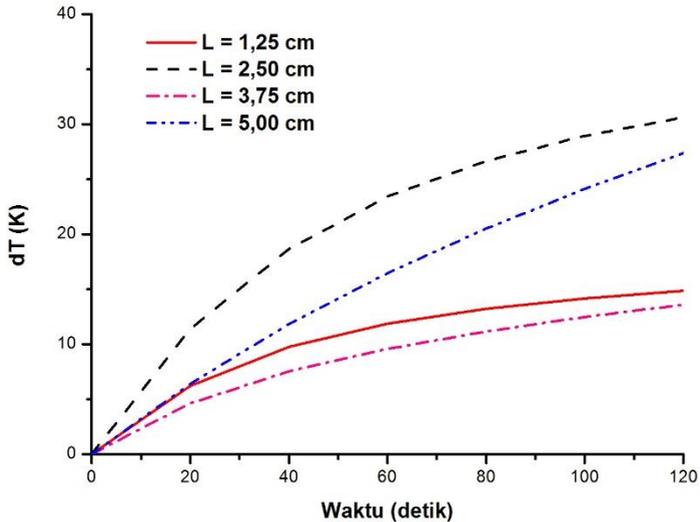
Kemampuan penyerapan energi ini akan berkurang hingga batas energi tersebut habis diserap oleh objek dimana dapat dilihat dari kedalaman penetrasinya. Berdasarkan persamaan 2.6 didapatkan kedalaman penetrasi untuk daging sapi adalah sebesar 1,1345 cm. Dari kedalaman penetrasi ini juga dapat dijelaskan alasan mengapa pada sampel dengan ketinggian 1,25 cm mencapai temperatur maksimumnya pada bagian tengah objek. Nilai kedalaman penetrasi lebih besar dibandingkan setengah nilai ketinggian objek sampel. Sehingga menyebabkan pada bagian tengah sampel, dipol akan dipengaruhi oleh medan listrik dari dua arah sehingga dipol akan berotasi dengan cepat pada dua arah secara bergantian dan menyebabkan friksi yang terjadi akibat tabrakan antar dipol menjadi lebih besar. Akibat friksi antar dipol yang besar pada bagian tengah sampel, temperatur maksimum yang terjadi akan berada pada bagian tengah sampel pula.

Untuk menganalisa keseragaman temperatur selama proses pemanasan juga dapat menggunakan rentan temperatur antara temperatur maksimum dan minimum seiring dengan kenaikan temperatur. Gambar 4.4 menunjukkan bahwa semakin bertambahnya waktu maka perbedaan antara temperatur



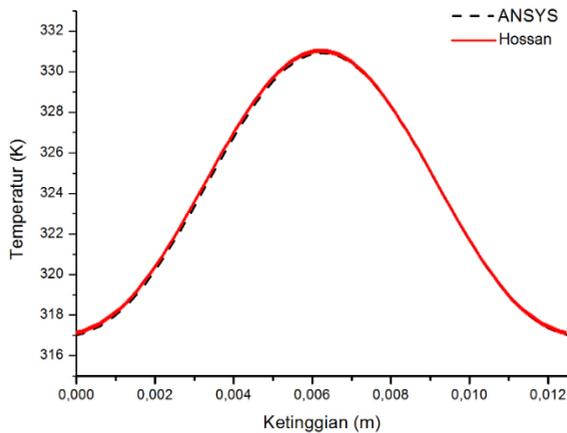
maksimum dan minimum juga bertambah. Untuk silinder dengan ketinggian 2,5 cm menunjukkan kenaikan perbedaan temperatur yang sangat signifikan. Hal ini disebabkan karena generasi panas yang terjadi pada silinder ini juga paling tinggi. Pada waktu 120 detik, rentan temperatur pada silinder dengan ketinggian 1,25 cm, 2,5 cm, 3,75 cm dan 5 cm adalah sebesar 14,84 K, 30,61 K, 13,6 K dan 27,37 K. Semakin tinggi perbedaan temperatur yang terjadi mengindikasikan terjadinya penyebaran temperatur yang tidak merata.

Berdasarkan Gambar 4.4, spesimen dengan ketinggian 2,5 cm kurang efektif ketika dipanaskan dengan gelombang mikro karena walaupun temperatur yang dicapai paling maksimum dibandingkan dengan yang lain. Namun pada daerah lain, temperaturnya masih minimum sehingga menyebabkan penyebaran temperatur yang tidak merata. Spesimen dengan ketinggian 5 cm juga kurang efektif ketika dipanaskan dengan menggunakan gelombang mikro. Hal ini dikarenakan perbedaan temperatur yang terjadi seiring berjalannya waktu juga masih cukup besar.



Gambar 4.4 Variasi Perbedaan Temperatur untuk Silinder dengan Ketinggian yang Berbeda

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang benar dan sesuai dengan referensi serta tidak menyimpang dari permasalahan yang dianalisa sehingga dapat diaplikasikan untuk kebutuhan material lainnya, maka hasil output dari ANSYS divalidasi dengan penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Robiul Hossan pada tahun 2010. Validasi dilakukan dengan cara menyuperposisi kurva hasil permodelan ANSYS dengan kurva hasil perhitungan analitis dari Hossan pada saat ketinggian silinder sebesar 1,25 cm dimana semua kondisi disamakan.



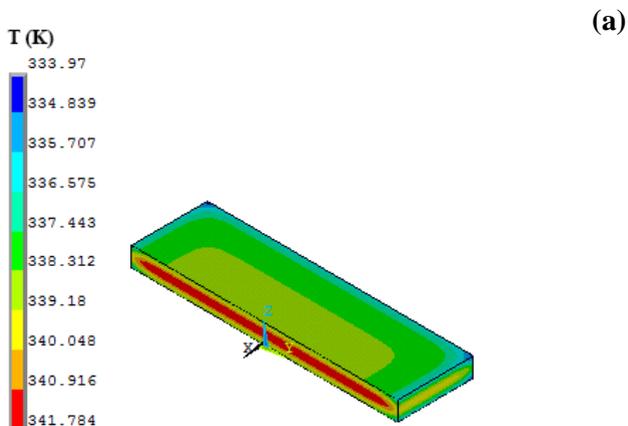
Gambar 4.5 Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur antara Perhitungan Pemodelan dengan ANSYS dan Hasil Analitis yang Dilakukan Hossan pada Saat  $l = 1.25$  cm

Pada pemodelan dengan ANSYS didapatkan rata - rata error sebesar 0,13 % dari hasil analitis yang telah dilakukan oleh Hossan. Error ini didapatkan dengan cara membandingkan secara langsung nilai - nilai yang berada pada masing - masing kurva. Nilai simpangan baku yang terjadi antara perhitungan pemodelan dengan hasil analitis adalah sebesar  $\pm 0,535$ . Hal ini dikarenakan adanya kemungkinan pembagian elemen yang masih dianggap sedikit sehingga menghasilkan selisih antara hasil pemodelan dengan hasil analitis dan juga disebabkan karena perbedaan penggunaan selisih temperatur saat generasi panas diaplikasikan. Dari grafik distribusi temperatur yang ditunjukkan oleh Gambar 4,5 maka dapat disimpulkan bahwa metode yang digunakan dalam pemodelan menggunakan ANSYS 17.0 benar dan dapat diaplikasikan untuk jenis material lainnya.



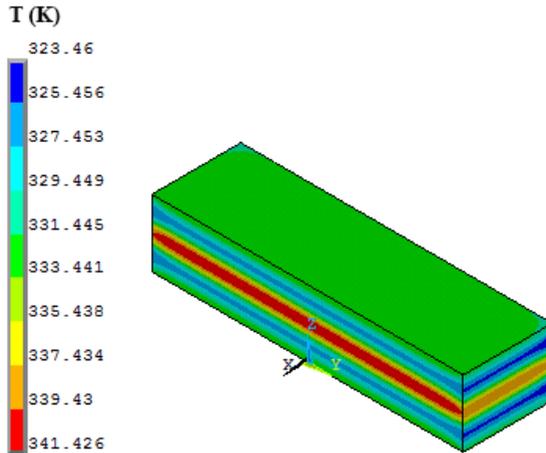
## 4.2 Analisis Distribusi Temperatur pada Daging Salmon Berbentuk Balok

Selain bentuk silinder, bentuk balok yang memiliki ujung – ujung tajam juga dipertimbangkan untuk dianalisa karena dapat mempengaruhi distribusi temperatur suatu benda saat dipanaskan menggunakan gelombang mikro. Dalam penelitian ini, benda uji berupa daging salmon dengan panjang dan lebar sebesar 7 cm dan 4 cm dengan ketebalan yang berbeda – beda sebesar 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 5 cm. Sifat dielektrik dan termal dari daging salmon ditunjukkan oleh Tabel 3.3 dan 3.4. Fluks energi yang diberikan akibat gelombang mikro sebesar  $3 \text{ W/cm}^2$ . Nilai ini sesuai dengan fluks yang dihasilkan oleh microwave konvensional berdaya 1,2 kW. Temperatur sistem dijaga konstan pada temperatur kamar yaitu sebesar 298 K. Variasi ketebalan daging salmon digunakan untuk menjelaskan pengaruh ketinggian benda uji terhadap distribusi temperatur selama proses pemanasan menggunakan gelombang mikro. Waktu pemanasan yang digunakan adalah sebesar 75 detik.

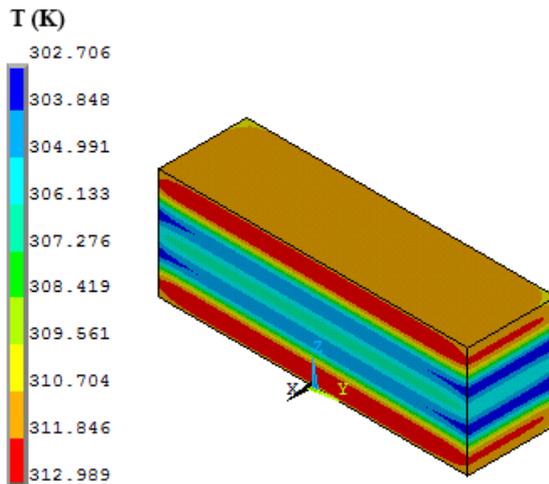


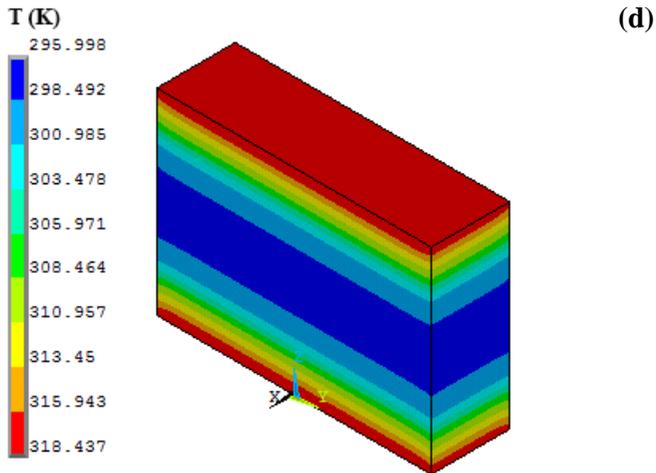


(b)



(c)





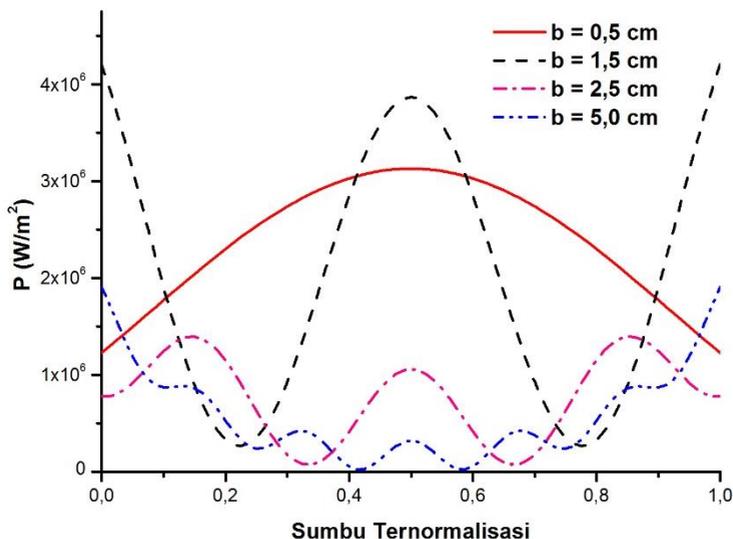
Gambar 4.6 Kontur Distribusi Temperatur untuk Pemanasan Daging Salmon dengan Panjang dan Lebar Sebesar 7 cm dan 4 cm Selama 75 s (a)  $b = 0,5$  cm, (b)  $b = 1,5$  cm, (c)  $b = 2,5$  cm dan (d)  $b = 5$  cm.

Untuk mengukur keefektifan dari proses pemanasan menggunakan gelombang mikro maka dilakukanlah analisa terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan selama proses pemanasan. Gambar 4.6 menunjukkan distribusi temperatur pada daging salmon selama 75 detik dengan pemanasan gelombang mikro menggunakan frekuensi 2450 MHz.

Dari hasil simulasi menggunakan ANSYS seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6. dapat dilihat bahwa keempat spesimen mengalami distribusi temperatur yang tidak merata dimana hal ini berarti bahwa laju generasi panas juga berjalan lebih



cepat dibandingkan laju konduksi pada spesimen dengan bentuk balok. Temperatur maksimum yang terjadi pada balok dengan ketinggian 0,5 cm dan 1,5 cm terdapat pada bagian tengah dari benda uji. Sedangkan pada spesimen dengan ketinggian 2,5 cm dan 5 cm, temperatur maksimumnya dicapai pada bagian ujung – ujungnya. Hal ini dapat dijelaskan dari generasi panas yang dihasilkan oleh masing – masing spesimen. Area yang mencapai temperatur paling maksimum menunjukkan bahwa di daerah tersebut generasi panas yang dihasilkan juga maksimum. Generasi panas yang dihasilkan oleh keempat spesimen dapat dilihat pada grafik yang tertera dalam Gambar 4.7



Gambar 4.7 Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah Balok untuk Frekuensi Pemanasan 2450 MHz



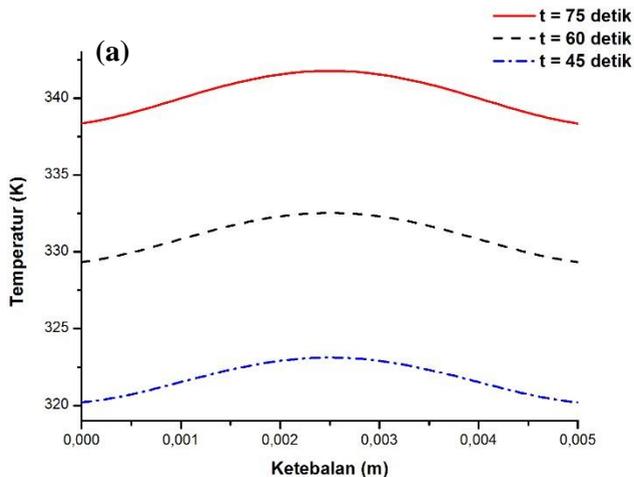
Selain dari generasi panas yang terjadi, temperatur yang tidak merata juga disebabkan oleh interaksi dipol di dalam objek yang berbeda – beda akibat kemampuan penyerapan objek terhadap energi elektromagnetik yang datang. Untuk mengukur seberapa dalam suatu gelombang elektromagnetik dapat diserap oleh objek yang dipanaskan. Pada sampel dengan ketinggian 1,5 cm, 2,5 cm dan 5 cm, temperatur maksimum yang terjadi terdapat pada bagian ujung – ujung sampel. Hal ini dikarenakan pada bagian ujung – ujung objek menyerap energi yang lebih besar dan kemampuan penyerapan energi ini akan berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman gelombang berpenetrasi hingga pada kedalaman 0,776 cm untuk daging salmon sesuai dengan persamaan 2.6.

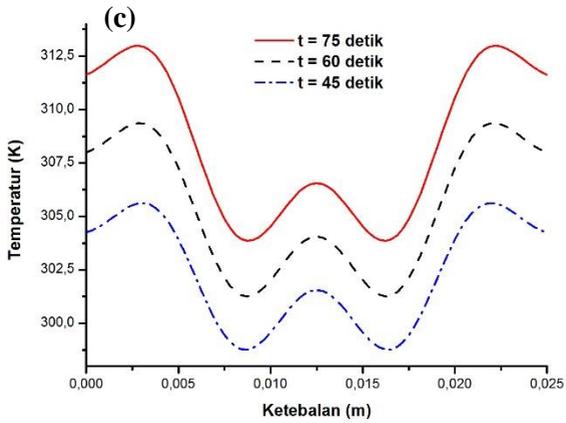
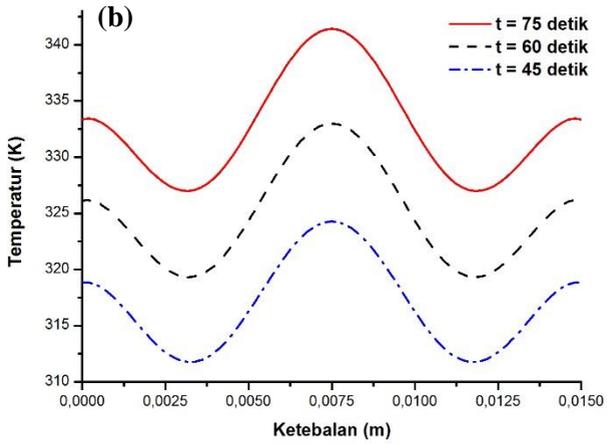
Besar nilai kedalaman penetrasi gelombang mikro pada daging salmon lebih besar dibandingkan setengah ketinggian sampel 1,5 cm. Hal ini menyebabkan dipol pada bagian tengah sampel ini akan berotasi pada dua arah secara cepat dan bergantian mengikuti dua arah medan magnet yang mempengaruhi. Akibat rotasi yang cepat dan terjadi secara bergantian menyebabkan terjadinya friksi yang besar sehingga menyebabkan temperatur yang terjadi pada bagian sampel juga tinggi.

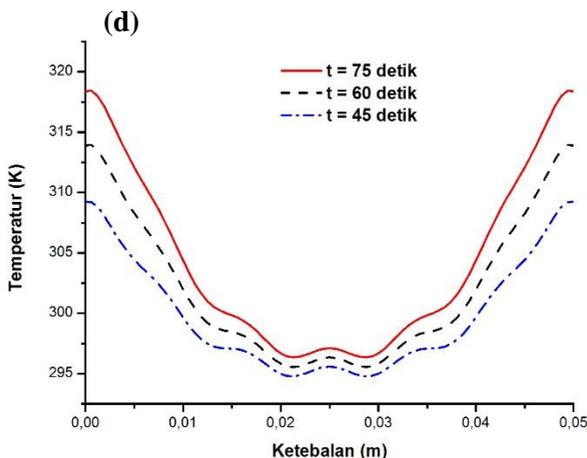
Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa spesimen dengan ketinggian 1,5 cm menunjukkan pencapaian generasi panas yang maksimum pada bagian ujung atas dan bawah serta bagian tengah balok salmon. Namun dari hasil simulasi distribusi temperaturnya didapatkan bahwa temperatur maksimum pada spesimen ini hanya terdapat pada bagian tengah. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada spesimen tersebut masih terpengaruh oleh konveksi yang terjadi di antara permukaan atas dan bawah spesimen dengan udara sekeliling. Sehingga temperatur yang terjadi pada bagian permukaannya tidak dapat maksimum.



Dibandingkan dengan spesimen lainnya, spesimen dengan ketinggian 1,5 cm ini menghasilkan generasi panas yang paling tinggi dibandingkan yang lainnya. Ketinggian generasi panas yang dihasilkan pada bagian ujung – ujung dan tengah besarnya tidak jauh berbeda sehingga diharapkan pada akhir proses spesimen ini dapat mencapai temperatur yang paling maksimum . Namun, dari distribusi temperatur yang dihasilkan pada Gambar 4.6, spesimen dengan ketinggian 0,5 cm mencapai temperatur yang paling maksimum. Hal ini dapat terjadi karena semakin tipis ketebalan suatu spesimen maka akan memberikan kesempatan untuk berpindah secara konduksi atau bisa dikatakan bahwa laju konduksi pada material yang lebih tipis akan lebih cepat terjadi dan akumulasi panas yang terjadi, yaitu panas akibat generasi panas dan konduksi, akan semakin banyak sehingga temperatur yang dicapai bisa maksimum.







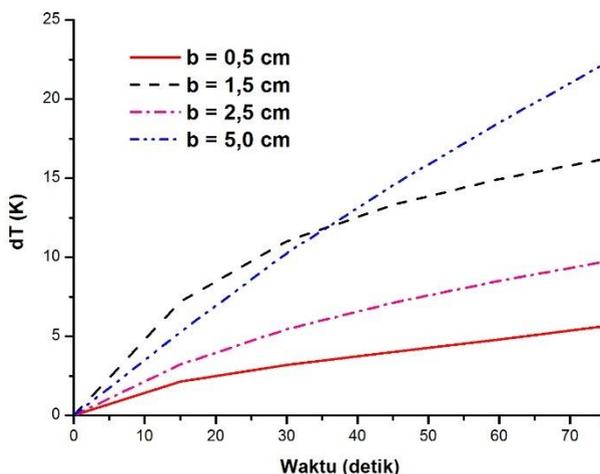
Gambar 4.8 Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Balok dengan Waktu yang Berbeda – beda (a)  $b = 0,5$  cm, (b)  $b = 1,5$  cm, (c)  $b = 2,5$  cm dan (d)  $b = 5$  cm

Gambar 4.8 menunjukkan distribusi temperatur pada keempat spesimen dengan waktu pemanasan hingga 75 detik. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa selama pemanasan menggunakan gelombang mikro, temperatur tertinggi dari spesimen dengan ketebalan 0,5 cm dan 1,25 cm terdapat pada bagian tengah dan minimum pada kedua ujungnya. Kenaikan ketebalan dari spesimen menyebabkan tren ini menjadi berubah seperti yang ditunjukkan oleh spesimen dengan ketebalan 2,5 cm dan 5 cm. Bagian ujung – ujungnya temperaturnya menjadi lebih tinggi dibandingkan daerah tengahnya. Pada spesimen dengan ketinggian 0,5 cm, kenaikan terjadi sangat signifikan. Hal ini menunjukkan kontribusi dari laju konduksi yang cukup cepat dikarenakan ketebalan spesimen yang cukup rendah bersamaan dengan laju generasi panas akibat terpapar oleh gelombang mikro. Sedangkan pada spesimen dengan ketebalan 1,5 cm dan 2,5 cm,



seiring berjalannya waktu temperatur meningkat secara konstan. Dan pada spesimen dengan ketinggian 5 cm, kenaikan temperatur yang konstan hanya terjadi pada bagian ujung – ujungnya saja, sedangkan bagian tengah hanya mengalami kenaikan temperatur yang sangat sedikit. Hal ini disebabkan karena generasi panas yang terjadi pada bagian tengah spesimen mendekati nol. Artinya tidak ada generasi panas yang terjadi pada bagian tengah spesimen sehingga kenaikan temperatur pada bagian tengah hanyalah disebabkan oleh konduksi panas yang berasal dari ujung – ujung spesimen yang menghasilkan generasi panas.

