



---

SF-142502  
**PEMODELAN EKSPERIMEN PEMANASAN *CRUDE OIL*  
DENGAN DUAL SUMBER GELOMBANG MIKRO**

**NENY KURNIAWATI**  
NRP. 1114201013

**DOSEN PEMBIMBING**  
Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

**PROGRAM MAGISTER  
JURUSAN FISIKA  
BIDANG KEAHLIAN INSTRUMENTASI  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**



SF-142502  
**EKSPERIMENTAL MODELING OF CRUDE OIL  
HEATING USING DUAL MICROWAVE SOURCES**

**NENY KURNIAWATI**  
**NRP. 1114201013**

**SUPERVISOR**  
**Dr. Melania Suweni Muntini, MT.**

**MASTER PROGRAM**  
**DEPARTMENT OF PHYSICS**  
**INTRUMENTATION**  
**FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCE**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**2016**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:  
Neny Kurniawati  
NRP. 1114201013

Dengan judul :  
Pemodelan Eksperimen Pemanasan *Crude Oil*  
dengan Dual Sumber Gelombang Mikro

Tanggal Ujian : 27 Juni 2016  
Periode Wisuda : September 2016

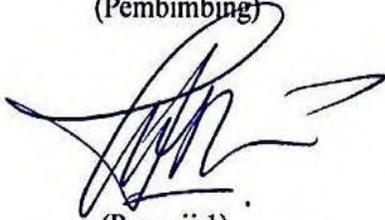
Disetujui oleh:

Dr. Melania Suweni Muntini, MT  
NIP. 19641229 19002 2 001



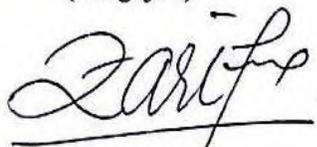
(Pembimbing)

Dr. Mashuri, S.Si, M.Si  
NIP. 19691216 199402 1 001



(Penguji 1)

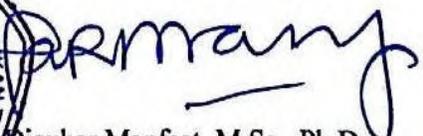
Dr. Zaenal Arifin, M.Si  
NIP. 19651105 199102 1 002



(Penguji 2)



Direktur Program Pasca Sarjana,



Prof. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 19602021987011001

## PEMODELAN EKSPERIMEN PEMANASAN *CRUDE OIL* DENGAN DUAL SUMBER GELOMBANG MIKRO

Nama Mahasiswa : Neny Kurniawati  
NRP : 1114201013  
Dosen Pembimbing : Dr. Melania Suweni Muntini, MT

### ABSTRAK

Metode pemanasan merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam industri pertambangan di dunia, namun kelemahannya adalah kehilangan panas selama distribusi kukus ke sumur injeksi dan masih menggunakan energi fosil untuk produksi panas, yang telah diketahui bahwa bahan bakar fosil merupakan sumber energi tak terbarukan dengan persediaan yang terbatas. Salah satu metode pemanasan alternatif dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang mikro. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan propagasi gelombang mikro dan transfer panas pada beberapa titik di sepanjang reservoir *crude oil*. Simulasi perambatan gelombang mikro dan perpindahan panas menggunakan metode FEM (*Finite Element Method*). Distribusi *crude oil* pada seluruh permukaan reservoir diasumsikan homogen sehingga hasil simulasi disajikan dalam bentuk dua dimensi. Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasi perpindahan panas pada *crude oil* dengan menggunakan dua sumber gelombang mikro. Pemanasan *crude oil* menggunakan magnetron sebagai generator dari gelombang mikro dengan frekuensi operasional 2,45 GHz. Gelombang mikro dipandu dalam sebuah pandu gelombang silinder. Pemodelan pemanasan *crude oil* dengan dual sumber gelombang mikro secara komputasi dapat disimulasikan dengan baik dengan metode FEM. Hasil simulasi pemanasan *crude oil* dengan dual sumber gelombang mikro menunjukkan model distribusi suhu dengan nilai error 0,91%.