Walaupun distribusi temperturnya tidak merata pada keempat sampel, perbedaan temperatur antara temperatur maksimum dan temperatur minimum juga digunakan sebagai alat untuk menganalisa keseragaman temperatur selama proses pemanasan. Gambar 4.9 menunjukkan perbedaan temperatur yang terjadi sebagai fungsi terhadap pertambahan waktu pemanasan. Dapat dilihat bahwa pada keempat spesimen ketika waktu bertambah maka perbedaan antara temperatur maksimum dan minimum juga bertambah. Untuk spesimen dengan ketebalan 5 cm menunjukkan kenaikan perbedaan temperatur yang signifikan. Hal ini disebabkan karena adanya daerah yaitu bagian tengah yang tidak menghasilkan generasi panas, sedangkan pada bagian ujung – ujungnya generasi panas yang terjadi cukuplah tinggi sehingga hal tersebut menyebabkan perbedaan temperatur yang cukup drastis.



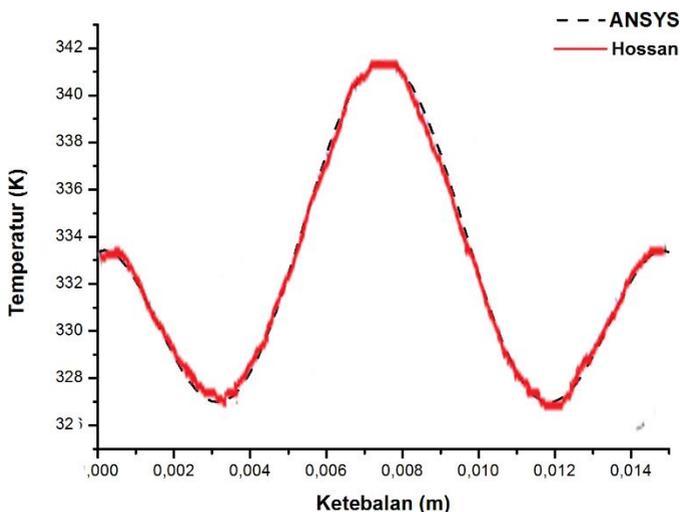
Gambar 4.9 Variasi Perbedaan Temperatur untuk Balok dengan Ketebalan yang Berbeda

Pada akhir pemanasan didapatkan bahwa perbedaan antara temperatur maksimum dan minimum pada balok dengan ketebalan 0,5 cm, 1,5 cm, 2,5 cm dan 5 cm adalah sebesar 5,64 K, 16,23 K, 9,72 K dan 22,27 K. Sehingga berdasarkan data tersebut dapat dikatakan bahwa spesimen dengan ketebalan 5 cm kurang efektif untuk dipanaskan menggunakan gelombang mikro karena perbedaannya yang cukup besar dibandingkan yang lainnya walaupun temperatur akhir yang dihasilkan dapat lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen dengan ketebalan 2,5 cm. Perbedaan temperatur yang besar ini haruslah dihindari karena akan menyebabkan gradasi temperatur yang sangat jauh sehingga produk akhir yang diinginkan tidak dapat tercapai.



Agar hasil yang didapatkan tidak menyimpang dan didapatkan hasil perhitunga yang benar, maka hasil simulasi dari ANSYS untuk objek balok divalidasi oleh penelitian yang telah dilakukan oleh Mohammad Robiul Hossan pada tahun 2011. Validasi dilakukan dengan cara menyuperposisi kurva hasil simulasi dari ANSYS dengan kurva hasil analitis dari Hossan pada objek silinder dengan ketinggian 1,5 cm dengan semua *boundary condition* disamakan.

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa hasil simulasi dari ANSYS dan hasil analitis yang telah dilakukan Hossan tidak berbeda jauh. Setelah dilakukan perhitungan error didapatkan bahwa rata – rata errornya sebesar 0,12 %. Error ini didapatkan dengan cara membandingkan secara langsung nilai – nilai yang berada pada masing – masing kurva. Nilai error yang dihasilkan tidak berbeda jauh dengan hasil validasi dari perhitungan ANSYS dengan hasil analitis untuk objek berbentuk silinder. Sehingga dapat dikatakan bahwa hasil simulasi dari ANSYS ini benar dan dapat diaplikasikan untuk jenis material lainnya. Nilai simpangan baku yang terjadi antara hasil simulasi dan hasil analitis adalah sebesar  $\pm 0,5$ . Hal ini berarti bahwa hasil perhitungan ANSYS tidak menyimpang jauh dari hasil analitis dan dapat terjadi dikarenakan pembagian elemen yang masih sedikit sehingga selisih antara perhitungan numerik dan analitik sedikit berbeda.



Gambar 4.10 Perbandingan Grafik Distribusi Temperatur antara Perhitungan Pemodelan dengan ANSYS dan Hasil Analitis yang Dilakukan Hossan pada Saat  $t = 1,5$  cm

### 4.3 Analisis Distribusi Temperatur pada $\text{FeTiO}_3$

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, didapatkan bahwa prosedur simulasi yang dilakukan menggunakan ANSYS untuk objek berbentuk silinder dan balok mendekati hasil analitis sebenarnya. Maka selanjutnya, prosedur ini digunakan untuk mensimulasikan proses pemanasan material  $\text{FeTiO}_3$  menggunakan *Microwave Batch Furnace* dengan daya 5,55 kW dan *microwave* konvensional dengan daya 1,2 kW. Bentuk dan geometri sampel diatur sehingga pada hasil akhir simulasi didapatkan apakah bentuk dan geometri dari sampel dapat mempengaruhi temperatur akhir

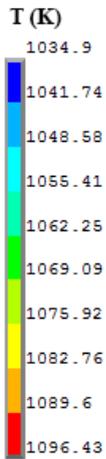


yang dicapai dalam proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  menggunakan gelombang mikro.

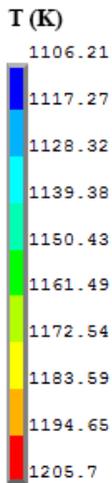
$\text{FeTiO}_3$  akan terdekomposisi menjadi logam Fe dan  $\text{TiO}_2$  pada temperatur sekitar  $950^\circ - 1000^\circ \text{C}$ . Parameter ini kemudian digunakan sebagai patokan dalam simulasi proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  selanjutnya. Waktu pemanasan diatur untuk 1 jam dengan analisis langkah tiap waktu selama 60 detik. Sampel yang digunakan dalam simulasi ini memiliki tiga bentuk yaitu  $\text{FeTiO}_3$  yang berbentuk silinder tanpa wadah,  $\text{FeTiO}_3$  yang berbentuk balok tanpa wadah dan  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder di dalam wadah silinder aluminosilikat.

#### **4.3.1 Analisis Distribusi Temperatur pada $\text{FeTiO}_3$ berbentuk Silinder**

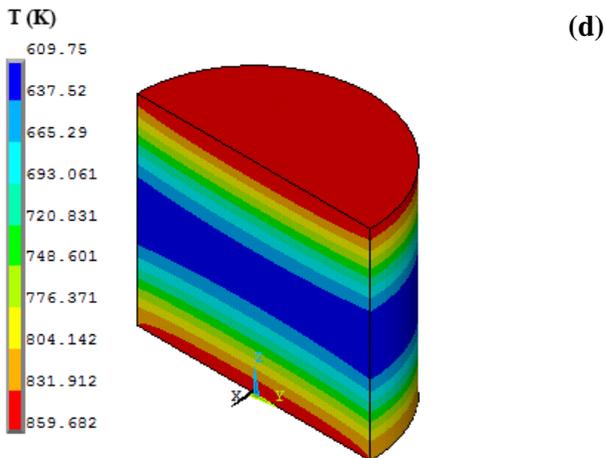
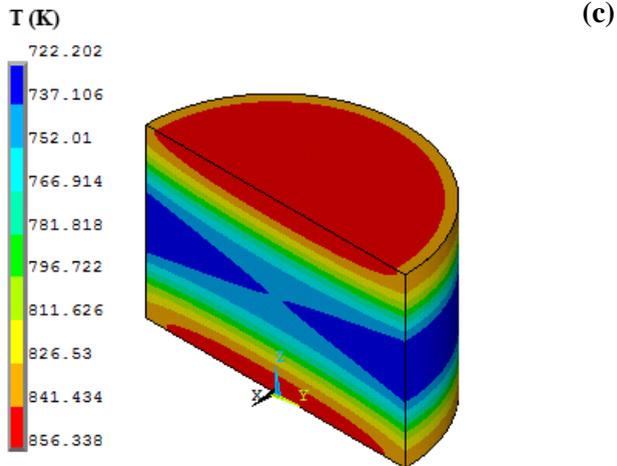
Pada penelitian ini, simulasi dilakukan pada  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder dengan jari – jari sebesar 3,5 cm dengan variasi ketinggian 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm. Variasi ini dipilih supaya dapat diketahui pengaruh ketinggian spesimen terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan selama proses pemanasan material uji menggunakan gelombang mikro. Temperatur awal dari material diatur pada temperatur kamar yaitu sebesar  $25^\circ \text{C}$ . Fluks energi yang diberikan akibat gelombang mikro dari *Microwave Batch Furnace* adalah sebesar  $13,875 \text{ W/cm}^2$ . Angka ini didapatkan dari hasil perbandingan antara microwave konvensional berdaya 1,2 kW dengan *Microwave Batch Furnace* yang berdaya 5,55 kW. Sifat dielektrik dan termal dari  $\text{FeTiO}_3$  ditunjukkan oleh Tabel 3.5, 3.6 dan 3.7. Konveksi terjadi pada permukaan luar material dengan udara yang ada di dalam *furnace* dengan koefisien *heat transfer* sebesar  $10 \text{ W/m}^2 \text{K}$ .



(a)



(b)



Gambar 4.11 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder Menggunakan *Microwave Batch Furnace* Selama 10 menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm



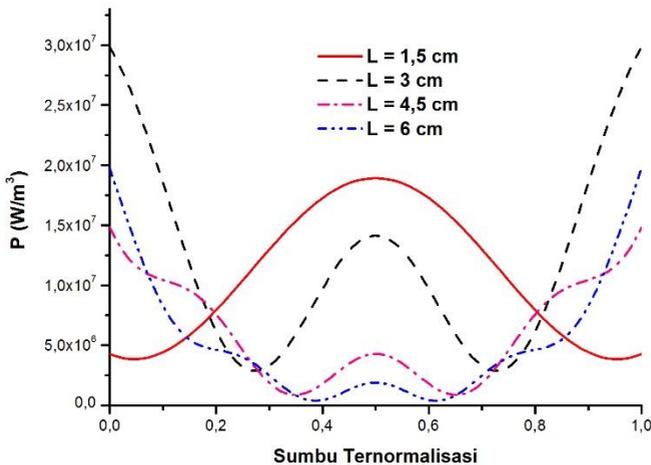
Gambar 4.11 menunjukkan distribusi temperatur dari  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder dengan pemanasan selama 240 detik menggunakan *Microwave Batch Furnace*. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa dari parameter yang digunakan yaitu pemanasan selama 1 jam dengan sampel berada di dalam wadah crucible, sampel silinder tanpa wadah dapat mencapai temperatur mendekati  $950^\circ\text{C}$  lebih cepat. Hal ini disebabkan tidak adanya heat loss yang terjadi dari material ke material lain. Yang ada hanyalah heat loss dari panas yang terjadi di dalam material terhadap udara sekitar akibat konveksi.

Distribusi temperatur yang didapat kemudian dijadikan sebagai alat untuk mengukur apakah proses pemanasan terjadi secara efektif atau tidak. Dari Gambar 4.11, dapat dilihat bahwa pada keempat sampel distribusi temperturnya kurang merata. Temperatur maksimum yang dihasilkan dari proses pemanasan selama 4 menit terjadi pada sampel silinder dengan ketinggian 3 cm. Sedangkan pada sampel dengan ketinggian 1,5 cm, temperatur maksimumnya terjadi pada bagian tengah sampel. Kedua sampel lainnya, yaitu sampel dengan ketinggian 4,5 cm dan 6 cm mengalami temperatur maksimum pada bagian ujung – ujungnya. Hal ini dapat terjadi demikian dikarenakan generasi panas yang dihasilkan oleh masing – masing sangatlah berbeda.

Gambar 4.12 menunjukkan generasi panas yang dihasilkan oleh keempat sampel. Generasi panas tertinggi terjadi pada sampel dengan ketinggian 3 cm sehingga menyebabkan sampel ini juga mencapai temperatur paling maksimum dibandingkan sampel yang lainnya. Sedangkan untuk sampel dengan ketinggian 1,5 cm, generasi panas maksimum terjadi pada bagian tengah sampel sehingga menyebabkan sampel akan mencapai temperatur maksimum pada bagian tengah. Untuk sampel dengan ketinggian 4,5 cm dan 6 cm, generasi panas yang terjadi akan maksimum pada bagian ujung – ujung sampel dan menyebabkan temperatur



maksimumnya juga terjadi pada bagian ujung. Jika kita melihat kembali pada Gambar 4.11, sampel dengan ketinggian 6 cm mencapai distribusi temperatur yang paling minimum dibandingkan sampel yang lain. Hal ini dapat terjadi karena generasi panas yang terjadi pada bagian tengah sampel juga paling minimum padahal di lain sisi generasi panas maksimumnya lebih tinggi dibandingkan generasi panas maksimum yang dihasilkan oleh sampel dengan ketinggian 4,5 cm. Ini menunjukkan bahwa laju konduksi yang terjadi pada sampel ini lebih cepat dibandingkan laju generasi panasnya. Sehingga menyebabkan temperatur yang dihasilkan menjadi minimum



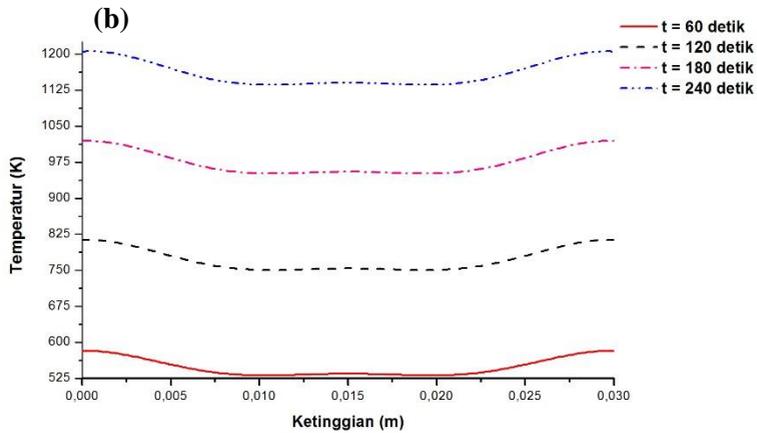
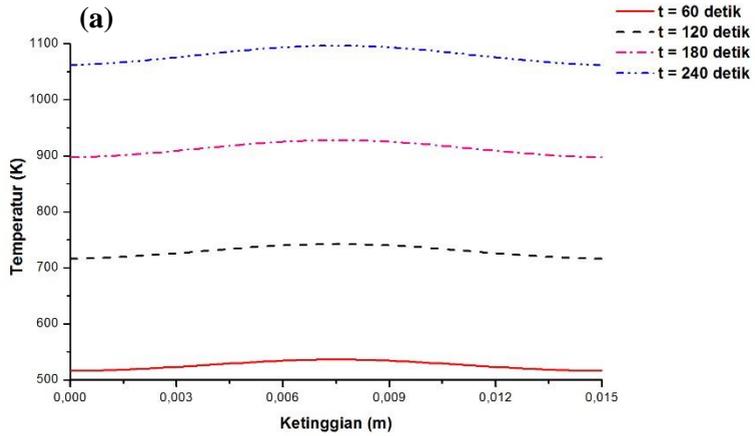
Gambar 4.12 Distribusi Generasi Panas yang Dihasilkan Sepanjang Sumbu Tengah Silinder  $\text{FeTiO}_3$  untuk Pemanasan Menggunakan *Microwave Batch Furnace*

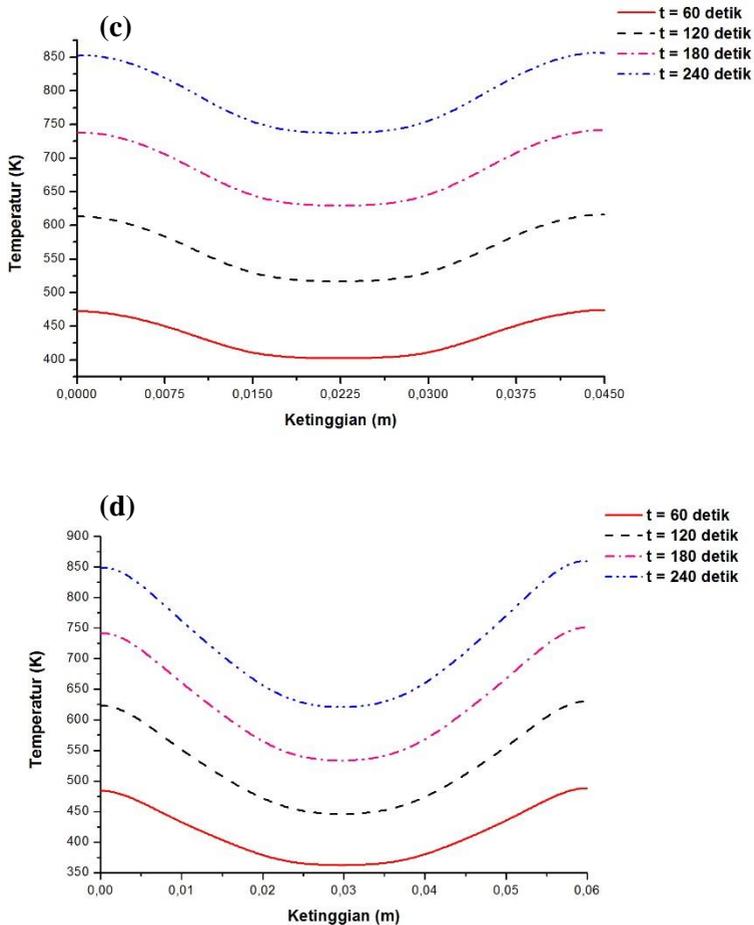


Dipol yang berada pada bagian ujung – ujung sampel akan mendapatkan energi yang lebih besar dibandingkan dipol yang berada pada kedalaman yang lebih besar. Hal ini menyebabkan dipol pada daerah ini akan berotasi lebih cepat dan menimbulkan friksi dan panas yang lebih besar pula sehingga temperatur maksimum akan dicapai pada bagian ujung – ujung benda seperti yang ditunjukkan oleh sampel dengan ketinggian 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm.

Kedalaman penetrasi adalah ukuran dimana suatu gelombang mikro dapat diserap habis oleh objek yang terpapar oleh gelombang mikro. Kedalaman penetrasi dari gelombang mikro untuk diserap  $\text{FeTiO}_3$  adalah sejauh 0,957 cm. Nilai ini didapatkan dari persamaan 2.6. Setengah ketinggian sampel 1,5 cm nilainya lebih kecil dibandingkan dengan besar kedalaman penetrasi yang terjadi sehingga hal ini menyebabkan dipol yang terjadi di bagian tengah sampel akan berotasi dengan cepat pada kedua arah secara bergantian. Rotasi yang cepat dan bolak – balik ini menyebabkan friksi yang terjadi antar dipol akan menjadi lebih besar dan temperatur yang terjadi juga akan menjadi maksimum.

Gambar 4.13 menunjukkan distribusi temperatur pada keempat sampel pada tiap langkah waktu 60 detik hingga mencapai 240 detik. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada keempat sampel terjadi kenaikan temperatur yang konstan. Hal ini menunjukkan bahwa laju generasi panas yang terjadi juga konstan tanpa ada penambahan dari laju konduksi. Pada silinder dengan panjang 1,5 cm dapat kita lihat bahwa pada bagian ujung – ujungnya temperaturnya minimum. Sedangkan pada bagian tengah, temperaturnya menjadi maksimum. Semakin bertambahnya panjang, maka tren ini akan menjadi berbalik yaitu temperatur maksimum akan terjadi pada bagian ujung – ujung silinder namun pada bagian tengahnya temperaturnya minimum.



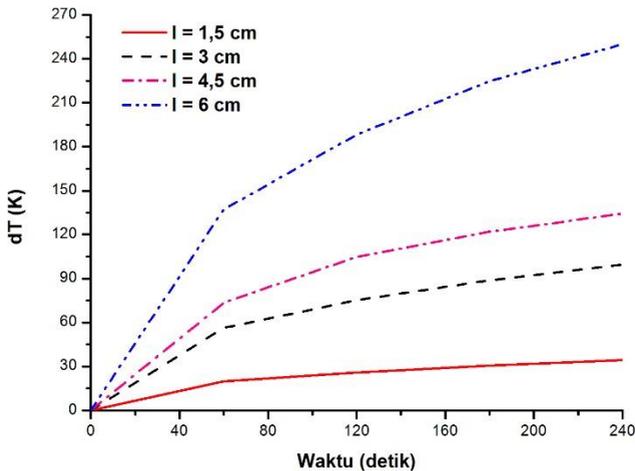


Gambar 4.13 Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah FeTiO<sub>3</sub> Silinder Seiring Bertambahnya Waktu (a) L = 1,5 cm, (b) L = 3 cm, (c) L = 4,5 cm dan (d) L = 6 cm



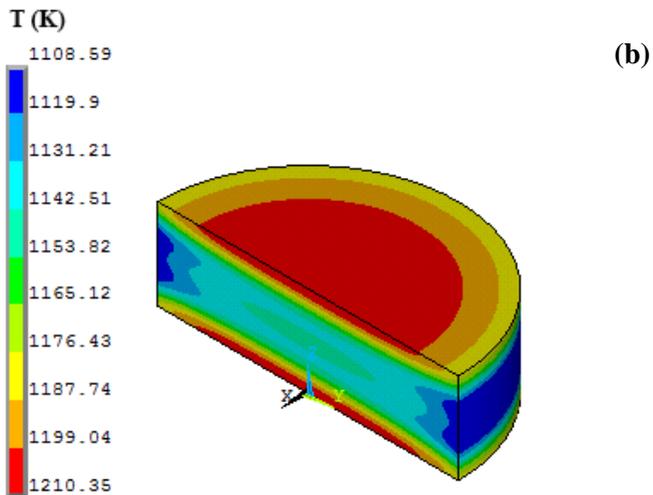
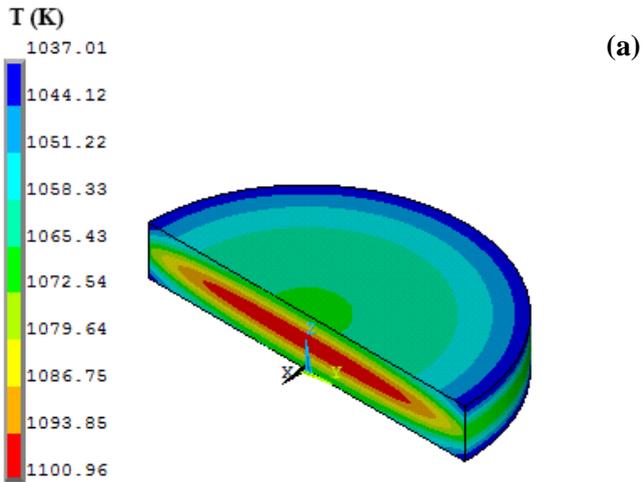
Selain distribusi temperatur, perbedaan yang terjadi antara temperatur maksimum dan minimum juga dapat dijadikan sebagai indikator apakah proses pemanasan menggunakan gelombang mikro efektif atau tidak. Hal itu dapat ditunjukkan oleh Gambar 4.14. Keempat spesimen mengalami pertambahan perbedaan temperatur seiring bertambahnya waktu. Pertambahan perbedaan temperatur yang signifikan ditunjukkan oleh sampel dengan panjang 6 cm. Hal ini disebabkan karena terdapat perbedaan yang besar juga antara generasi panas maksimum dan generasi panas minimum dari bagian ujung dan bagian tengah sampel tersebut.

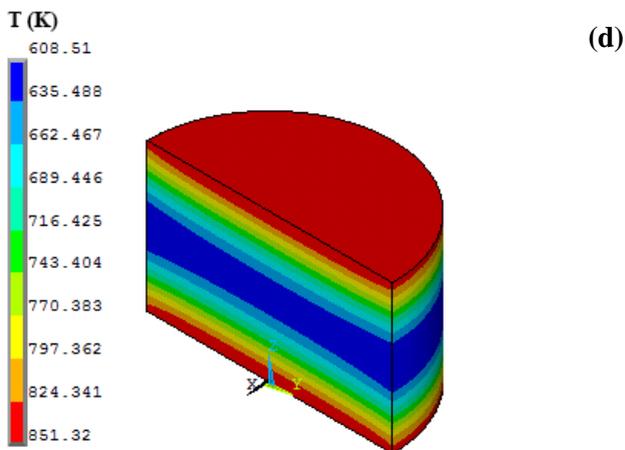
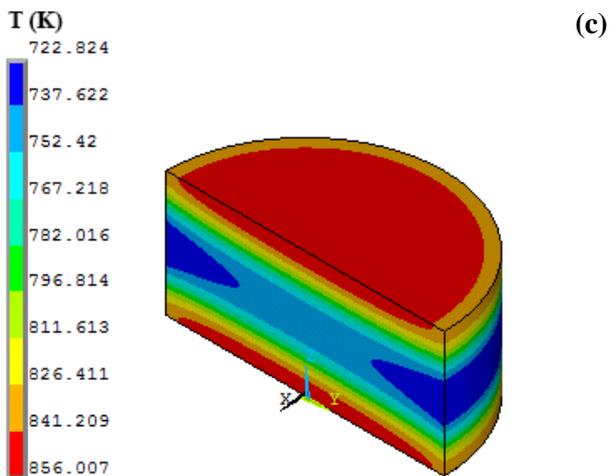
Pada waktu 240 detik, perbedaan temperatur pada silinder  $\text{FeTiO}_3$  dengan panjang 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm adalah sebesar 34,27 K, 99,49 K, 134,138 K dan 249,932 K. Semakin tinggi perbedaan temperatur yang terjadi maka hal ini menandakan bahwa penyebaran temperatur yang terjadi tidak merata. Sehingga dapat dikatakan bahwa sampel dengan panjang 6 cm kurang efektif ketika dipanaskan menggunakan gelombang mikro dikarenakan perbedaan temperatur yang sangat besar sehingga menyebabkan distribusi temperaturnya benar – benar tidak merata.



Gambar 4.14 Variasi Perbedaan Temperatur untuk  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Ketebalan yang Berbeda

Selanjutnya, untuk mengetahui pengaruh diameter sampel terhadap distribusi temperatur yang terjadi setelah pemanasan menggunakan gelombang mikro maka dilakukan simulasi pada material  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder dengan jari – jari sebesar 5 cm. Kondisi pembebanan dan kondisi batas (*boundary condition*) disamakan seperti pada  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder dengan jari – jari 3,5 cm.





Gambar 4.15 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Diameter 10 cm Selama Pemanasan 10 menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm



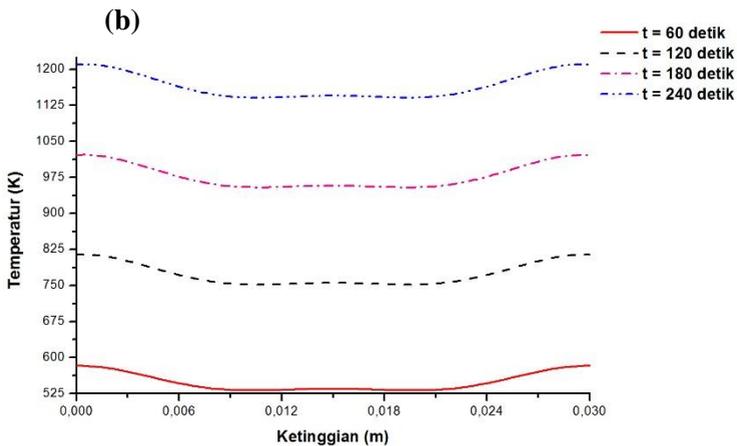
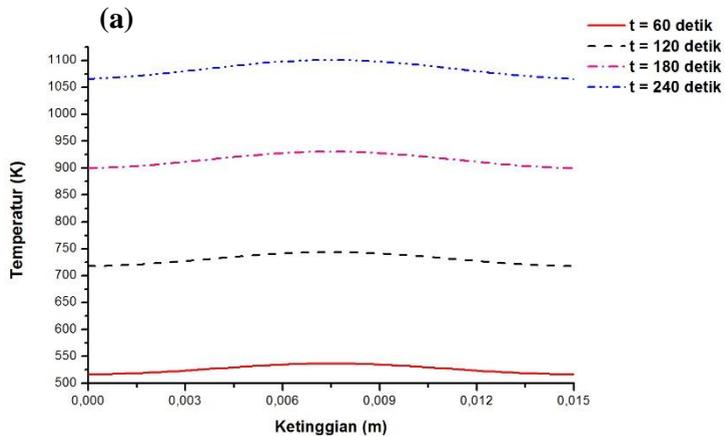
Gambar 4.15 menunjukkan kontur distribusi temperatur pada silinder  $\text{FeTiO}_3$  dengan diameter 10 cm. Hasil mengindikasikan bahwa temperatur akhir dari keempat sampel memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan temperatur akhir pada silinder dengan diameter 7 cm. Walaupun besar temperaturnya sedikit lebih tinggi, tapi dari Gambar tersebut dapat kita lihat bahwa tren dari distribusi temperaturnya hampir sama dengan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.11. Keempat sampel juga menunjukkan distribusi temperatur yang tidak merata dan pada sampel dengan ketinggian 3 cm menunjukkan tercapainya temperatur maksimum di antara sampel lainnya dengan nilai mendekati  $950^\circ\text{C}$ .

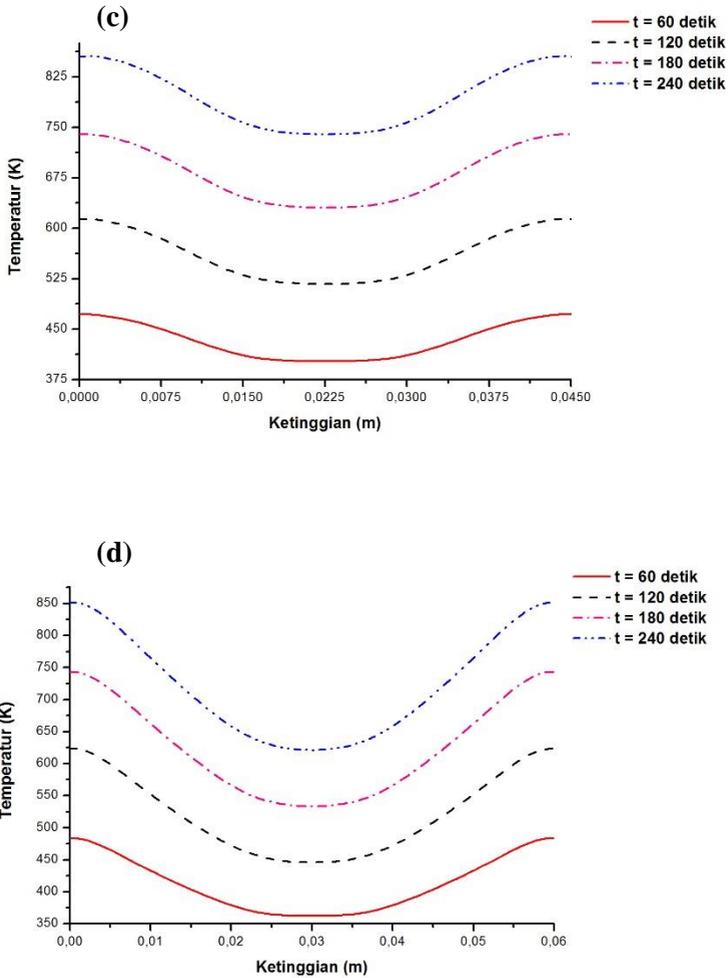
Panas yang dihasilkan selama proses pemanasan gelombang mikro terjadi secara volumetrik akibat gaya gesek antar dipol yang berotasi karena berinteraksi dengan medan elektromagnetik sehingga menimbulkan generasi panas dari dalam objek. Oleh karena itu, semakin besar volume objek yang dipanaskan, maka akan menyebabkan semakin banyak dipol yang berotasi dan saling bergesekan sehingga panas yang terakumulasi juga semakin besar dan menyebabkan temperatur akhir yang dihasilkan akan juga semakin tinggi. Generasi panas yang dihasilkan tidak jauh berbeda dengan sampel dengan diameter 7 cm karena generasi panas tidak dipengaruhi oleh diameter sampel. Temperatur yang tinggi ini adalah akibat dari semakin banyaknya generasi panas yang terkumpul akibat volume yang semakin besar.

Kemudian dari Gambar 4.16 dapat kita lihat pengaruh penambahan diameter terhadap kenaikan temperatur yang terjadi seiring waktu bertambah. Dari keempat sampel menunjukkan bahwa kenaikan yang terjadi konstan sama seperti dengan sampel dengan diameter 7 cm. Hal yang membedakan hanyalah temperatur akhir yang dicapai. Tren yang dihasilkan juga sama seperti pada sampel dengan diameter 7 cm. Untuk sampel dengan ketinggian



1,5 cm bagian tengahnya mencapai temperatur maksimum sedangkan pada bagian ujung – ujungnya minimu. Dan tren ini juga akan berbalik seiring bertambahnya panjang dari silinder.

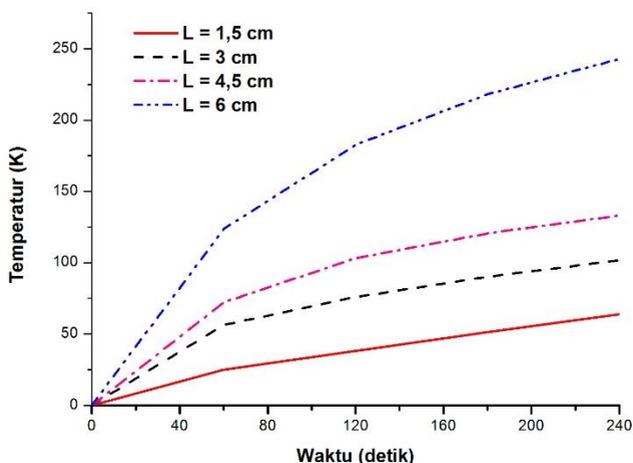




Gambar 4.16 Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah  $\text{FeTiO}_3$  Silinder dengan Diameter 10 cm Seiring Bertambahnya Waktu (a)  $L = 1,5$  cm, (b)  $L = 3$  cm, (c)  $L = 4,5$  cm dan (d)  $L = 6$  cm



Selain dari distribusi temperatur yang terjadi, keefektifan penambahan diameter dari sampel uji selama dipanaskan menggunakan gelombang mikro juga dapat diukur dari perbedaan temperatur maksimum dan temperatur minimumnya. Semakin kecil perbedaan yang terjadi maka akan semakin efektif sampel tersebut untuk dipanaskan. Pengaruh bertambahnya diameter terhadap perbedaan temperatur yang dihasilkan dapat dilihat dari grafik pada Gambar 4.17



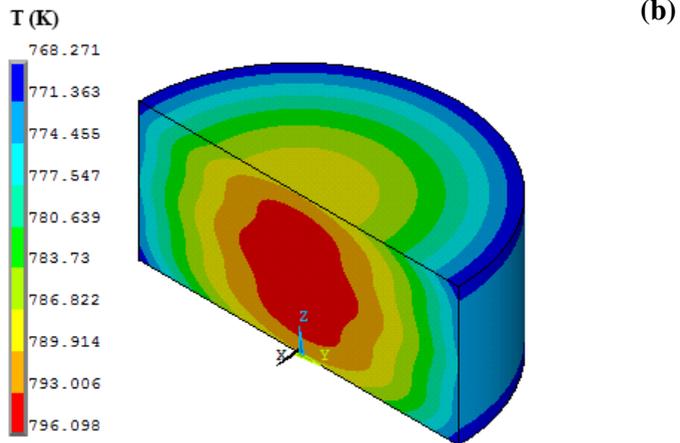
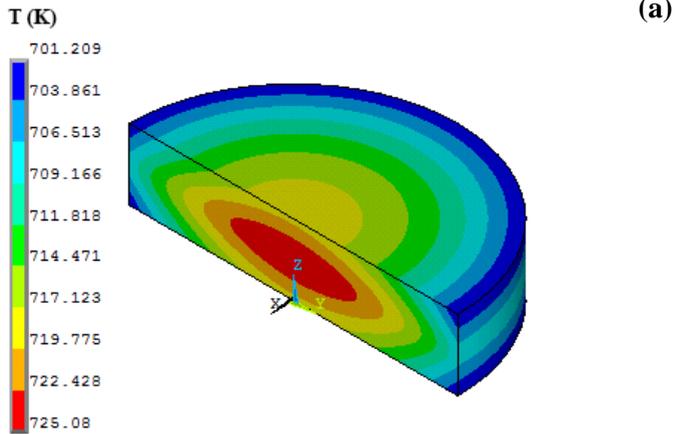
Gambar 4.17 Variasi Perbedaan Temperatur untuk Silinder  $\text{FeTiO}_3$  Berdiameter 10 cm dengan Ketebalan yang Berbeda

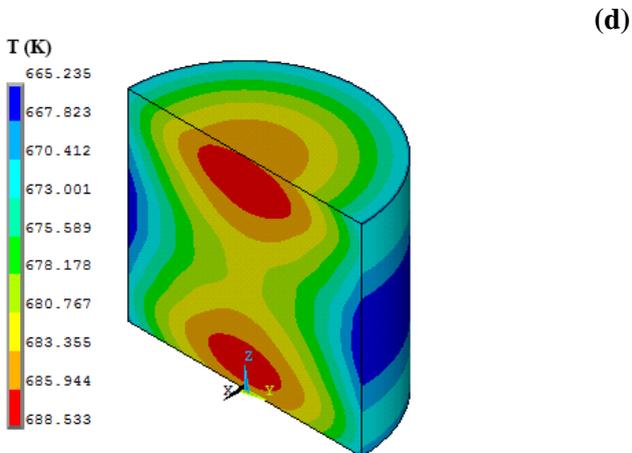
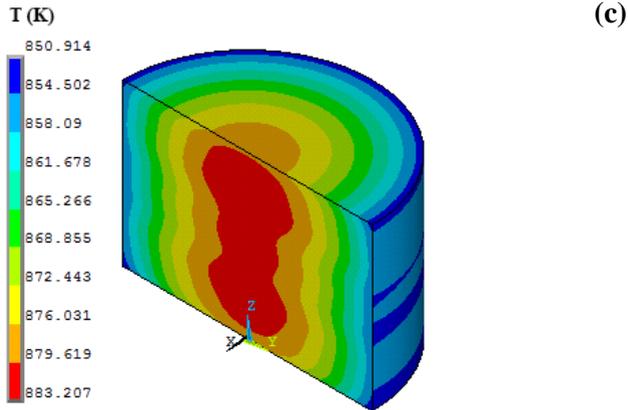
Dari Gambar 4.17, dapat kita lihat bahwa pada sampel dengan diameter 10 cm juga mengalami kenaikan perbedaan temperatur bersamaan dengan bertambahnya waktu pemanasan. Kenaikan perbedaan temperatur yang signifikan juga terjadi pada sampel dengan ketinggian 6 cm. Pada waktu mencapai 240 detik,



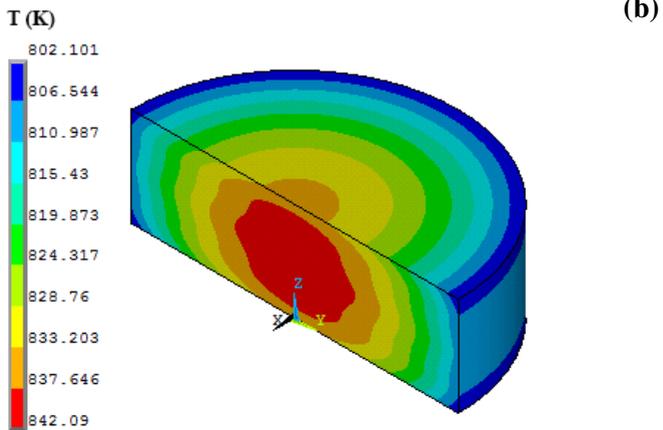
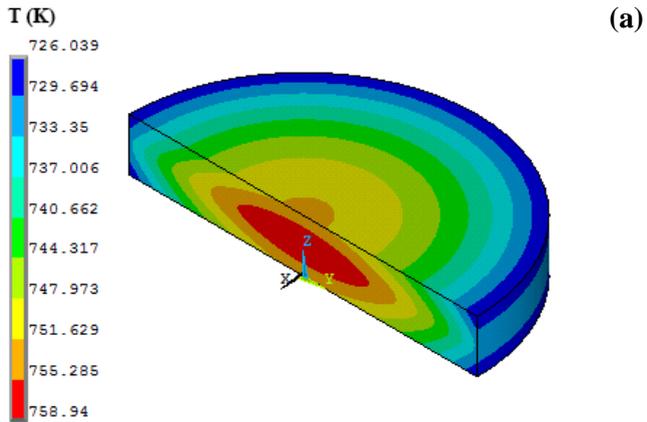
perbedaan temperatur yang terjadi pada masing – masing sampel dengan panjang 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm adalah 63,95 K, 101,76 K, 133,183 K dan 242,81 K. Perbedaan temperatur yang terjadi pada sampel ini lebih besar dibandingkan dengan sampel yang memiliki diameter 7 cm. Hal ini dapat terjadi karena semakin besar volume suatu benda, maka semakin lambat juga laju konduksi yang terjadi akibat perambatan generasi panas dari daerah yang temperaturnya maksimum menuju daerah yang temperaturnya minimum. Sehingga dapat disimpulkan walaupun temperatur akhir yang dihasilkan lebih maksimum, namun sampel dengan diameter yang lebih besar kurang efektif untuk dipanaskan menggunakan gelombang mikro karena dalam sampel tersebut akan dihasilkan perbedaan temperatur yang lebih besar dan distribusi temperatur yang terjadi semakin tidak uniform.

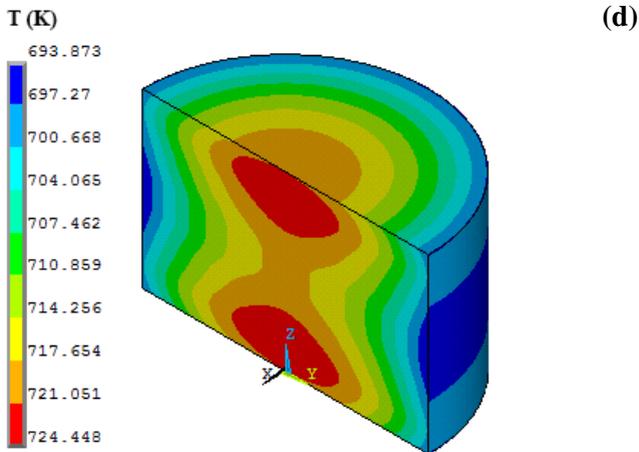
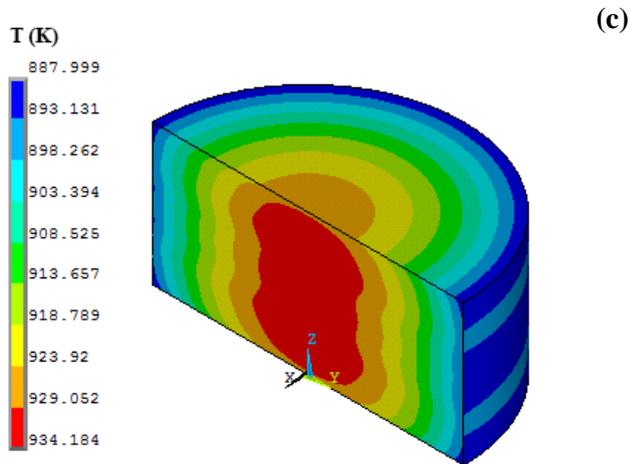
Selanjutnya untuk mengetahui apakah pemanasan menggunakan microwave konvensional berpotensi untuk memanaskan  $\text{FeTiO}_3$  hingga terdekomposisi menjadi logam besi (Fe) dan titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) maka simulasi dilakukan pada sampel  $\text{FeTiO}_3$  berdiameter 7 cm dan 10 cm selama 1 jam waktu pemanasan dengan kondisi batas (*Boundary Condition*) berupa temperatur awal sebesar 298 K dan konveksi pada seluruh permukaan sampel uji dengan koefisien heat transfer udara sebesar  $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pada temperatur 298 K dan kondisi pembebanan berupa fluks energi akibat paparan gelombang mikro sebesar  $3 \text{ W/cm}^2$ . Nilai ini didapatkan dari fluks yang dihasilkan oleh microwave berdaya 1,2 kW.