Kata kunci: *crude oil*, *heat transfer*, FEM, propagasi gelombang mikro

# **EKSPERIMENTAL MODELING OF CRUDE OIL HEATING USING DUAL MICROWAVE SOURCES**

By : Neny Kurniawati  
NRP : 1114201013  
Supervisor : Dr. Melania Suweni Muntini, MT

## **ABSTRACK**

Heating method is the method most widely used in the mining industry in the world, but the disadvantage are heat loss during distribution of steamed to the well injection and still using fossil fuels for the production of heat, which is known that fossil fuels are not renewable energy with a limited inventory. Either alternative heating method can be done by using a microwave. This research aims to simulate the propagation of microwaves and heat transfer at several points trough the length reservoir of crude oil. Simulation of propagation of microwaves and heat transfer using FEM (Finite Element Method). The distribution of crude oil on the entire surface of the reservoir is assumed to be homogeneous so that the results of the simulation are presented in the form of two dimensions. This research will simulation of heat transfer. The heating of crude oil using the magnetron as a generator of microwave operating with frequency 2.45 GHz. Microwave guided wave in a cylinder. Crude oil heating models with dual sources of microwaves in computing can be simulated very well with methods of FEM. The results of the simulated crude oil heating with dual microwave sources showed the model of distribution of temperature with error 0.91%.

Key word: crude oil, microwave propagation, heat transfer, FEM.

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, maka penelitian “*Pemodelan Eksperimen Pemanasan Crude Oil Menggunakan Dual Sumber Gelombang Mikro*” ini dapat diselesaikan. Penelitian merupakan bagian dari tugas akademik di Fakultas MIPA, sebagai persyaratan untuk menyelesaikan program pendidikan Progran Magister di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar besarnya kepada :

1. Ayah dan ibu saya Pauzi Thalbah dan Rusmiati, kakak saya Puji Astuti beserta keluarga, dan adik saya Ahmad Ridhani, yang selalu mendo’akan dan memberi semangat.
2. Ibu Dr. Melania Suweni Muntini, MT, selaku pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan memberikan masukan untuk menyelesaikan masalah dalam proses penelitian, dan perkuliahan.
3. Semua dosen Jurusan Fisika ITS yang telah banyak memberikan ilmu dan pengalamannya.
4. Seluruh teman-teman Program Magister Fisika ITS, khususnya teman-teman team penelitian *Crude Oil* dan Laboratorium Instrumentasi dan Elektronika Fisika ITS, terimakasih untuk kerjasama dan bantuan kalian semua, tanpa kalian saya akan kesulitan untuk melangkah sampai titik ini.
5. Teman-teman berbagi suka duka di Rumah Binaan An-Nahdoh, NIK, ArRoyya, dan Al-Liwa, terimakasih atas do’a tulus kalian selama ini.
6. Semua pihak yang telah banyak membantu hingga selesai penulisan ini, semoga Allah membalas kalian dengan kebaikan.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan tesis ini.

Akhirnya penulis berharap semoga tesis ini bermanfaat dan berguna bagi kita semua. Amin

Surabaya, Juli 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1 <i>Crude oil</i> .....	5
2.2 Viskositas <i>Crude oil</i> .....	6
2.3 Gelombang Mikro .....	7
2.4 Pemanasan Gelombang Mikro .....	9
2.5 Aliran Panas dalam Pemanasan Gelombang Mikro .....	14
2.6 Pemancaran Gelombang Mikro dengan Multi Sumber .....	15
2.7 Sifat Dielektrik .....	17
2.8 Metode Pemodelan Komputasi .....	20
2.8.1 Finite Element Methods (FEM) .....	21
2.8.2 Validasi Menggunakan Metode Statistik .....	23
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	25
3.1 Studi Literatur .....	27
3.2 Metode Pemodelan .....	27
3.3 Penentuan Pemodelan .....	27
3.4 Langkah-langkah Pemodelan secara Numerik .....	29
3.5 Pembuatan Simulasi .....	30
3.6 Pengujian Model dan Analisis Error .....	30