Gambar 4.18 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Diameter 7 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave* Konvensional Selama 1 jam (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm





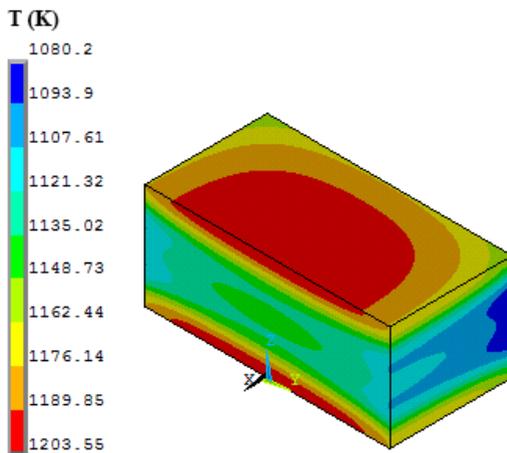
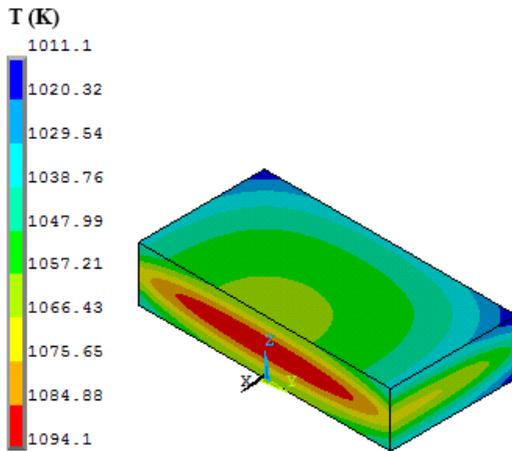
Gambar 4.19 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Silinder dengan Diameter 10 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave* Konvensional Selama 1 jam (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm

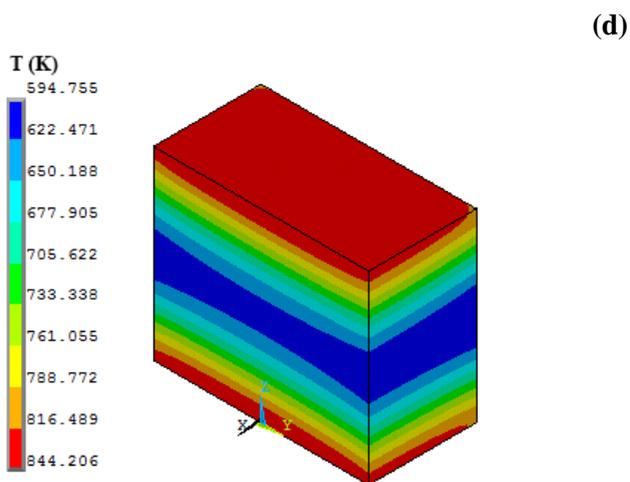
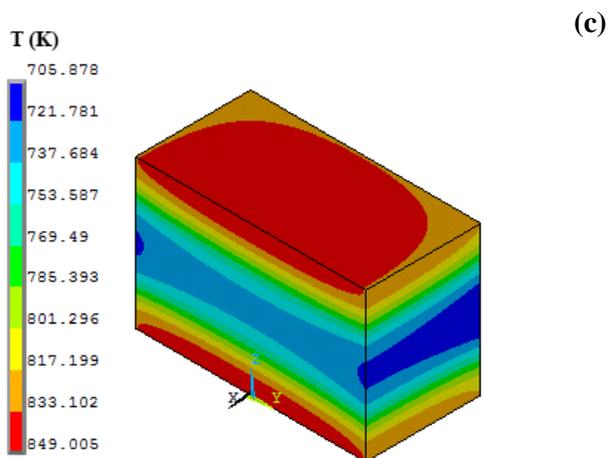


Dari Gambar 4.18 dan 4.19, kita dapat melihat bahwa pemanasan menggunakan microwave konvensional sangatlah kurang efektif. Hal ini dikarenakan dengan pemanasan selama 1 jam, temperatur yang dihasilkan belum mendekati  $950^{\circ}\text{C}$  pada semua sampel walaupun perbedaan antara temperatur maksimum dan temperatur minimumnya kecil. Sehingga untuk mendekomposisi sampel  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder tidak disarankan untuk menggunakan *microwave* konvensional.

### 4.3.2 Analisis Distribusi Temperatur pada $\text{FeTiO}_3$ berbentuk Balok

Untuk mengetahui pengaruh bentuk geometri dari sampel uji terhadap hasil akhir setelah dipanaskan menggunakan gelombang mikro dilakukan simulasi pada  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk lain yaitu balok dengan sisi – sisinya yang sama panjang yaitu 7 cm dan digunakan variasi berupa ketinggian sebesar 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm. Tujuan dari bervariasi ketinggian adalah untuk mengetahui pengaruh ketinggian terhadap sampel berbentuk balok. Kondisi batas (*Boundary Condition*) diatur sama seperti simulasi sebelumnya yaitu berupa temperatur awal dari material sebesar 298 K dan terjadi konveksi pada bagian permukaan material dengan udara yang memiliki koefisien heat transfer sebesar  $10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pada temperatur 298 K. Fluks energi akibat gelombang mikro diaplikasikan sebesar  $13,875\text{ W/cm}^2$  seperti pada simulasi sebelumnya yaitu menggunakan *Microwave Batch Furnace*. Gambar 4.20 menunjukkan kontur distribusi temperatur akibat pemanasan selama 4 menit pada balok material  $\text{FeTiO}_3$  bersisi 7 cm.





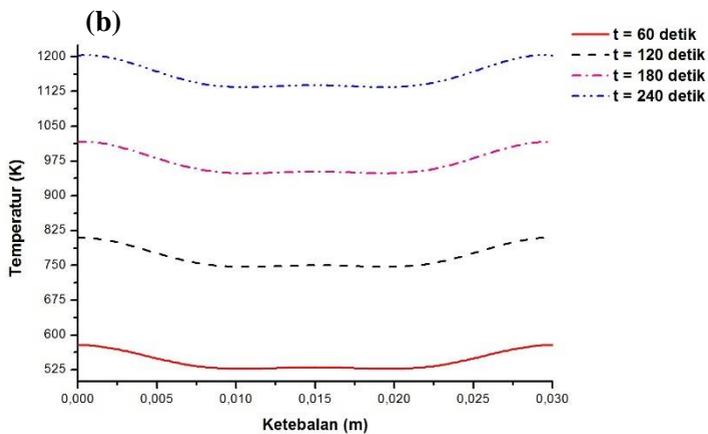
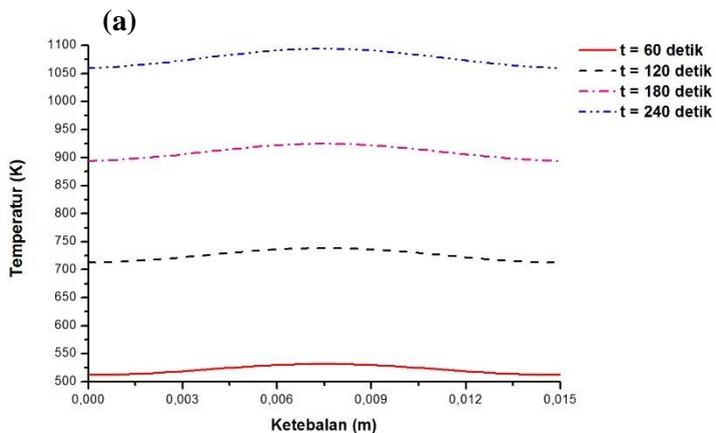
Gambar 4.20 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Balok dengan Sisi 7 cm Pada Pemanasan Menggunakan *Microwave Batch Furnace* selama 4 menit (a)  $b = 1,5$  cm (b)  $b = 3$  cm (c)  $b = 4,5$  cm (d)  $b = 6$  cm

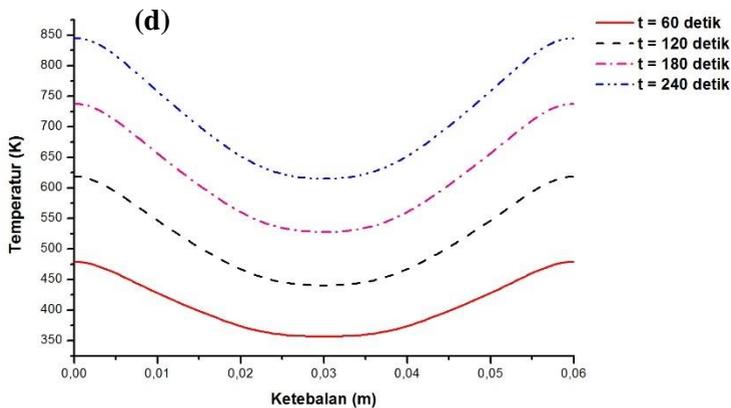
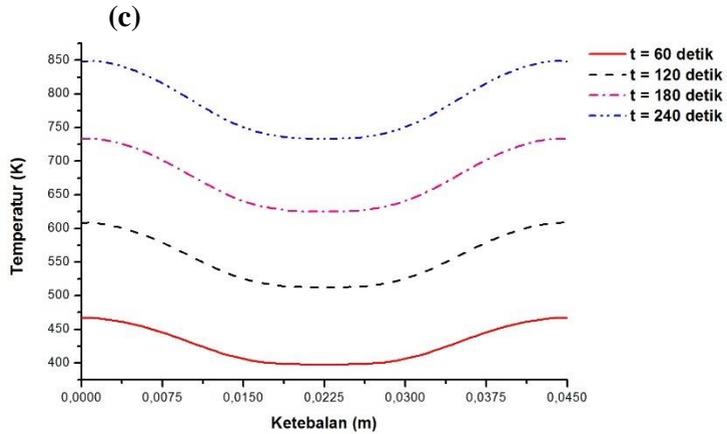


Dari Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa dengan sampel berbentuk balok dibutuhkan waktu kurang dari satu jam untuk mencapai temperatur mendekati  $950^{\circ}\text{C}$ . Dibandingkan dengan sampel silinder berbentuk silinder dengan diameter 7 cm, sampel berbentuk balok menghasilkan temperatur maksimum yang sedikit lebih rendah. Hal ini dikarenakan dengan ketinggian yang sama, luas area balok lebih kecil dibandingkan dengan luas are silinder. Sehingga panas yang dikonduksikan akibat generasi panas akan menjadi lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang berbentuk silinder.

Distribusi temperatur pada sampel balok tidak jauh berbeda dibandingkan dengan sampel berbentuk silinder. Tren menunjukkan bahwa pada sampel dengan ketinggian 1,5 cm akan mencapai temperatur maksimumnya pada bagian tengah objek dan hal ini akan berbalik bersamaan dengan bertambahnya ketinggian dari objek. Karena terbuat dari material yang sama dengan variasi ketinggian yang sama, maka generasi panas yang dihasilkan dari sampel balok maupun silinder juga sama besarnya. Sehingga untuk menjelaskan terjadinya tren distribusi temperatur yang terjadi juga dapat menggunakan generasi panas yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12.

Kemudian untuk melihat pengaruh bentuk balok terhadap kenaikan temperatur yang terjadi selama pemanasan, maka diplot hasil temperatur tiap kenaikan 60 detik hingga 240 detik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.21. Dari Gambar tersebut, kita dapat melihat bahwa terjadi kenaikan yang konstan seiring berjalannya waktu pemanasan. Namun temperatur akhir yang dihasilkan dari sampel berbentuk balok didapatkan lebih tinggi dibandingkan dengan sampel berbentuk silinder.

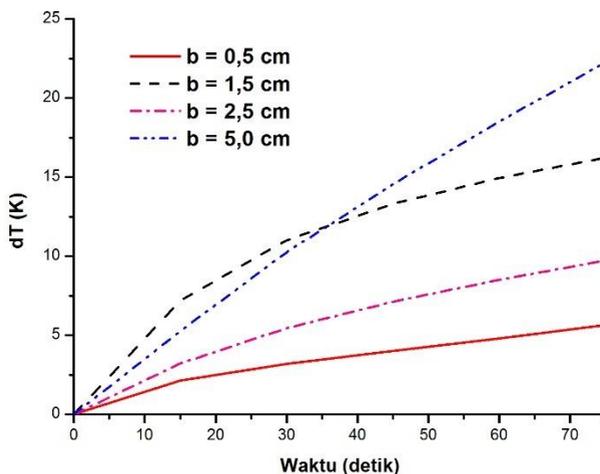




Gambar 4.21 Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan Diameter 7 cm Seiring Bertambahnya Waktu (a)  $b = 1,5$  cm, (b)  $b = 3$  cm, (c)  $b = 4,5$  cm dan (d)  $b = 6$  cm



Kemudian selain dari distribusi temperatur yang dihasilkan, perbedaan yang terjadi antara temperatur maksimum dan minimum juga perlu dianalisa untuk melihat keefektifan proses pemanasan dari  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder. Gambar 4.22 menunjukkan hasil plot dari perbedaan temperatur bersamaan dengan bertambahnya waktu hingga 4 menit. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa sampel dengan ketebalan 6 cm juga mengalami kenaikan yang signifikan sedangkan untuk sampel yang lain besar perbedaan temperatur yang terjadi jauh di bawah sampel dengan ketinggian 6 cm.



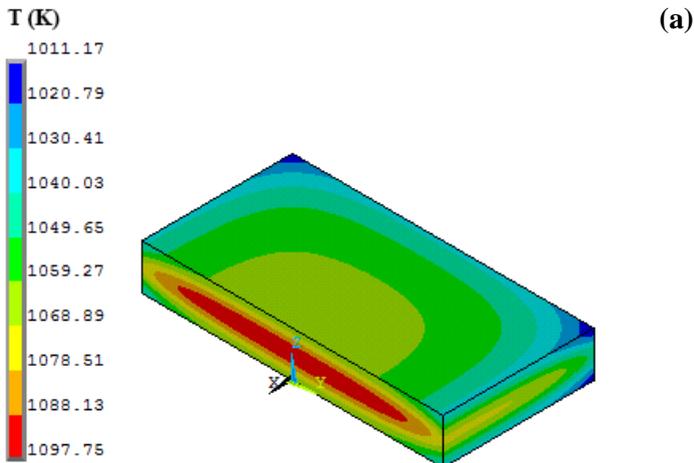
Gambar 4.22 Variasi Perbedaan Temperatur untuk Balok  $\text{FeTiO}_3$  Bersisi 7 cm dengan Ketebalan yang Berbeda

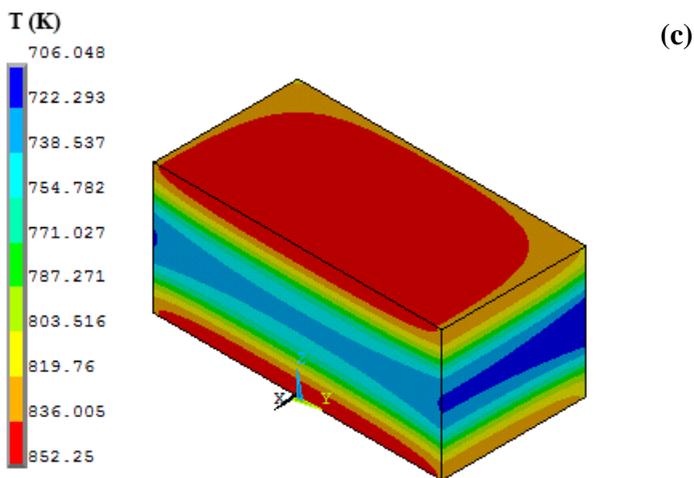
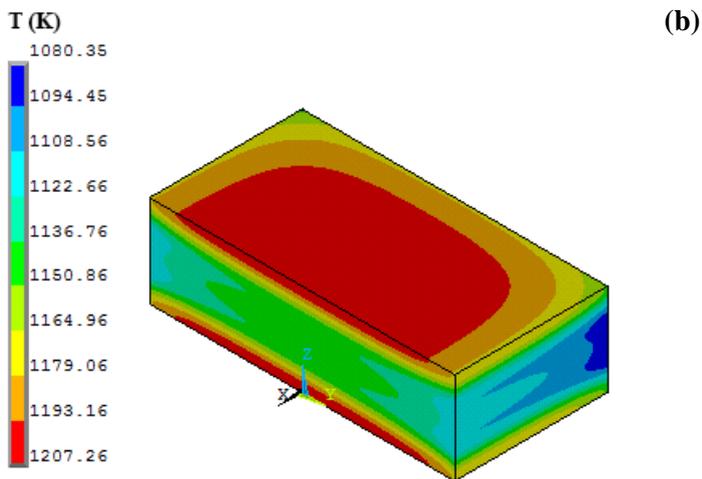
Pada akhir pemanasan didapatkan bahwa perbedaan temperatur yang terjadi pada masing – masing sampel dengan

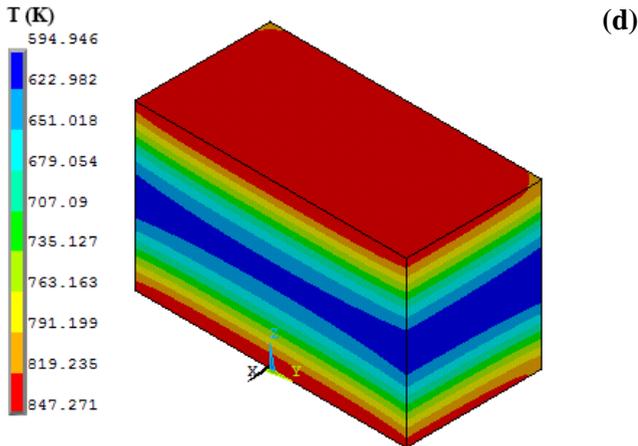


ketinggian 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm adalah 83 K, 123,35 K, 143,127 K dan 249,451 K. Perbedaan temperatur yang terjadi pada sampel balok ini jauh lebih besar dibandingkan dengan sampel berbentuk silinder dengan diameter 7 cm dan 10 cm. Hal ini menandakan bahwa sampel berbentuk balok kurang efektif untuk dijadikan sebagai bentuk  $\text{FeTiO}_3$  ketika dipanaskan menggunakan gelombang mikro karena laju konduksinya yang rendah akibat volume yang lebih besar.

Selanjutnya untuk mengetahui pengaruh besar sisi dari balok terhadap keefektifan material  $\text{FeTiO}_3$  ketika dipanaskan menggunakan gelombang mikro maka dilakukan simulasi pada sampel balok dengan sisi yang lebih besar yakni 10 cm. Kondisi pembebanan dan kondisi batas (*Boundary Condition*) yang diaplikasikan sama seperti sampel dengan bersisi 7 cm.







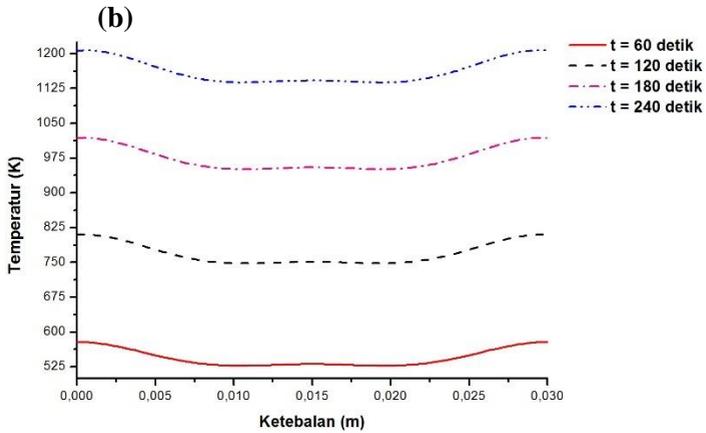
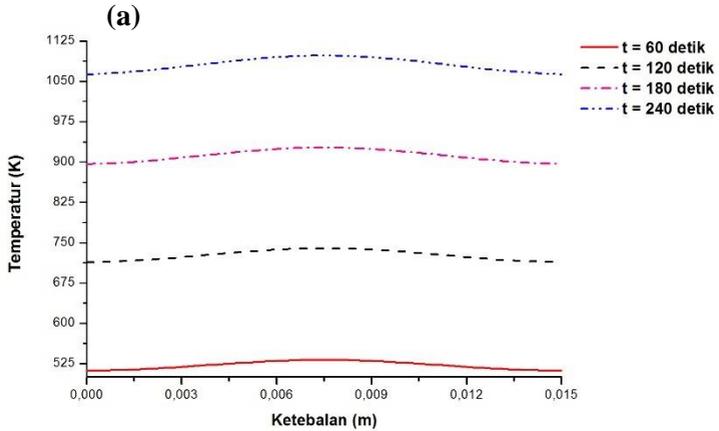
Gambar 4.23 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Balok dengan Sisi 10 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave Batch Furnace* Selama 4 Menit (a)  $b = 1,5$  cm (b)  $b = 3$  cm (c)  $b = 4,5$  cm (d)  $b = 6$  cm

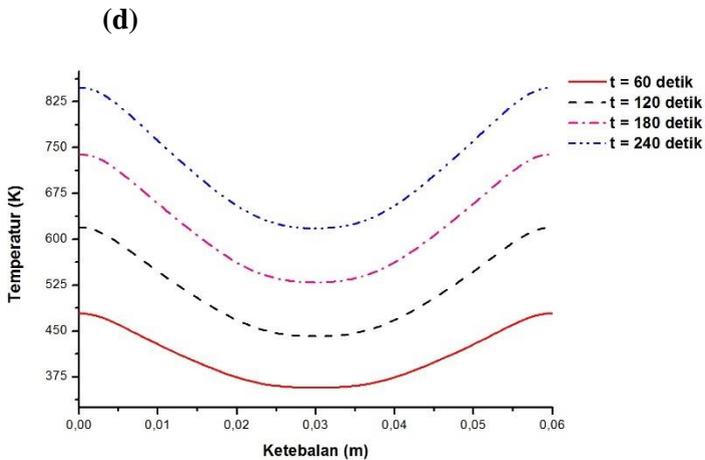
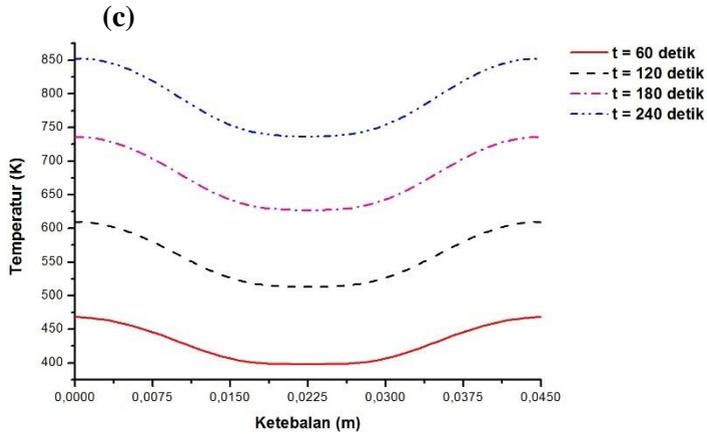
Dari Gambar 4.23 menunjukkan bahwa kontur distribusi temperatur yang terjadi juga kurang seragam pada balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan sisi 10 cm. Namun, temperatur akhir yang dicapai pada sampel ini memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan sampel sebelumnya dengan sisi 7 cm. Hal ini menandakan bahwa akumulasi panas yang dikonduksikan pada sampel ini lebih besar dibandingkan sampel dengan sisi yang lebih kecil akibat dari luas permukaan yang lebih besar.

Untuk mengetahui pengaruh penambahan panjang sisi terhadap pertambahan kenaikan temperatur selama pemanasan maka hasil simulasi diplot dalam grafik dengan kenaikan

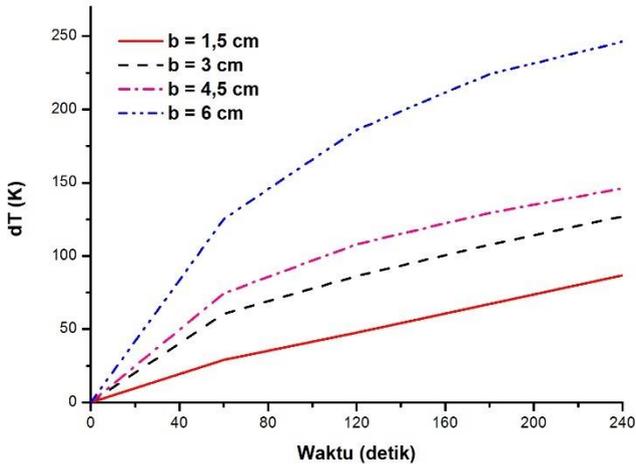


temperatur tiap 60 detik hingga mencapai 240 detik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.24. Dari Gambar tersebut, kita dapat melihat bahwa pada sampel dengan sisi yang lebih besar, kenaikan temperatur yang terjadi cenderung konstan. Tren yang dihasilkan juga tidak jauh berbeda dengan sampel yang lainnya. Pada sampel dengan ketebalan rendah, temperatur maksimumnya dicapai pada bagian tengah sampel sedangkan temperatur minimumnya berada pada bagian ujung dan dengan bertambahnya ketinggian maka tren ini menjadi berbalik yakni temperatur maksimum akan dicapai pada bagian ujung sedangkan bagian tengahnya minimum. Hal ini dapat dijelaskan dari generasi panas yang dihasilkan. Untuk sampel dengan ketebalan rendah, bagian tengah sampel menghasilkan generasi panas yang paling tinggi dibandingkan dengan bagian lainnya dan nilainya mencapai minimum pada bagian ujung – ujungnya. Sedangkan untuk sampel dengan ketebalan tinggi, generasi panas maksimum yang dihasilkan terjadi pada bagian ujung – ujung sampel dan menjadi minimum pada bagian tengah. Sebagai konsekuensinya, pola distribusi temperatur yang terjadi akan tetap dengan syarat material yang dipanaskan dan variasi ketinggiannya tidak diubah.





Gambar 4.24 Distribusi Temperatur pada Bagian Tengah Balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan Sisi 10 cm Seiring Bertambahnya Waktu (a)  $b = 1,5$  cm, (b)  $b = 3$  cm, (c)  $b = 4,5$  cm dan (d)  $b = 6$  cm



Gambar 4.25 Variasi Perbedaan Temperatur untuk Balok  $\text{FeTiO}_3$  Bersisi 10 cm dengan Ketebalan yang Berbeda

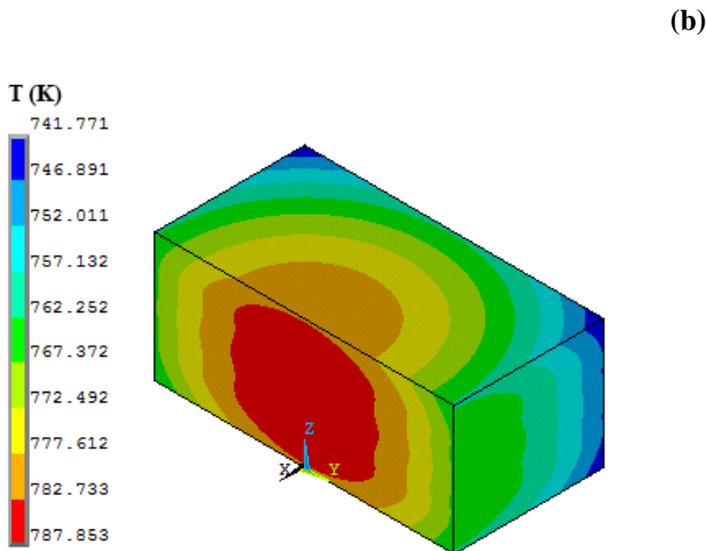
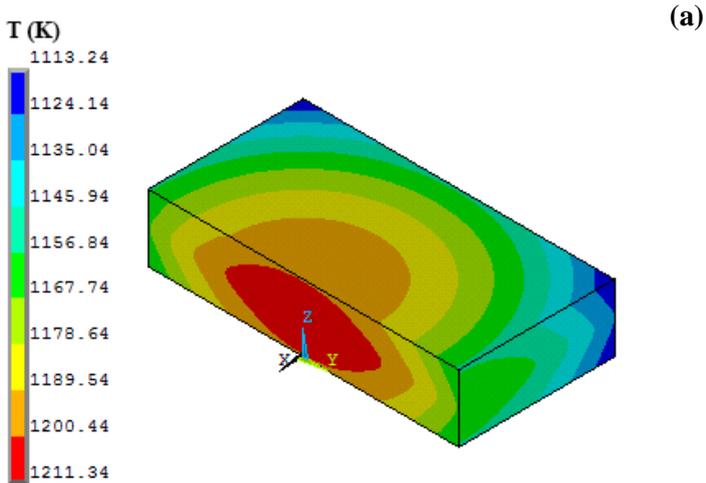
Untuk mengetahui seberapa efektif penambahan panjang sisi pada balok terhadap proses pemanasan dari material  $\text{FeTiO}_3$  maka perbedaan antara temperatur maksimum dan minimum pada setiap kenaikan waktu juga harus dianalisa seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.25. Dari Gambar tersebut ditunjukkan bahwa sampel dengan ketebalan 6 cm masih menduduki sebagai sampel yang mengalaih kenaikan perbedaan temperatur yang paling signifikan. Namun dapat kita lihat bahwa seiring bertambahnya waktu, perbedaan temperatur yang terjadi pada sampel dengan ketebalan 3 cm akan terus mengalami kenaikan dan melebihi perbedaan temperatur yang terjadi pada sampel 4,5 cm. Hal ini dapat terjadi karena pada sampel 3 cm, generasi panas yang terjadi paling tinggi ditambah dengan volume yang lebih besar maka

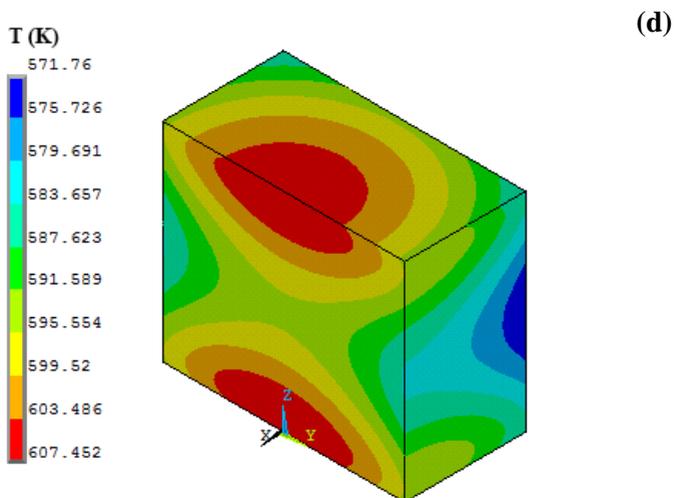
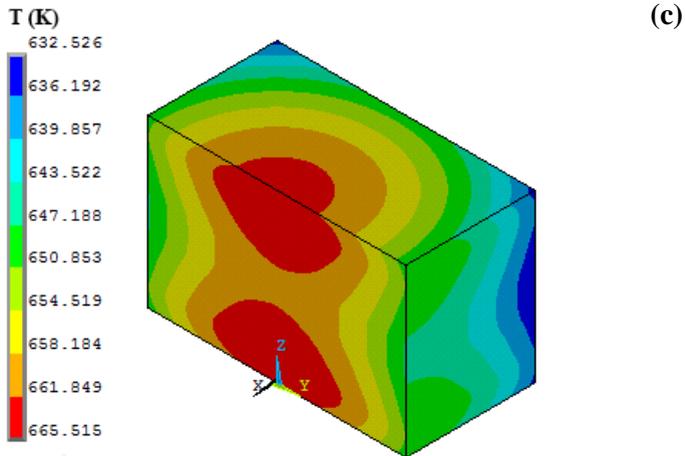


panas yang terakumulasi akan juga semakin cepat namun belum sempat untuk dikonduksikan pada daerah lain yang lebih rendah temperaturnya sehingga akan tercipta perbedaan temperatur yang signifikan

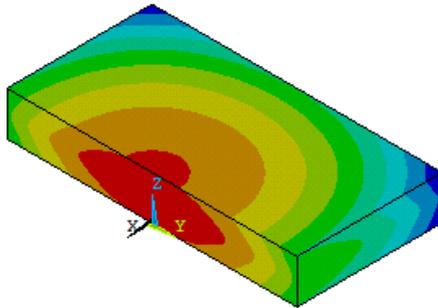
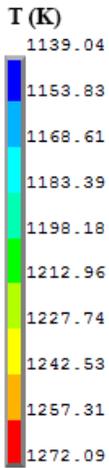
Dari data yang ditunjukkan pada Gambar 4.25 pada akhir proses pemanasan besar nilai perbedaan temperatur yang terjadi pada masing – masing sampel sevara berurutan adalah 86,58 K untuk sampel dengan ketebalan 1,5 cm, 126,91 K untuk sampel dengan ketebalan 3 cm, 146,202 K untuk sampel dengan ketebalan 4,5 cm dan 246,325 K untuk sampel dengan ketebalan 6 cm. Jika dibandingkan dengan sampel lainnya, nilai perbedaan temperatur yang terjadi pada sampel balok dengan sisi 10 cm lebih besar dan menandakan bahwa sampel ini kurang efektif untuk diaplikasikan. Dari Gambar 4.25, kita juga dapat mengambil kesimpulan bahwa sampel dengan ketebalan 6 cm kurang efektif untuk diaplikasikan sebagai geometri material  $\text{FeTiO}_3$  ketika dipanaskan menggunakan gelombang mikro karena perbedaan temperatur yang terjadi akan semakin besar.

Pengaruh daya pemanasan selanjutnya juga dianalisa pada simulasi material  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk balok bersisi 7 cm dan 10 cm dengan menggunakan pemanasan pada microwave conventional. Hal ini bertujuan untuk melihat apakah dengan daya yang lebih rendah,  $\text{FeTiO}_3$  bisa terdekomposisi menjadi logam besi (Fe) dan titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ). Simulasi dilakukan untuk pemanasan selama satu jam dengan kondisi pembebanan menggunakan fluks energi sebesar  $3\text{W}/\text{cm}^2$  dan kondisi batas (boundary condition) berupa temperatur awal sebesar 298 K dan konveksi pada bagian permukaan sampel dengan udara ( $h = 10\text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ ) pada temperatur 298 K.

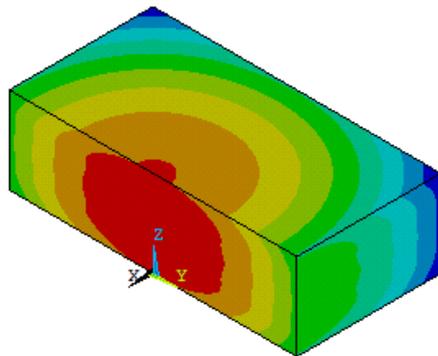
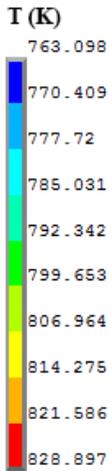




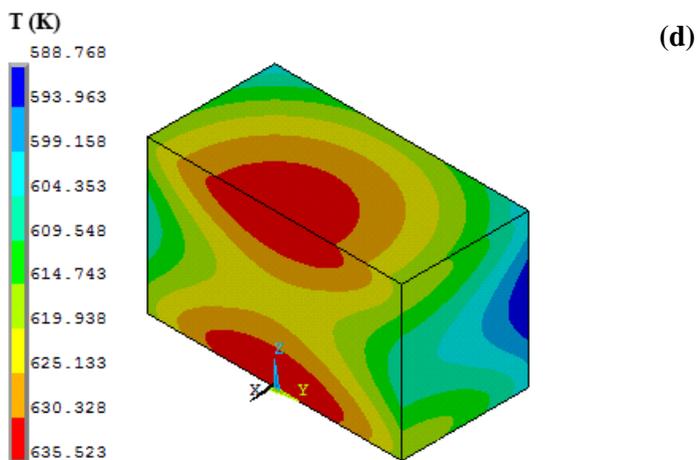
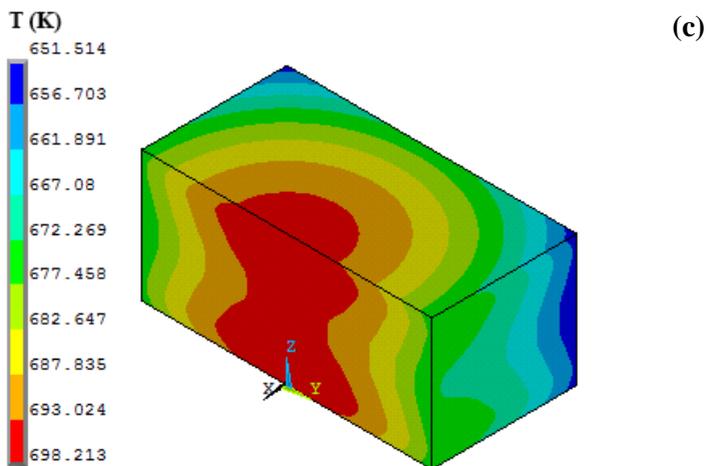
Gambar 4.26 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Balok dengan Sisi 7 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave* Konvensional Selama 50 Menit (a)  $b = 1,5$  cm (b)  $b = 3$  cm (c)  $b = 4,5$  cm (d)  $b = 6$  cm



(a)



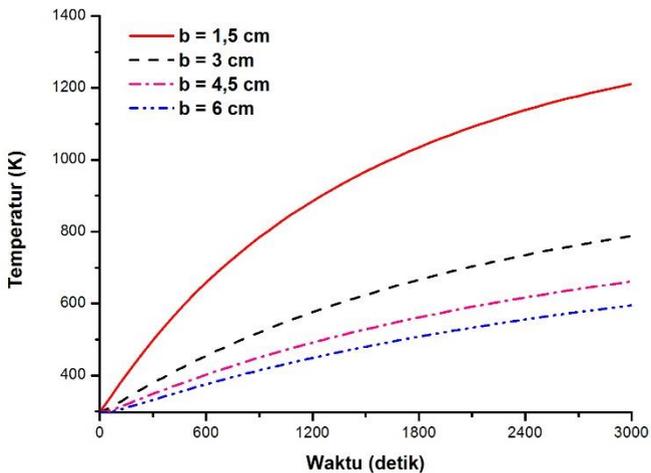
(b)



Gambar 4.27 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Melintang  $\text{FeTiO}_3$  Berbentuk Balok dengan Sisi 10 cm pada Pemanasan Menggunakan *Microwave* Konvensional Selama 50 Menit (a)  $b = 1,5$  cm (b)  $b = 3$  cm (c)  $b = 4,5$  cm (d)  $b = 6$  cm



Dari Gambar 4.26 dan 4.27, kita dapat melihat bahwa pada sampel dengan ketinggian 1,5 cm temperatur maksimumnya telah mendekati 950° C saat dipanaskan selama 50 menit. Sedangkan untuk sampel lainnya, temperaturnya masih berada jauh di bawah 950° C. Hal ini dapat terjadi demikian karena pada sampel yang lebih kecil laju generasi panas yang terjadi dan laju panas yang dikonduksikan seimbang hal ini ditandai dengan kenaikan temperatur yang konstan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.28. Titik di daerah tengah pada masing – masing sampel dipilih dan temperature yang terjadi tiap kenaikan temperatur diplot.



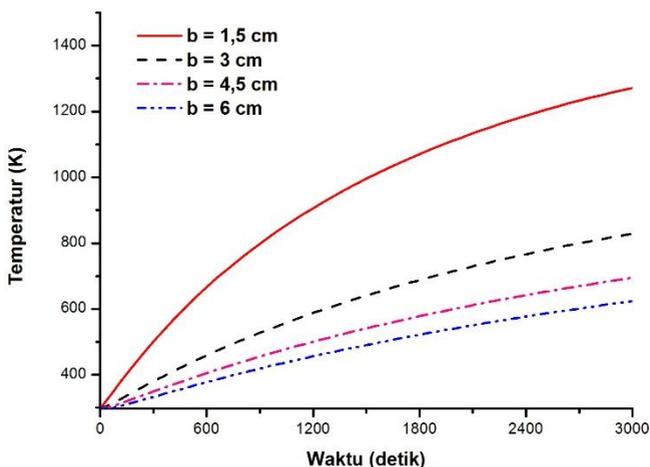
Gambar 4.28 Laju Kenaikan Temperatur pada Sampel Balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan Sisi 7 cm

Dari Gambar 4.28 dapat dilihat bahwa sampel dengan ketebalan 1,5 cm mengalami kenaikan yang signifikan dan



konstan. Hal ini disebabkan oleh akumulasi dari generasi panas dan konduksi panas yang seimbang selama proses pemanasan sehingga menyebabkan temperatur akhir yang dicapai dapat paling maksimum.

Tren ini juga terjadi pada sampel dengan sisi 10 cm seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.29. Sampel dengan ketinggian 1,5 cm menunjukkan temperatur akhir yang dicapai paling tinggi dibandingkan dengan sampel lain dan dibandingkan dengan sampel bersisi 7 cm, besar temepatur yang terjadi sedikit lebih tinggi. Hal ini diakibatkan volumenya yang lebih besar sehingga generasi panas yang terkumpul juga semakin besar.



Gambar 4.29 Laju Kenaikan Temperatur pada Sampel Balok  $\text{FeTiO}_3$  dengan Sisi 10 cm

Dari hasil simulasi tersebut didapatkan bahwa bentuk balok dengan ketebalan 1,5 cm memiliki potensi untuk dijadikan



kandidat geometri  $\text{FeTiO}_3$  ketika dipanaskan menggunakan microwave konvensional. Namun karena proses pemanasan gelombang mikro sering dipilih karena prosesnya yang cepat dan efisien, untuk pemanasan selama 50 menit dirasa kurang efektif untuk proses pemanasan yang cepat sehingga dapat disimpulkan bahwa material  $\text{FeTiO}_3$  tidak cocok untuk dipanaskan menggunakan microwave konvensional.

Dibandingkan dengan sampel silinder, sampel dengan berbentuk balok dapat mencapai temperatur maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel berbentuk silinder. Namun dari segi efisiensi, sampel berbentuk silinder lebih cocok diaplikasikan sebagai geometri material  $\text{FeTiO}_3$  ketika dipanaskan menggunakan gelombang mikro. Semakin besar daya dari sumber gelombang mikro yang dipakai juga dapat mempercepat proses pemanasan dari suatu material. Selain itu, didapatkan juga bahwa semakin besar nilai juga menyebabkan efisiensi dari pemanasan menjadi menurun.

#### **4.3.3 Analisis Distribusi Temperatur pada $\text{FeTiO}_3$ di dalam Sistem Microwave Batch Furnace**

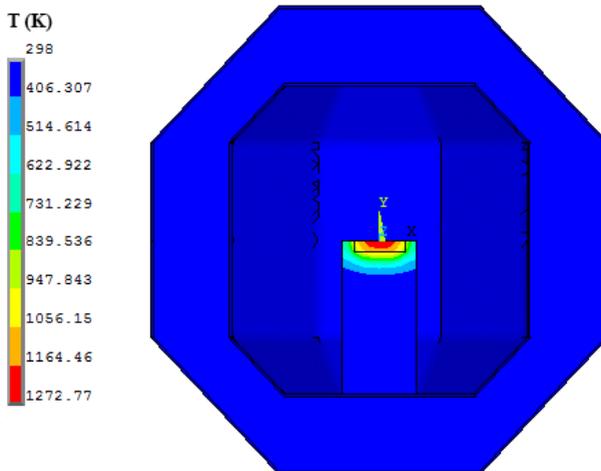
Simulasi di dalam Microwave Batch Furnace dilakukan dengan parameter seperti yang dilakukan Miftakhur pada tahun 2015 secara eksperimental. Material  $\text{FeTiO}_3$  diletakkan di dalam wadah crucible berbentuk silinder yang terbuat dari material aluminosilikat dan diletakkan tepat di tengah furnace sehingga tepat mengenai arah tembakan sumber gelombang mikro. Pada penelitian ini variasi arah datangnya sumber gelombang mikro yaitu 1 sisi dari atas sampel dan 2 sisi dari atas dan bawah sampel serta variasi ketinggian sampel di dalam wadah crucible yaitu 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm dan 6 cm. Dinding *furnace* terdiri dari 3 material yang secara berurutan dari luar ke dalam adalah AISI 1006,



aluminosilikat dan Al 6061-T6. Sifat termal dari ketiga material tersebut ditunjukkan oleh Tabel 3.8 hingga 3.16.

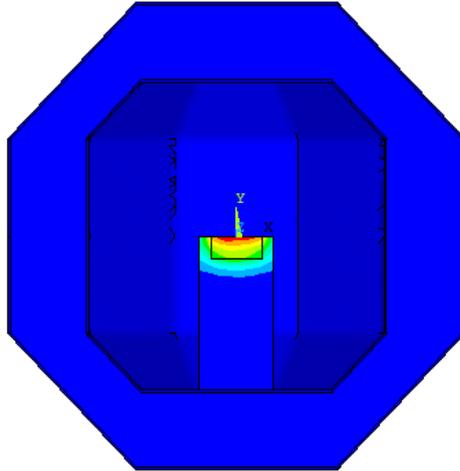
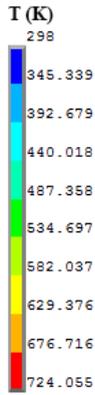
Kondisi batas (*Boundary Condition*) diatur sama seperti sampel silinder dan balok sebelumnya yaitu berupa material dikenai temperatur awal sebesar 298 K dan terjadi konveksi pada bagian permukaan material dengan udara yang memiliki koefisien heat transfer sebesar  $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pada temperatur 298 K. Fluks energi akibat gelombang mikro diaplikasikan sebesar  $13,875 \text{ W/cm}^2$  seperti pada simulasi sebelumnya yaitu menggunakan *Microwave Batch Furnace* yang memiliki daya 5.5 kW.

(a)

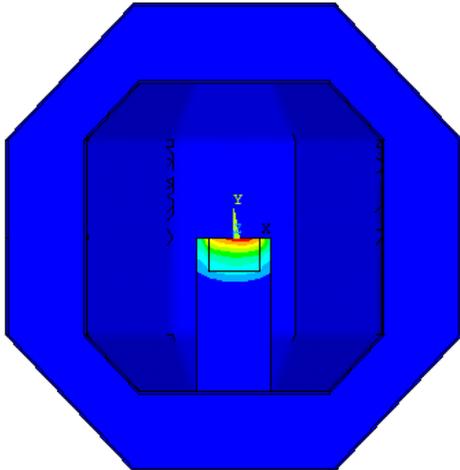
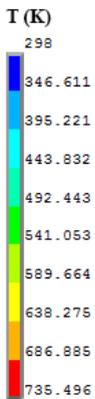




(b)

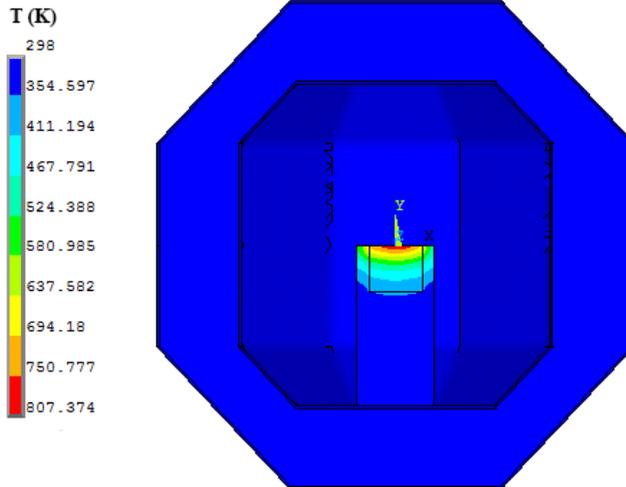


(c)





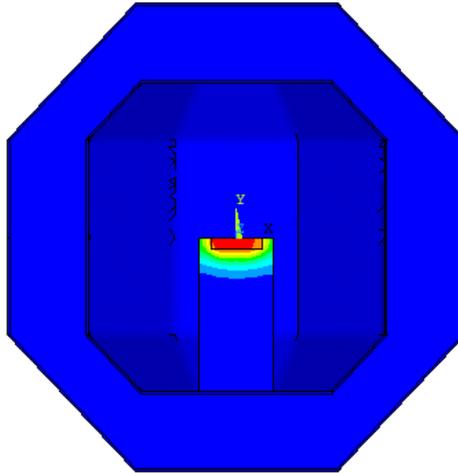
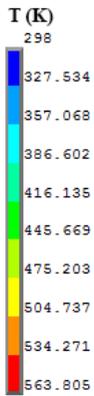
(d)



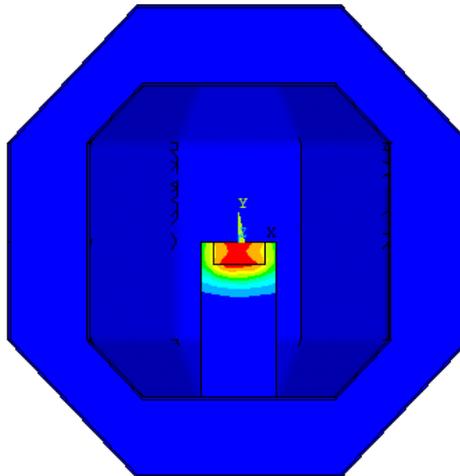
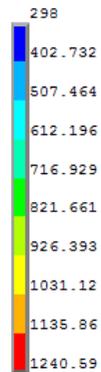
Gambar 4.30 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Microwave Batch Furnace dengan Sumber Berasal dari 1 Sisi selama 12 Menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm

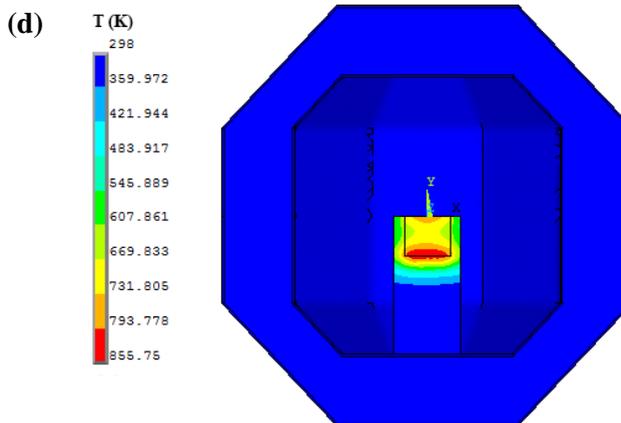
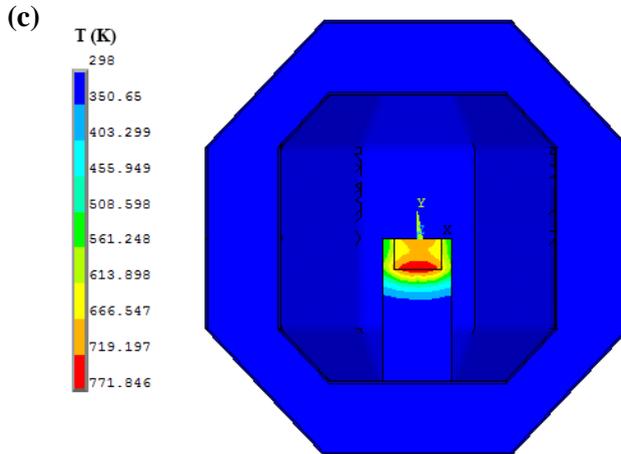


(a)



(b)

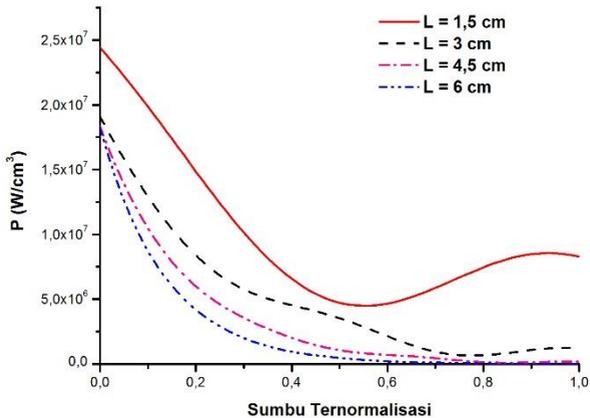




Gambar 4.31 Kontur Distribusi Temperatur dari Potongan Microwave Batch Furnace dengan Sumber Berasal dari 2 Sisi selama 18 Menit (a)  $l = 1,5$  cm (b)  $l = 3$  cm (c)  $l = 4,5$  cm (d)  $l = 6$  cm



Dari Gambar 4.30 dan 4.31 dapat kita lihat kontur distribusi temperatur pada sampel ketika dipanaskan dengan sumber gelombang mikro dari 1 sisi dan 2 sisi. Berdasarkan Gambar 4.30 dapat kita lihat bahwa pada sampel dengan ketinggian 1,5 cm memiliki temperatur maksimum yang paling tinggi dibandingkan dengan sampel yang lain. Hal ini dapat dijelaskan dari generasi panas yang terjadi di dalam sampel seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.32. Dapat dilihat bahwa semakin bertambah ketinggian dari sampel, maka semakin berkurang pula besar generasi panas yang terjadi di dalam material.



Gambar 4.32 Distribusi Generasi Panas yang dihasilkan sepanjang sumbu tengah FeTiO<sub>3</sub> untuk pemanasan menggunakan *Microwave Batch Furnace* dengan sumber pemanasan 1 sisi

Hal tersebut berlaku juga untuk distribusi temperatur yang terjadi pada pemanasan dengan sumber gelombang mikro berasal dari dua sisi. Tren yang terjadi adalah sampel dengan ketinggian

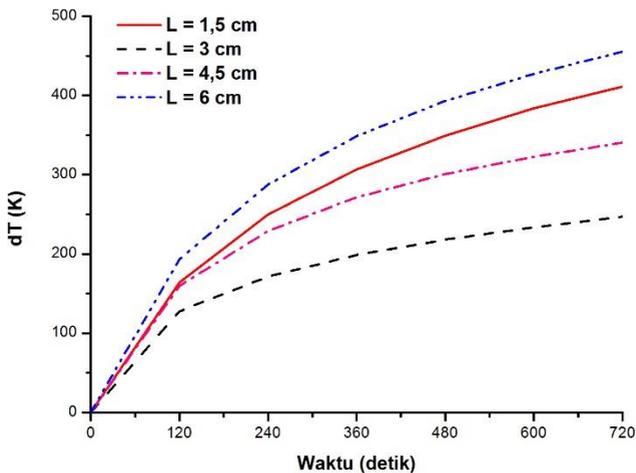


1,5 cm mencapai temperatur maksimumnya pada bagian tengah sampel sedangkan pada bagian ujung – ujungnya menjadi minimum. Bersamaan dengan bertambahnya ketinggian maka tren ini akan menjadi berbalik yaitu pada bagian tengah sampel menjadi minimum dan pada bagian ujung menjadi maksimum. Sampel dengan ketinggian 3 cm mencapai temperatur maksimum paling tinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Hal ini dapat juga dijelaskan dari generasi panas yang dihasilkan dari dalam sampel seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Jika dilihat kembali pada Gambar 4.31, temperatur di ujung atas sampel dengan ketinggian 4,5 cm dan 6 cm lebih rendah nilainya dengan besar temperatur yang terjadi pada bagian ujung bawah sampel. Hal ini dapat dijelaskan akibat kontribusi konveksi udara yang mengenai bagian permukaan atas sampel sehingga temperaturnya menjadi lebih rendah.

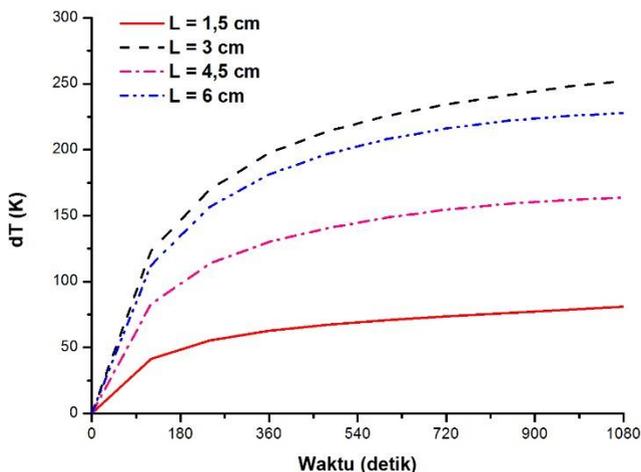
Jika dibandingkan dengan sampel silinder dengan diameter dan ketinggian yang sama. Temperatur yang dicapai dalam sampel yang diletakkan di dalam crucible memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan sampel tanpa crucible. Hal ini disebabkan karena pada sampel yang diletakkan dalam crucible mengalami kontak termal dengan material crucible sendiri. Karena adanya kontak termal ini, maka akan ada heat loss yang terjadi menuju material yang temperaturnya lebih rendah berdasarkan asas Black. Terutama jika material yang temperaturnya lebih rendah memiliki nilai kapasitas panas spesifik yang tinggi, maka besar heat loss yang terjadi juga akan semakin besar. Berdasarkan Tabel 3.6 dan 3.13, kita dapat melihat bahwa nilai kapasitas panas spesifik yang dimiliki oleh material crucible lebih tinggi dibandingkan oleh material  $\text{FeTiO}_3$  oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa turunnya temperatur yang terjadi diakibatkan oleh adanya heat loss yang terjadi dari material ilmenite menuju crucible.



Selain dari distribusi temperatur yang terjadi, keefektifan pemanasan juga dapat dilihat dari perbedaan yang terjadi antara temperatur maksimum dan minimum selama waktu pemanasan yang terjadi. Untuk melihat pengaruh arah sumber pemanasan terhadap perbedaan temperatur yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.33 dan 4.34.



Gambar 4.33 Variasi Perbedaan Temperatur pada Pemanasan di Dalam Microwave Batch Furnace dengan Sumber 1 Sisi



Gambar 4.34 Variasi Perbedaan Temperatur pada Pemanasan di Dalam Microwave Batch Furnace dengan Sumber 2 Sisi

Dari Gambar 4.33 kita dapat melihat bahwa kenaikan perbedaan temperatur tertinggi terjadi pada sampel dengan ketinggian 6 cm. Kemudian diikuti oleh sampel dengan ketinggian 1,5 cm, 4,5 cm dan 3 cm. Hal ini dapat dijelaskan dari generasi panas yang dihasilkan. Dari Gambar 4.32, sampel dengan ketinggian 6 cm menghasilkan generasi panas yang cukup tinggi pada bagian atas yang paling dekat dengan sumber gelombang elektromagnetik dan berkurang hingga mendekati nol ketika kedalaman material menjauhi sumber arah pemanasan. Hal ini mengakibatkan perbedaan yang terjadi pada bagian atas dan bagian bawah sampel akan memiliki perbedaan temperatur yang signifikan pula. Sedangkan pada sampel dengan ketinggian 1,5 cm menunjukkan bahwa generasi panas yang dihasilkan dari dalam sampel paling maksimum dibandingkan yang lainnya. Akan tetapi



karena ketinggiannya yang paling rendah menyebabkan volumenya menjadi paling rendah dan volume crucible menjadi lebih besar dan mengakibatkan heat loss yang terjadi dari material ke wada crucible semakin besar pula berdasarkan asas Black. Sehingga perbedaan temperatur yang terjadi pada bagian ujung sampel dengan bagian yang kontak dengan wadah crucible menjadi lebih besar dan menyebabkan keefektifan geometri yang diaplikasikan berkurang.

Sedangkan untuk pemanasan yang bersumber dari 2 sisi didapatkan bahwa kenaikan perbedaan temperatur tertinggi ditunjukkan oleh sampel dengan ketinggian 3 cm. Hal ini dapat disebabkan karena pada sampel ini generasi panas yang terjadi paling maksimum pada bagian atas dan bawah sampel sedangkan pada bagian yang kontak dengan wadah crucible terjadi heat loss sehingga temperaturnya minimum oleh karena itu perbedaan pada bagian ujung – ujung sampel dengan bagian yang mengalami kontak dengan wadah crucible menjadi lebih besar.

Pada akhir waktu pemanasan, besar perbedaan temperatur yang terjadi akibat pemanasan dengan sumber 1 sisi adalah secara berurutan berdasarkan ketinggian sebesar 411,29 K, 246,776 K, 340,373 K dan 455,125 K. Sedangkan untuk pemanasan dengan sumber berasal dari 2 sisi besar perbedaan temperatur yang terjadi adalah 80,986 K, 252,164 K, 153,832 K dan 227,932 K. Jika dilihat dari nilai perbedaan temperatur yang didapat pada akhir proses pemanasan, kita dapat menyimpulkan bahwa pemanasan dengan sumber berasal dari 2 sisi lebih efektif dibandingkan dengan 1 sisi karena pada akhir proses pemanasan perbedaan temperatur yang terjadi lebih kecil sehingga keseragaman temperatur akan lebih tercapai.

Dari beragam simulasi parameter yang dilakukan pada percobaan ini, didapatkan bahwa geometri yang paling efektif



untuk digunakan dalam proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  adalah berbentuk silinder tanpa wadah dengan diameter 10 cm, ketinggian 3 cm dan arah pemanasan berasal dari dua arah.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil dan analisa data yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Simulasi dalam objek berbentuk silinder dan balok telah berhasil disimulasikan dengan hasil berupa :
  - a. Pada simulasi silinder daging sapi menggunakan ANSYS didapatkan sampel yang paling efektif untuk dipanaskan menggunakan gelombang mikro adalah dengan ketinggian 1,25 cm dan error yang dihasilkan dari simulasi menggunakan ANSYS dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Hossan adalah sebesar 0,13 %.
  - b. Pada simulasi balok salmon menggunakan ANSYS didapatkan sampel yang paling efektif untuk dipanaskan menggunakan gelombang mikro adalah dengan ketebalan 1,5 cm dan error yang dihasilkan dari simulasi menggunakan ANSYS dibandingkan penelitian yang dilakukan Hossan adalah sebesar 0,12 %.
2. Pada proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder dan balok didapatkan bahwa :
  - a. Untuk material  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk silinder didapatkan geometri sampel yang paling efektif dengan menghasilkan perbedaan temperatur sebesar 101,76 K dan temperatur maksimum yang bisa dicapai 1210,35 K adalah pada sampel berdiameter 10 cm dan ketinggian 3 cm dengan pemanasan selama 4 menit.
  - b. Untuk material  $\text{FeTiO}_3$  berbentuk balok didapatkan geometri sampel yang paling efektif dengan



- menghasilkan perbedaan temperatur sebesar 126,91 K K dan temperatur maksimum yang bisa dicapai 1207,26 K adalah pada sampel dengan sisi 10 cm dan ketinggian 3 cm dengan pemanasan selama 4 menit.
- c. Bentuk, ukuran benda dan daya sumber pemanasan dapat mempengaruhi distribusi temperatur yang terjadi selama proses pemanasan
3. Pada proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  dalam sistem *Microwave Batch Furnace* didapatkan bahwa :
- a. Untuk material  $\text{FeTiO}_3$  di dalam wadah crucible berbentuk silinder didapatkan geometri sampel yang paling efektif dengan menghasilkan perbedaan temperatur sebesar 80,986 K dan temperatur maksimum yang bisa dicapai 1240,59 K adalah pada sampel dengan diameter 7 cm dan ketinggian 1,5 cm dengan pemanasan selama 18 menit dan sumber pemanasan berasal dari dua sisi.
  - b. Ukuran benda dan arah datangnya sumber pemanasan dapat mempengaruhi distribusi temperatur yang terjadi selama proses pemanasan

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan analisa data yang dilakukan penulis maka disarankan bahwa :

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut untuk proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  dengan menggunakan grafit.
2. Selain itu dibutuhkan penelitian yang lebih lanjut untuk mendapatkan parameter yang tepat menggunakan metode statistik sehingga proses pemanasan  $\text{FeTiO}_3$  dapat lebih optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Acevedo, Luis, Uson, S., Uche, J. 2015. "Numerical Study of Cullet Glass Subjected to Microwave Heating and SiC Susceptor Effects. Part I: Combined Electric and Thermal Model". **Energy Conversion and Management** **97**: 439 – 457.
- Ayappa, K.G. , Davis, H.T., Crapiste, G., Davis, E.A., Gordon, J. 1991. "Microwave Heating: An Evaluation of Power Formulations", **Chemical Engineering Science** Vol. **46**: 1005–1016.
- \_\_\_\_\_, Barringer, S.A. 1997. "Resonant Microwave Power Absorption in Slabs and Cylinders", **AIChE Journal** Vol. **43** No.3, 615 – 624.
- Bajpai, P. K., Singh, I., Madaan, J. 2012. "Joining of Natural Fiber Reinforced Composites using Microwave Energy: Experimental and Finite Element Study", **Materials and Design** **35**: 596–602.
- Bathe, K.-J. 1996. *Finite Element Procedures*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Benedetto, A., dan Clvi, A. 2013. "A Pilot Study on Microwave Heating for Production and Recycling of Road Pavement Materials". **Construction and Building Materials** **44**: 351 – 359.
- Bhattacharya, M., Basak, T. 2016. "A Comprehensive Analysis on the Effect of Shape on the Microwave Heating Dynamics of Food Materials", **Innovative Food Science and Emerging Technologies**.
- Buchelnikov, V. D. , louzguine-Luzgin, D. V. , Anzulevich, A. P. , Bychkov, L.V., Yoshikawa, N. , Sato, M., Inoue, A. 2008. "Modeling of Microwave Heating of Metallic Powder", **Physica B** **403**: 4053–4058.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T. 2011. "Microwave Material Processing—A Review". **AIChE Journal** **58**, 2: 330-363.

- Cheng, J., Roy, R., Agrawal, D. 2002. “Radically Different Effects on Materials by Separated Microwave Electric and Magnetic Fields”, **Material Research Innovations Vol 5:** 170–177.
- Chiteme, C., Mulaba-Bafubiandi, A. F. 2006. “An Investigation on Electrical Properties of Microwave Treated Natural Ilmenite (FeTiO<sub>3</sub>)”, **Journal of Material Science Vol. 41 Issue 8**, 2365–2372.
- Clark, D. E. dan Sutton, W. H. 1996. “Microwave Processing of Materials”, **Annual Review of Materials Science Vol. 26:** 299-331.
- Collin, Robert E. 2001. *Foundations for Microwave Engineering*. New Jersey: IEEE Press.
- Crane, C.A., Pantoya, M.L., Weeks, B.L. 2013. “Spatial Observation and Quantification of Microwave Heating in Materials”, **Review of Scientific Instrument 84**.
- Desai, C. dan Abel, J. 1971. *Introduction to the Finite Element Method*. Reinhold: Van Nostrand.
- Duan, Y., dkk. 2006. “Finite Element Approach to Microwave Sintering of Oxide Materials”. **Proc. of the COMSOL Users Conference:** Boston.
- Francis, A. A. dan El-Midany, A. A. 2008. “An Assessment of the Carbothermic Reduction of Ilmenite Ore by Statistical Design”. **Journal of Materials Processing Technology 199:** 279-286.
- Funawatashi, Y., Suzuki, T. 2003. “Numerical Analysis of Microwave Heating of a Dielectric, **Heat Transfer – Asian Research 32 (3):** 227–236.
- Goksoy, E.O., James, C., James, S.J. 1999. “Non-Uniformity of Surface Temperatures after Microwave Heating of Poultry Meat”, **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 34 (3):** 149–160.
- Gower, H.L. 2007. *Welding of a Metal-Polymer Laminate*. Thesis: TU Delft.

- Gunasekaran, S., Yang, H. 2007. “Effect of Experimental Parameters on Temperature Distribution during Continuous and Pulsed Microwave Heating” , **Journal of Food Engineering** **78 (4):** 1452–1456.
- Gupta, S.K., Rajakumar, V., Grieveson, P. 1991. “Phase Transformations during Heating of Ilmenite Concentrates. **Metallurgical Transactions B** **22B**, 714.
- Haimbaugh, R. E. 2003. *Theory of Heating by Induction*. Tersedia online:  
<http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACFAA5C.pdf> (diakses pada tanggal 12 September 2016).
- Hidayat, M. I. P., Ariwahjoedi, B., Parman, S. 2015. “Meshless Local B-spline-FD Method and Its Application for 2D Heat Conduction Problems with Spatially Varying Thermal Conductivity”. **Applied Mathematics and Computation** **Vol. 242:** 236 – 254.
- Horikoshi, S., Sumi, T., Serpone, N. 2013. “Unusual Effect of the Magnetic Field Component of the Microwave Radiation on Aqueous Electrolyte Solutions”. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy** **Vol. 46:** 215–228.
- Hossan, M.R., Dutta, P., Byun, D.Y., 2010. “Analysis of Microwave Heating for Cylindrical Shaped Objects”, **International Journal of Heat and Mass Transfer** **53:** 5129–5138.
- \_\_\_\_\_, 2011. “Analytical Solution for Temperature Distribution in Microwave Heating of Rectangular Objects”, **2011 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. Denver, USA.
- \_\_\_\_\_, 2012. “Effect of Temperature Dependent Properties in Electromagnetic Heating”, **International Journal of Heat and Mass Transfer** **55:** 3412 – 3422.
- Kakac, S., Yener, Y. 1985. *Heat Conduction: Second Edition*. New York, Hemisphere.
- Kelly, R. M. dan Rowson, N. A. 1995. “Microwave Reduction of Oxidised Ilmenite Concentrate”. **Minerals Engineering** **8:**

- 1427–1438.
- Kıral, B.G., Tabanoğlu, M. Serindağ, H. T. 2013. “Finite Element Modeling of Friction Stir Welding in Aluminum Alloys Joint”, **Mathematical and Computational Applications Vol. 18 No. 2**: 122-131.
- Lewis, R. W., Nithiarasu, P., Seetharamu, K. N. 2004. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. New York: Wiley.
- Li, Y., Hang, X., Li, N., Hao, X. 2016. “A Temperature distribution prediction model of carbon fiber reinforced composites during microwave cure”, **Journal of Materials Processing Technology 230**: 280–287.
- Ligny, D., Richet, P., Westrum Jr., E.F., Roux, J. 2002. “Heat Capacity and Entropy of Rutile (TiO<sub>2</sub>) and Nepheline (NaAlSiO<sub>4</sub>)”, **Physics and Chemistry of Minerals Vol. 29**: 267 – 272.
- Lovas, M., Kovacova, M., Dimitrakis, G., Cuvanova, S., Znamenackova, I., Jakabsky, S. 2010. “Modelling of Microwave Heating of Andesite and Minerals”, **International Journal of Heat and Mass Transfer 53**: 3387 – 3393.
- Madenci, Erdogan dan Guven, Ibrahim. 2015. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. New York: Springer.
- Matiskova, D., Gaspar, S., Mura, L. 2013. “Thermal Factors of Die Casting and Their Impact on the Service Life of Moulds and the Quality of Casting”, **Acta Polytechnica Hungarica Vol. 10 No. 3**, 65 – 78.
- Metaxas, AC. 1997. *Simulation of Microwave Heating using Finite Elements*. London: The Institution of Electrical Engineers.
- Mishra, R. R., dan Sharma, A.K. 2015. “Microwave-Material Interaction Phenomena: Heating Mechanisms, Challenges and Opportunities in Material Processing”, **Composites Part A Vol. 81**: 78–97.

- Moulson, A. J., Herbert, J. M. 2003. *Electroceramics: Materials, Properties, Applications 2nd Edition*. Toronto: John Wiley and Sons.
- Navrostky, A. 1975. “Thermodynamics of Formation of Some Compounds with the Pseudobrookite Structure and of the  $\text{FeTi}_2\text{O}_5\text{-Ti}_3\text{O}_5$  Solid Solution Series”, **American Mineralogist Vol. 60**: 249 – 256.
- Newton, R. C., Harlov, D. E. 1993. “Standard Thermodynamics Property of Almandine”, **Canadian Mineralogist Vol. 31**: 391 – 399.
- Oliveira, M.E.C., Franca, A.S. 2002. “Microwave Heating of Foodstuff”, **Journal of Food Engineering 53**: 347–359.
- Peng, Z. 2012. *Heat Transfer in Microwave Heating*. Disertasi, Michigan Technological University.
- Riahi, M. dan Nazari, H.. 2011. “Analysis of Transient Temperature and Residual Thermal Stresses in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6061-T6 via Numerical Simulation”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 55**:143–152.
- Rohmah, M. 2015. *Studi Variasi Komposisi Grafit terhadap Proses Ekstraksi  $\text{TiO}_2$  (Rutile) dari Pasir Besi Titanomagnetite dengan Memanfaatkan Pemanasan Gelombang Mikro dan Leaching Asam Klorida*. Tugas Akhir: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Romano, V.R., Marra, F., Tammaro, U. 2005. “Modeling of Microwave Heating of Foodstuff: Study on the Influence of Sample Dimensions with a FEM Approach”, **Journal of Food Engineering 71**: 233–241.
- Rosa, R., Veronesi, P., Leonelli, C. A. 2013. “A Review on Combustion Synthesis Intensification by Means of Microwave Energy”, **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification Vol. 71**: 2–18.
- Sun, J., Wang, W., Yue, Q. 2016. “Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies”, **Materials Vol. 9**: 1-25.

- Thostenson, E. T., dan Chou, T. W. 1999. “Microwave Processing: Fundamentals and Applications”, **Composites Part A Vol. 30**:1055–71.
- Thuault, A., Savary, E., Bazin, J., Marinel, S.. 2014. “Microwave Sintering of Large Size Pieces with Complex Shape”, **Journal of Materials Processing Technology 214**: 470–476.
- Touloukian, Y.S. 1970. *Thermophysical Properties of Matter Volume 2 : Thermal Conductivity Non Metallic Solid*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- \_\_\_\_\_. 1970. *Thermophysical Properties of Matter Volume 5 : Specific Heat Non Metallic Solid*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- \_\_\_\_\_. 1970. *Thermophysical Properties of Matter Volume 13 : Thermal Expansion Non Metallic Solid*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- Wang, X., Li, W., Yang, B., Guo, S., Zhang, L., Chen, G., Peng, J., Luo, H. 2014. “Microwave-Absorbing of Carbothermic Reduced Products of Ilmenite and Oxidized Ilmenite”, **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 48 (3)**: 192-202.
- Wang, Y. , Tang, J. , Rasco, B. , Kong, F. , Wang, S. 2008. “Dielectric Properties of Salmon Fillets as a Function of Temperature and Composition”, **Journal of Food Engineering 87**: 236–246.
- Yakovlev, Vadim V. , Allan, Shawn M., Fall, Morgana L. , Shulman, Holly S. 2011. “Computational Study of Microwave Processing of Zirconia: Effects of Frequency and Temperature-Dependent Material Parameters”, **13th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering and Applications**. Thun, Switzerland.
- Zhu, Y. J. dan Chen, F. 2014. “Microwave-Assisted Preparation of Inorganic Nanostructures in Liquid Phase”. **Chemical Reviews 114**: 6462-6555.



## 2. Kapasitas Panas Spesifik Ilmenite (FeTiO<sub>3</sub>)

249

DATA TABLE NO. 73. SPECIFIC HEAT OF IRON METATITANATE, FeTiO<sub>3</sub>

[Temperature, T, K; Specific Heat, C<sub>p</sub>, Cal g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

T	C <sub>p</sub>	T	C <sub>p</sub>	T	C <sub>p</sub>	T	C <sub>p</sub>
CURVE 1							
Series 1							
86.49	4.48 × 10 <sup>-6</sup>	400	1.925 × 10 <sup>-1</sup>	677	2.10 × 10 <sup>-1</sup>	1500	2.354 × 10 <sup>-1</sup>
93.23	5.20	500	2.012	773	2.18	1800	2.352
106.02	6.31	600	2.110				
123.35	8.01	700	2.150				
145.50	9.87	800	2.191				
163.53	1.03 × 10 <sup>-1</sup>	900	2.234				
184.54	1.29	1000	2.244				
204.22	1.69	1100	2.255				
224.70	1.4 <sup>a</sup>	1200	2.265				
244.20	1.59	1300	2.274				
263.87	1.68	1400	2.283				
283.57	1.68	1500	2.293				
CURVE 2							
Series 2							
68.78	3.34 × 10 <sup>-7</sup>	114.3	6.292	12.0	2.538 × 10 <sup>-4</sup>	200.9	1.308
77.89	3.87	134.3	7.772	12.0	2.538 × 10 <sup>-4</sup>	211.2	1.317 <sup>a</sup>
82.10	4.12	144.7	8.222	12.0	2.538 × 10 <sup>-4</sup>	221.2	1.305
90.05	4.97	154.7	8.222	15.0	5.352	231.2	1.305
94.22	5.24	164.7	8.222			240.9	1.447 <sup>a</sup>
100.09	6.52	175.6	1.118 × 10 <sup>-6</sup>			251.3	1.529 <sup>a</sup>
104.05	8.42	185.6	1.174 <sup>a</sup>			261.3	1.529 <sup>a</sup>
107.09	9.82	195.6	1.230 <sup>a</sup>			271.1	1.564 <sup>a</sup>
109.09	6.52	205.6	1.250 <sup>a</sup>			280.7	1.627 <sup>a</sup>
114.05	8.42	215.6	1.421			290.7	1.645 <sup>a</sup>
116.05	1.655 <sup>a</sup>	225.6	1.458			298.16	1.647 <sup>a</sup>
126.40	1.655 <sup>a</sup>	235.6	1.458				
131.39	1.672	245.6	1.520 <sup>a</sup>				
141.39	1.672	255.6	1.520 <sup>a</sup>				
151.39	1.672	265.6	1.520 <sup>a</sup>				
161.39	1.672	275.6	1.520 <sup>a</sup>				
171.39	1.672	285.6	1.520 <sup>a</sup>				
181.39	1.672	295.6	1.520 <sup>a</sup>				
191.39	1.672	305.6	1.520 <sup>a</sup>				
201.39	1.672	315.6	1.520 <sup>a</sup>				
211.39	1.672	325.6	1.520 <sup>a</sup>				
221.39	1.672	335.6	1.520 <sup>a</sup>				
231.39	1.672	345.6	1.520 <sup>a</sup>				
241.39	1.672	355.6	1.520 <sup>a</sup>				
251.39	1.672	365.6	1.520 <sup>a</sup>				
261.39	1.672	375.6	1.520 <sup>a</sup>				
271.39	1.672	385.6	1.520 <sup>a</sup>				
281.39	1.672	395.6	1.520 <sup>a</sup>				
291.39	1.672	405.6	1.520 <sup>a</sup>				
301.39	1.672	415.6	1.520 <sup>a</sup>				
311.39	1.672	425.6	1.520 <sup>a</sup>				
321.39	1.672	435.6	1.520 <sup>a</sup>				
331.39	1.672	445.6	1.520 <sup>a</sup>				
341.39	1.672	455.6	1.520 <sup>a</sup>				
351.39	1.672	465.6	1.520 <sup>a</sup>				
361.39	1.672	475.6	1.520 <sup>a</sup>				
371.39	1.672	485.6	1.520 <sup>a</sup>				
381.39	1.672	495.6	1.520 <sup>a</sup>				
391.39	1.672	505.6	1.520 <sup>a</sup>				
401.39	1.672	515.6	1.520 <sup>a</sup>				
411.39	1.672	525.6	1.520 <sup>a</sup>				
421.39	1.672	535.6	1.520 <sup>a</sup>				
431.39	1.672	545.6	1.520 <sup>a</sup>				
441.39	1.672	555.6	1.520 <sup>a</sup>				
451.39	1.672	565.6	1.520 <sup>a</sup>				
461.39	1.672	575.6	1.520 <sup>a</sup>				
471.39	1.672	585.6	1.520 <sup>a</sup>				
481.39	1.672	595.6	1.520 <sup>a</sup>				
491.39	1.672	605.6	1.520 <sup>a</sup>				
501.39	1.672	615.6	1.520 <sup>a</sup>				
511.39	1.672	625.6	1.520 <sup>a</sup>				
521.39	1.672	635.6	1.520 <sup>a</sup>				
531.39	1.672	645.6	1.520 <sup>a</sup>				
541.39	1.672	655.6	1.520 <sup>a</sup>				
551.39	1.672	665.6	1.520 <sup>a</sup>				
561.39	1.672	675.6	1.520 <sup>a</sup>				
571.39	1.672	685.6	1.520 <sup>a</sup>				
581.39	1.672	695.6	1.520 <sup>a</sup>				
591.39	1.672	705.6	1.520 <sup>a</sup>				
601.39	1.672	715.6	1.520 <sup>a</sup>				
611.39	1.672	725.6	1.520 <sup>a</sup>				
621.39	1.672	735.6	1.520 <sup>a</sup>				
631.39	1.672	745.6	1.520 <sup>a</sup>				
641.39	1.672	755.6	1.520 <sup>a</sup>				
651.39	1.672	765.6	1.520 <sup>a</sup>				
661.39	1.672	775.6	1.520 <sup>a</sup>				
671.39	1.672	785.6	1.520 <sup>a</sup>				
681.39	1.672	795.6	1.520 <sup>a</sup>				
691.39	1.672	805.6	1.520 <sup>a</sup>				
701.39	1.672	815.6	1.520 <sup>a</sup>				
711.39	1.672	825.6	1.520 <sup>a</sup>				
721.39	1.672	835.6	1.520 <sup>a</sup>				
731.39	1.672	845.6	1.520 <sup>a</sup>				
741.39	1.672	855.6	1.520 <sup>a</sup>				
751.39	1.672	865.6	1.520 <sup>a</sup>				
761.39	1.672	875.6	1.520 <sup>a</sup>				
771.39	1.672	885.6	1.520 <sup>a</sup>				
781.39	1.672	895.6	1.520 <sup>a</sup>				
791.39	1.672	905.6	1.520 <sup>a</sup>				
801.39	1.672	915.6	1.520 <sup>a</sup>				
811.39	1.672	925.6	1.520 <sup>a</sup>				
821.39	1.672	935.6	1.520 <sup>a</sup>				
831.39	1.672	945.6	1.520 <sup>a</sup>				
841.39	1.672	955.6	1.520 <sup>a</sup>				
851.39	1.672	965.6	1.520 <sup>a</sup>				
861.39	1.672	975.6	1.520 <sup>a</sup>				
871.39	1.672	985.6	1.520 <sup>a</sup>				
881.39	1.672	995.6	1.520 <sup>a</sup>				
891.39	1.672	1005.6	1.520 <sup>a</sup>				
901.39	1.672	1015.6	1.520 <sup>a</sup>				
911.39	1.672	1025.6	1.520 <sup>a</sup>				
921.39	1.672	1035.6	1.520 <sup>a</sup>				
931.39	1.672	1045.6	1.520 <sup>a</sup>				
941.39	1.672	1055.6	1.520 <sup>a</sup>				
951.39	1.672	1065.6	1.520 <sup>a</sup>				
961.39	1.672	1075.6	1.520 <sup>a</sup>				
971.39	1.672	1085.6	1.520 <sup>a</sup>				
981.39	1.672	1095.6	1.520 <sup>a</sup>				
991.39	1.672	1105.6	1.520 <sup>a</sup>				
1001.39	1.672	1115.6	1.520 <sup>a</sup>				
1011.39	1.672	1125.6	1.520 <sup>a</sup>				
1021.39	1.672	1135.6	1.520 <sup>a</sup>				
1031.39	1.672	1145.6	1.520 <sup>a</sup>				
1041.39	1.672	1155.6	1.520 <sup>a</sup>				
1051.39	1.672	1165.6	1.520 <sup>a</sup>				
1061.39	1.672	1175.6	1.520 <sup>a</sup>				
1071.39	1.672	1185.6	1.520 <sup>a</sup>				
1081.39	1.672	1195.6	1.520 <sup>a</sup>				
1091.39	1.672	1205.6	1.520 <sup>a</sup>				
1101.39	1.672	1215.6	1.520 <sup>a</sup>				
1111.39	1.672	1225.6	1.520 <sup>a</sup>				
1121.39	1.672	1235.6	1.520 <sup>a</sup>				
1131.39	1.672	1245.6	1.520 <sup>a</sup>				
1141.39	1.672	1255.6	1.520 <sup>a</sup>				
1151.39	1.672	1265.6	1.520 <sup>a</sup>				
1161.39	1.672	1275.6	1.520 <sup>a</sup>				
1171.39	1.672	1285.6	1.520 <sup>a</sup>				
1181.39	1.672	1295.6	1.520 <sup>a</sup>				
1191.39	1.672	1305.6	1.520 <sup>a</sup>				
1201.39	1.672	1315.6	1.520 <sup>a</sup>				
1211.39	1.672	1325.6	1.520 <sup>a</sup>				
1221.39	1.672	1335.6	1.520 <sup>a</sup>				
1231.39	1.672	1345.6	1.520 <sup>a</sup>				
1241.39	1.672	1355.6	1.520 <sup>a</sup>				
1251.39	1.672	1365.6	1.520 <sup>a</sup>				
1261.39	1.672	1375.6	1.520 <sup>a</sup>				
1271.39	1.672	1385.6	1.520 <sup>a</sup>				
1281.39	1.672	1395.6	1.520 <sup>a</sup>				
1291.39	1.672	1405.6	1.520 <sup>a</sup>				
1301.39	1.672	1415.6	1.520 <sup>a</sup>				
1311.39	1.672	1425.6	1.520 <sup>a</sup>				
1321.39	1.672	1435.6	1.520 <sup>a</sup>				
1331.39	1.672	1445.6	1.520 <sup>a</sup>				
1341.39	1.672	1455.6	1.520 <sup>a</sup>				
1351.39	1.672	1465.6	1.520 <sup>a</sup>				
1361.39	1.672	1475.6	1.520 <sup>a</sup>				
1371.39	1.672	1485.6	1.520 <sup>a</sup>				
1381.39	1.672	1495.6	1.520 <sup>a</sup>				
1391.39	1.672	1505.6	1.520 <sup>a</sup>				
140							



## 4. Kapasitas Panas Spesifik Aluminosilikat

DATA TABLE NO. 387 SPECIFIC HEAT OF ALUMINOSILICATE GLASS  
 [Temperature, T, K; Specific Heat, Cp, Cal g<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>]

T	Cp
CURVE 1	
198.327	2.3 x 10 <sup>-1</sup>
200.000	2.3
222.079	2.3
244.158	2.3
266.237	2.3
288.316	2.3
310.395	2.3
332.474	2.3
354.553	2.3
376.632	2.3
398.711	2.3
420.790	2.3
442.869	2.3
464.948	2.3
487.027	2.3
509.106	2.3
531.185	2.3
CURVE 2	
262.15	1.18 x 10 <sup>-1</sup>
275.15	2.22
288.15	2.22
301.15	2.22
314.15	2.22
327.15	2.22
340.15	2.22
353.15	2.22
366.15	2.22
379.15	2.22
392.15	2.22
405.15	2.22
418.15	2.22
431.15	2.22
444.15	2.22
457.15	2.22
470.15	2.22
483.15	2.22
496.15	2.22
509.15	2.22
522.15	2.22
535.15	2.22
548.15	2.22
561.15	2.22
574.15	2.22
587.15	2.22
600.15	2.22
613.15	2.22
626.15	2.22
639.15	2.22
652.15	2.22
665.15	2.22
678.15	2.22
691.15	2.22
704.15	2.22
717.15	2.22
730.15	2.22
743.15	2.22
756.15	2.22
769.15	2.22
782.15	2.22
795.15	2.22
808.15	2.22
821.15	2.22
834.15	2.22
847.15	2.22
860.15	2.22
873.15	2.22
886.15	2.22
899.15	2.22
912.15	2.22
925.15	2.22
938.15	2.22
951.15	2.22
964.15	2.22
977.15	2.22
990.15	2.22
1003.15	2.22
1016.15	2.22
1029.15	2.22
1042.15	2.22
1055.15	2.22
1068.15	2.22
1081.15	2.22
1094.15	2.22
1107.15	2.22
1120.15	2.22
1133.15	2.22
1146.15	2.22
1159.15	2.22
1172.15	2.22
1185.15	2.22
1198.15	2.22
1211.15	2.22
1224.15	2.22
1237.15	2.22
1250.15	2.22
1263.15	2.22
1276.15	2.22
1289.15	2.22
1302.15	2.22
1315.15	2.22
1328.15	2.22
1341.15	2.22
1354.15	2.22
1367.15	2.22
1380.15	2.22
1393.15	2.22
1406.15	2.22
1419.15	2.22
1432.15	2.22
1445.15	2.22
1458.15	2.22
1471.15	2.22
1484.15	2.22
1497.15	2.22
1510.15	2.22
1523.15	2.22
1536.15	2.22
1549.15	2.22
1562.15	2.22
1575.15	2.22
1588.15	2.22
1601.15	2.22
1614.15	2.22
1627.15	2.22
1640.15	2.22
1653.15	2.22
1666.15	2.22
1679.15	2.22
1692.15	2.22
1705.15	2.22
1718.15	2.22
1731.15	2.22
1744.15	2.22
1757.15	2.22
1770.15	2.22
1783.15	2.22
1796.15	2.22
1809.15	2.22
1822.15	2.22
1835.15	2.22
1848.15	2.22
1861.15	2.22
1874.15	2.22
1887.15	2.22
1900.15	2.22
1913.15	2.22
1926.15	2.22
1939.15	2.22
1952.15	2.22
1965.15	2.22
1978.15	2.22
1991.15	2.22
2004.15	2.22
2017.15	2.22
2030.15	2.22
2043.15	2.22
2056.15	2.22
2069.15	2.22
2082.15	2.22
2095.15	2.22
2108.15	2.22
2121.15	2.22
2134.15	2.22
2147.15	2.22
2160.15	2.22
2173.15	2.22
2186.15	2.22
2199.15	2.22
2212.15	2.22
2225.15	2.22
2238.15	2.22
2251.15	2.22
2264.15	2.22
2277.15	2.22
2290.15	2.22
2303.15	2.22
2316.15	2.22
2329.15	2.22
2342.15	2.22
2355.15	2.22
2368.15	2.22
2381.15	2.22
2394.15	2.22
2407.15	2.22
2420.15	2.22
2433.15	2.22
2446.15	2.22
2459.15	2.22
2472.15	2.22
2485.15	2.22
2498.15	2.22
2511.15	2.22
2524.15	2.22
2537.15	2.22
2550.15	2.22
2563.15	2.22
2576.15	2.22
2589.15	2.22
2602.15	2.22
2615.15	2.22
2628.15	2.22
2641.15	2.22
2654.15	2.22
2667.15	2.22
2680.15	2.22
2693.15	2.22
2706.15	2.22
2719.15	2.22
2732.15	2.22
2745.15	2.22
2758.15	2.22
2771.15	2.22
2784.15	2.22
2797.15	2.22
2810.15	2.22
2823.15	2.22
2836.15	2.22
2849.15	2.22
2862.15	2.22
2875.15	2.22
2888.15	2.22
2901.15	2.22
2914.15	2.22
2927.15	2.22
2940.15	2.22
2953.15	2.22
2966.15	2.22
2979.15	2.22
2992.15	2.22
3005.15	2.22
3018.15	2.22
3031.15	2.22
3044.15	2.22
3057.15	2.22
3070.15	2.22
3083.15	2.22
3096.15	2.22
3109.15	2.22
3122.15	2.22
3135.15	2.22
3148.15	2.22
3161.15	2.22
3174.15	2.22
3187.15	2.22
3200.15	2.22
3213.15	2.22
3226.15	2.22
3239.15	2.22
3252.15	2.22
3265.15	2.22
3278.15	2.22
3291.15	2.22
3304.15	2.22
3317.15	2.22
3330.15	2.22
3343.15	2.22
3356.15	2.22
3369.15	2.22
3382.15	2.22
3395.15	2.22
3408.15	2.22
3421.15	2.22
3434.15	2.22
3447.15	2.22
3460.15	2.22
3473.15	2.22
3486.15	2.22
3499.15	2.22
3512.15	2.22
3525.15	2.22
3538.15	2.22
3551.15	2.22
3564.15	2.22
3577.15	2.22
3590.15	2.22
3603.15	2.22
3616.15	2.22
3629.15	2.22
3642.15	2.22
3655.15	2.22
3668.15	2.22
3681.15	2.22
3694.15	2.22
3707.15	2.22
3720.15	2.22
3733.15	2.22
3746.15	2.22
3759.15	2.22
3772.15	2.22
3785.15	2.22
3798.15	2.22
3811.15	2.22
3824.15	2.22
3837.15	2.22
3850.15	2.22
3863.15	2.22
3876.15	2.22
3889.15	2.22
3902.15	2.22
3915.15	2.22
3928.15	2.22
3941.15	2.22
3954.15	2.22
3967.15	2.22
3980.15	2.22
3993.15	2.22
4006.15	2.22
4019.15	2.22
4032.15	2.22
4045.15	2.22
4058.15	2.22
4071.15	2.22
4084.15	2.22
4097.15	2.22
4110.15	2.22
4123.15	2.22
4136.15	2.22
4149.15	2.22
4162.15	2.22
4175.15	2.22
4188.15	2.22
4201.15	2.22
4214.15	2.22
4227.15	2.22
4240.15	2.22
4253.15	2.22
4266.15	2.22
4279.15	2.22
4292.15	2.22
4305.15	2.22
4318.15	2.22
4331.15	2.22
4344.15	2.22
4357.15	2.22
4370.15	2.22
4383.15	2.22
4396.15	2.22
4409.15	2.22
4422.15	2.22
4435.15	2.22
4448.15	2.22
4461.15	2.22
4474.15	2.22
4487.15	2.22
4500.15	2.22
4513.15	2.22
4526.15	2.22
4539.15	2.22
4552.15	2.22
4565.15	2.22
4578.15	2.22
4591.15	2.22
4604.15	2.22
4617.15	2.22
4630.15	2.22
4643.15	2.22
4656.15	2.22
4669.15	2.22
4682.15	2.22
4695.15	2.22
4708.15	2.22
4721.15	2.22
4734.15	2.22
4747.15	2.22
4760.15	2.22
4773.15	2.22
4786.15	2.22
4799.15	2.22
4812.15	2.22
4825.15	2.22
4838.15	2.22
4851.15	2.22
4864.15	2.22
4877.15	2.22
4890.15	2.22
4903.15	2.22
4916.15	2.22
4929.15	2.22
4942.15	2.22
4955.15	2.22
4968.15	2.22
4981.15	2.22
4994.15	2.22
5007.15	2.22
5020.15	2.22
5033.15	2.22
5046.15	2.22
5059.15	2.22
5072.15	2.22
5085.15	2.22
5098.15	2.22
5111.15	2.22
5124.15	2.22
5137.15	2.22
5150.15	2.22
5163.15	2.22
5176.15	2.22
5189.15	2.22
5202.15	2.22
5215.15	2.22
5228.15	2.22
5241.15	2.22
5254.15	2.22
5267.15	2.22
5280.15	2.22
5293.15	2.22
5306.15	2.22

## 5. Kapasitas Panas Spesifik AISI 1006

☆

Specific Heat Capacity

Temperature 163 - 200 °C	@ Temperature 312 - 373 °F
0.481 J/g·°C	0.115 BTU/lb·°F
@ Temperature 150 - 190 °C	@ Temperature >=212 °F
0.519 J/g·°C	0.124 BTU/lb·°F
@ Temperature 130 - 200 °C	@ Temperature 152 - 392 °F
0.549 J/g·°C	0.131 BTU/lb·°F
@ Temperature 200 - 250 °C	@ Temperature 392 - 482 °F
0.553 J/g·°C	0.132 BTU/lb·°F
@ Temperature 250 - 300 °C	@ Temperature 482 - 572 °F
0.559 J/g·°C	0.133 BTU/lb·°F
@ Temperature 300 - 350 °C	@ Temperature 572 - 662 °F
0.662 J/g·°C	0.158 BTU/lb·°F
@ Temperature 450 - 500 °C	@ Temperature 842 - 932 °F
0.747 J/g·°C	0.178 BTU/lb·°F
@ Temperature 150 - 190 °C	@ Temperature 180 - 350 °F
0.846 J/g·°C	0.202 BTU/lb·°F
@ Temperature 850 - 900 °C	@ Temperature 1550 - 1650 °F
0.887 J/g·°C	0.207 BTU/lb·°F
@ Temperature 700 - 750 °C	@ Temperature 1290 - 1380 °F
1.105 J/g·°C	0.2641 BTU/lb·°F
@ Temperature 700 - 750 °C	@ Temperature 1290 - 1380 °F

## 6. Tabel Volume dan Luas Permukaan Sampel FeTiO<sub>3</sub>

- Silinder diameter 7 cm

Tinggi (cm)	Volume, $\pi r^2 L$ (m <sup>3</sup> )	Luas Permukaan, $2\pi r^2 + \pi r L$ (m <sup>2</sup> )
1.5	$5.77 \times 10^{-5}$	0.222
3	$11.545 \times 10^{-5}$	0.223
4.5	$17.32 \times 10^{-5}$	0.225
6	$23.09 \times 10^{-5}$	0.226

- Silinder diameter 10 cm

Tinggi (cm)	Volume, $\pi r^2 L$ (m <sup>3</sup> )	Luas Permukaan, $2\pi r^2 + \pi r L$ (m <sup>2</sup> )
1.5	$11.78 \times 10^{-5}$	0.316
3	$23.56 \times 10^{-5}$	0.319
4.5	$35.34 \times 10^{-5}$	0.321
6	$47.12 \times 10^{-5}$	0.324

- Balok bersisi 7 cm

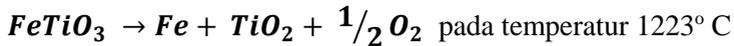
Tinggi (cm)	Volume, $s^2 b$ (m <sup>3</sup> )	Luas Permukaan, $(4sb+2s^2)$ (m <sup>2</sup> )
1.5	$7.35 \times 10^{-5}$	0.014
3	$14.7 \times 10^{-5}$	0.0182
4.5	$22.05 \times 10^{-5}$	0.0224
6	$29.4 \times 10^{-5}$	0.0266

- Balok bersisi 10 cm

Tinggi (cm)	Volume, $s^2 b$ (m <sup>3</sup> )	Luas Permukaan, $(4sb+2s^2)$ (m <sup>2</sup> )
1.5	$1.5 \times 10^{-4}$	0.026
3	$3 \times 10^{-4}$	0.032
4.5	$4.5 \times 10^{-4}$	0.038
6	$6 \times 10^{-4}$	0.044

## 7. Perhitungan Termodinamika Proses Pemanasan Ilmenite

Unsur/ Senyawa	$\Delta H^0$ (J/mol)	$\Delta S^0$ (J/mol)	$C_p$ (J/mol)
FeTiO <sub>3</sub>	151710,2	108,91	1,73094 – 5,2713 x 10 <sup>-4</sup> T + 2,2325 x 10 <sup>-17</sup> T <sup>2</sup> – 16,725 T <sup>-0.5</sup> + 2522 T <sup>-2</sup>
Fe	0	27,3	37,12 + 6,17 x 10 <sup>-3</sup> T
TiO <sub>2</sub>	-994000	50,29	75,19 + 1,17 x 10 <sup>-3</sup> T – 18,20 x 10 <sup>5</sup> T <sup>-2</sup>
O <sub>2</sub>	0	205	29,26 + 4,184 x 10 <sup>-3</sup> T – 1,67 x 10 <sup>5</sup> T <sup>-2</sup>



- $$\begin{aligned} \Delta H_{298} &= \Delta H_{Fe}^0 + \Delta H_{TiO_2}^0 + \Delta H_{O_2}^0 - \Delta H_{FeTiO_3}^0 \\ &= (-994000) + (-151710,2) \\ &= -1145710,2 \text{ J/mol} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} C_{p_{298-1223, Fe}} &= \int_{298}^{1223} [37,12 + 6,17 \times 10^{-3} T] dT \\ &= 37,12 T + \frac{6,17 \times 10^{-3}}{2} T^2 \Big|_{298}^{1223} \\ &= 37,12 (1223) + \frac{6,17 \times 10^{-3}}{2} (1223)^2 - 37,12 (298) - \\ &\quad \frac{6,17 \times 10^{-3}}{2} (298)^2 \\ &= 45397,76 + 4614,32 - 11061,76 - 273,96 \\ &= 38676,36 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

- $$\begin{aligned}
& \bullet \text{Cp}_{298-1223, \text{TiO}_2} \\
&= \int_{298}^{1223} [75,19 + 1,17 \times 10^{-3} T - 18,2 \times 10^5 T^{-2}] dT \\
&= 75,19 T + \frac{1,17 \times 10^{-3}}{2} T^2 + 18,2 \times 10^5 T^{-1} \Big|_{298}^{1223} \\
&= 91957,37 + 875 + 1488,14 - 22406,62 - 51,95 - \\
&6107,38 \\
&= 65754,56 \text{ J/mol}
\end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
& \bullet \text{Cp}_{298-1223, \text{O}_2} \\
&= \int_{298}^{1223} [29,26 + 4,184 \times 10^{-3} T - 1,67 \times 10^5 T^{-2}] dT \\
&= 29,26 T + \frac{4,184 \times 10^{-3}}{2} T^2 + 1,67 \times 10^5 T^{-1} \Big|_{298}^{1223} \\
&= 35784,98 + 3120,06 + 136,55 - 8719,48 - 185,78 - \\
&560,4 \\
&= 29575,93 \text{ J/mol}
\end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
& \bullet \text{Cp}_{298-1223, \text{FeTiO}_3} \\
&= \int_{298}^{1223} [1,73094 - 5,2713 \times 10^{-4} T + \\
&2,2325 \times 10^{-17} T^2 - 16,725 T^{-0,5} + 2522 T^{-2}] dT \\
&= 1,73094 T - \frac{5,2713 \times 10^{-4}}{2} T^2 + \frac{2,235 \times 10^{-17}}{3} T^3 - \\
&33,45 T^{0,5} - 2522 T^{-1} \Big|_{298}^{1223} \\
&= 2116,04 - 394,22 + 2,04 \times 10^{-8} - 1169,79 - 2,06 - \\
&515,82 + 23,4 - 1,97 \times 10^{-10} + 577,4365 + 8,463 \\
&= 643,4495 \text{ J/mol}
\end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
& \bullet \int_{298}^{1223} C_{p \text{tot}} dT = \text{Cp}_{298-1223, \text{TiO}_2} + \text{Cp}_{298-1223, \text{Fe}} + \\
&\quad \frac{1}{2} \text{Cp}_{298-1223, \text{O}_2} - \text{Cp}_{298-1223, \text{FeTiO}_3} \\
&= 65754,56 + 38676,36 + 14787,965 - \\
&643,4495 \\
&= 118575,4355 \text{ J/mol}
\end{aligned}$$

- $$\begin{aligned} \Delta H_{298-1223} &= \Delta H_{298} + \int_{298}^{1223} C_p dT \\ &= -1145710,2 + 118575,4355 \\ &= -1027134,765 \text{ J/mol} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \Delta S_{298} &= \Delta S_{\text{Fe}}^0 + \Delta S_{\text{TiO}_2}^0 + \frac{1}{2}\Delta S_{\text{O}_2}^0 - \Delta S_{\text{FeTiO}_3} \\ &= 27,3 + 50,29 + (0,5)(205) - 108,91 \\ &= 71,18 \text{ J/mol} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \frac{C_p}{T} \text{ }_{298-1223,Fe} &= \int_{298}^{1223} \left[ \frac{37,12}{T} + 6,17 \times 10^{-3} \right] dT \\ &= 37,12 \ln T + 6,17 \times 10^{-3} T \Big|_{298}^{1223} \\ &= 263,89 + 7,5459 - 211,47611 - 1,83866 \\ &= 58,12113 \text{ J/mol} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \frac{C_p}{T} \text{ }_{298-1223,TiO_2} &= \int_{298}^{1223} \left[ \frac{75,19}{T} + 1,17 \times 10^{-3} - 18,2 \times 10^{-5} T^{-3} \right] dT \\ &= 75,19 \ln T + 1,17 \times 10^{-3} T + 18,2 \times 10^{-5} T^{-2} \Big|_{298}^{1223} \\ &= 543,53 + 1,43 + 1,217 - 428,364 - 0,34866 - 20,49457 \\ &= 96,96977 \text{ J/mol} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \frac{C_p}{T} \text{ }_{298-1223,O_2} &= \int_{298}^{1223} \left[ \frac{29,26}{T} + 4,184 \times 10^{-3} - 1,67 \times 10^{-5} T^{-3} \right] dT \\ &= 29,26 \ln T + 4,184 \times 10^{-3} T + \frac{1}{2} \times 1,67 \times 10^{-5} T^{-2} \Big|_{298}^{1223} \\ &= 208,02 + 5,117 + 0,0558 - 166,697 - 1,2468 - 0,94 \\ &= 44,309 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

- $$\frac{C_p}{T} \int_{298}^{1223} \left[ \frac{1,73094}{T} - 5,2713 \times 10^{-4} + 2,2325 \times 10^{-17} T - 16,75 T^{-1.5} + 2522 T^{-3} \right] dT$$

$$= 1,73094 \ln T - 5,2713 \times 10^{-4} T + \frac{1}{2} \times 2,2325 \times 10^{-17} T^2 + 2 \times 16,725 T^{-0.5} - \frac{1}{2} \times 2522 T^{-2} \Big|_{298}^{1223}$$

$$= 12,305 - 0,64468 + 1,67 \times 10^{-11} + 0,956 - 8,43 \times 10^{-4} - 9,8613 + 0,157 - 9,9 \times 10^{-13} - 1,9377 + 0,014$$

$$= 0,987477 \text{ J/mol}$$
- $$\int_{298}^{1223} \frac{C_{p_{total}}}{T} dT = \frac{C_p}{T} \int_{298}^{1223, Fe} + \frac{C_p}{T} \int_{298}^{1223, TiO_2} + \frac{1}{2} \frac{C_p}{T} \int_{298}^{1223, O_2} - \frac{C_p}{T} \int_{298}^{1223, FeTiO_3}$$

$$= 58,12113 + 96,96977 + (0,5) 44,309 - 0,987477$$

$$= 176,258 \text{ J/mol}$$
- $$\Delta S_{298-1223} = \Delta S_{298} + \int_{298}^{1223} \frac{C_{p_{total}}}{T} dT$$

$$= 71,18 + 176,258$$

$$= 247,438 \text{ J/mol}$$
- $$\Delta G = \Delta H_{total} - T \cdot \Delta S_{total}$$

$$= -1027134,765 - (1223) 176,258$$

$$= -1242698,299 \text{ J/mol}$$

## 8. Pehitungan Error Dibandingkan Hasil Analitis

- Daging Sapi Silinder

Arah Aksial yang Sama	Error (%)	Standard Deviasi
0	0.025228635	0.056568542
2.50E-03	0.155666252	1.272792206
5.00E-03	0.188507145	0.438406204
6.25E-03	0.066525552	0.155563492
7.50E-03	0.188507145	0.438406204
1.00E-02	0.155666252	0.848528137
<b>Mean</b>	0.13001683	0.535044131

- Daging Salmon Balok

Arah Aksial yang sama	Error (%)	Standard Deviasi
0.00E+00	0.002657807	0.113137085
1.50E-03	0.012135069	0.487903679
3.00E-03	0.017329064	0.650538239
4.50E-03	0.018571429	0.735391052
6.00E-03	0.008600469	0.38890873
7.50E-03	0.01679049	0.799030663
9.00E-03	0.008600469	0.38890873
1.05E-02	0.018571429	0.735391052
1.20E-02	0.017329064	0.650538239
1.35E-02	0.012135069	0.487903679
1.50E-02	0.002657807	0.113137085
<b>Mean</b>	0.012307106	0.504617112

## 9. Hasil Pengujian Spektrometri pada Baja AISI 1006



BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI  
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA  
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI  
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA



Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax. (031) 8410480  
<http://baristandsurabaya.kemendin.go.id/>

Nomor Analisa : P 5048  
Jenis Sampel : Baja Karbon  
Ukuran : Tebal 1,4 mm, Lebar 20 mm, Panjang 57 mm

Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji		Metoda uji
		1	2	
Uji Komposisi Kimia :				
C	%	0,05251	0,04940	Cara uji Komposisi Kimia JIS G 1253 : 2002
Si	%	0,00782	0,00308	
Mn1	%	0,24859	0,24717	
P	%	0,01036	0,01108	
S	%	0,01045	0,01018	
Cu	%	0,01195	0,01231	
Ni1	%	0,01791	0,01800	
Cr1	%	0,05119	0,05143	
Mo	%	0,01216	0,01267	
Al	%	0,02050	0,02152	
Fe	%	99,556	99,563	

Catatan : 1 Sampel diuji sesuai permintaan  
2 Pengujian Komposisi menggunakan Alat Spectrometer

Surabaya, 06 Oktober 2015  
Penyelia Teknik  
Laboratorium Fisika  
Diumumkan  
NIP. 1956081019810310050

## 10. Perhitungan Kedalaman Penetrasi

- **Daging Sapi**

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\kappa'} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{\kappa''}{\kappa'}\right]^2}\right)^2} - 1 \right\}}}$$

$$D_p = \frac{3 \times 10^8 / 2,45 \times 10^9}{2\pi\sqrt{2(30,5)} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{9,6}{30,5}\right]^2}\right)^2} - 1 \right\}}}$$

$$D_p = 0,011345 \text{ m} = 1,1345 \text{ cm}$$

- **Daging Salmon**

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\kappa'} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{\kappa''}{\kappa'}\right]^2}\right)^2} - 1 \right\}}}$$

$$D_p = \frac{3 \times 10^8 / 2,45 \times 10^9}{2\pi\sqrt{2(51,2)} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{18,24}{51,2}\right]^2}\right)^2} - 1 \right\}}}$$

$$D_p = 0,00776 \text{ m} = 0,776 \text{ cm}$$

- **FeTiO<sub>3</sub>**

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\kappa'} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{\kappa''}{\kappa'}\right]^2}\right)^2} - 1 \right\}}}$$

$$D_p = \frac{3 \times 10^8 / 2,45 \times 10^9}{2\pi \sqrt{2(16,8)} \sqrt{\left\{ \sqrt{\left(1 + \left[\frac{8,6}{(16,8)}\right]^2}\right)^2} - 1 \right\}}}$$

$$D_p = 0,00957 \text{ m} = 0,957 \text{ cm}$$

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Ayah, Ibu, dan kakak – kakak tercinta; Ayah Sumarwi, Mama Lilik, Mbak Siska, Mas Ichwan, Mas Ade, dan Mbak Rere serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, materi, motivasi, dan inspirasi.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D. serta Ibu Dian Mughni Fellicia, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu serta saran kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
6. Ibu Amaliya Rasyida, ST., M.Sc. selaku dosen wali penulis yang selalu membina penulis selama menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
8. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
9. Sahabat penulis semasa kuliah, para single berprestasi yang terdiri dari Imbang, Ilham, Qory, Hana dan Fiqhi yang selalu memberikan semangat dan doa selama penulis menyelesaikan tugas akhir.

10. Teman – teman satu Laboratorium Material Inovasi, Afira, JD, Imbang, Arif, Asis dan Bathara yang membagi semangat dan canda tawa selama di dalam laboratorium.
11. Sahabat penulis semasa SMA, Para Calon Pemuda Sukses yang terdiri dari Risso, Tian, Indra, Chesa dan Baskoro yang selalu ada di saat penulis butuh bantuan dan masukan sekaligus teman jalan – jalan.
12. Geng Freunde yang terdiri dari Nana, Agnes, Dicky, Dila dan Baban yang saling menyemangati selama penulis menyelesaikan tugas akhir.
13. Mbak Miftakhur Rohmah dan Mbak Diana yang selalu menyediakan waktu ketika penulis membutuhkan pencerahan tentang topik tugas akhir yang dikerjakan.
14. Teman-teman MTC 15/16 yang selalu memberikan cerita dan pengalaman kepada penulis.
15. Teman – teman staff Keinformasian MTC 15/16 yaitu Etak, Adnan, Kaisar dan Qolby yang memberikan pelajaran sebagai pemimpin bagi penulis selama kurang lebih 1,5 tahun.
16. Grader Metalurgi 16/17 yang memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis.
17. Para Perjaka Beler yang terdiri dari Opik, Ical, Cimeng, Treshna, Leo, Megah, Affan, Fahny, Tara, Raka dan Reyhan yang selalu membagi canda tawa.
18. Mbambing dan Cimeng, yang sudah menemani penulis menjelajahi beberapa gunung di Indonesia.
19. Golda, Meidinar, Clara dan teman – teman Einblick lain yang memberikan semangat kepada penulis walaupun kita terpisah jauh satu sama lain.
20. Teman – teman lintas negara, Alex, Florian, dan Anton yang selalu khawatir dan perhatian ketika penulis merasa stress dalam belajar
21. Teman – teman MT 15 seperjuangan, MT 16 dan MT 17.
22. Dan seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

## BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Ferdiansyah Iqbal Rafandi lahir di Kota Surabaya pada tanggal 19 April 1995. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDI K. Ibrahim Surabaya, SMPN 22 Surabaya, dan SMAN 15 Surabaya. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh nopember Surabaya.

Semasa kuliah, penulis terdaftar aktif sebagai staff Divisi Keinformasian BSO MTC HMMT FTI – ITS 2014/2015 dan Kepala Divisi Keinformasian BSO MTC HMMT FTI-ITS 2015/2016. Selain itu penulis sempat aktif sebagai Asisten Praktikum Kimia Analitik, Metalurgi I dan II, serta Material Polimer di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi. Penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen mata kuliah Matematika Rekayasa dan Termodinamika Material.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT GMF AeroAsia pada bulan Januari 2016. Selama menjalani kerja praktek, penulis mendalami topik terkait perbaikan struktur sandwich komposit AA7075/AA5052 Honeycomb pada komponen Aft Flap sayap pesawat Garuda BOEING 737-800.

Selesainya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya.

*Email: Iqbal.mamet@gmail.com*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*