3.7	Final Model .....	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....		33
4.1	Bentuk Penyelesaian Matematis.....	33
4.2	Hasil Simulasi Gelombang Mikro .....	36
4.3	Variasi Parameter Waktu.....	37
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....		45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran .....	45
DAFTAR PUSTAKA .....		47
LAMPIRAN 1 Perhitungan Persaman Heat Transfer menggunakan FEM .....		51
LAMPIRAN 2 Data Perubahan Suhu Rata-Rata .....		57
LAMPIRAN 3 Hasil Simulasi Heat Transer.....		61
LAMPIRAN 4 Data Perubahan Suhu Tiap Posisi .....		65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pengaruh suhu terhadap viskositas minyak .....	6
Gambar 2.2 Daerah frekuensi dan panjang gelombang dari gelombang mikro....	7
Gambar 2.3 Mode gelombang TE .....	12
Gambar 2.4 Mode Gelombang TM.....	13
Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian .....	26
Gambar 3.2 Bentuk Geometri 2D asimetrik Model.....	28
Gambar 3.3 Diagram Alir simulasi .....	31
Gambar 4.1 Model radiasi gelombang elektromagnetik .....	36
Gambar 4.2 Model Perambatan panas dan sebaran medan elektrik .....	37
Gambar 4.3 Hasil Simulasi pada Waktu 2400 s .....	38
Gambar 4.4 Hasil Simulasi pada Waktu 4800 s.....	39
Gambar 4.5 Titik pengambilan data perubahan suhu .....	40
Gambar 4.6 Plot pengukuran suhu pada posisi (0;0,6), (0;1), dan (0;2) .....	40
Gambar 4.7 Plot pengukuran suhu pada posisi (0;8), (0;9), dan (0;9,4) .....	41
Gambar 4.8 Suhu Rata-Rata.....	42

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Energi merupakan komponen penting yang tidak dapat dilepaskan dalam kelangsungan hidup manusia. Saat ini, hampir semua aktivitas kehidupan manusia sangat tergantung pada ketersediaan energi terutama sumber energi fosil yang dapat memenuhi kebutuhan energi manusia dalam skala yang besar. Begitu pula Indonesia mengandalkan energi fosil (minyak bumi dan batubara) dalam pemenuhan energi untuk menjalankan industri maupun untuk pemenuhan energi publik. Meskipun dewasa ini telah banyak bermunculan energi alternatif sebagai pengganti energi fosil namun ketergantungan terhadap energi fosil masih sangat tinggi. Ditambah, energi yang dihasilkan dihasilkan dari sumber energi alternatif masih sangat kecil, dan belum mampu menopang proses industri.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional dalam Bab II Pasal 2 Peraturan Pemerintah bahwa target konsumsi energi yang digunakan di Indonesia pada tahun 2025 antara lain: minyak bumi kurang dari 20%, gas bumi lebih dari 30%, batubara lebih dari 33%, biofuel lebih dari 5%, panas bumi lebih dari 5%, energi baru dan terbarukan lainnya, lebih dari 5%, bahan bakar lain yang berasal dari pencairan batubara lebih dari 2% (ESDM, Peraturan Presiden No.5 2006, 2006).

Data Kementrian ESDM menunjukkan bahwa dari tahun ke tahun produksi minyak Indonesia mengalami penurunan. Pada tahun 2005 produksi minyak mentah Indonesia mencapai 308.719.474 barel sedangkan pada tahun Agustus 2014 mengalami kemunduran menjadi 238.670.486,63 barel (ESDM, Produksi Minyak Bumi, 2014). Hal ini menyebabkan Indonesia harus melakukan impor minyak untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri. Salah satu penyebab merosotnya produksi minyak bumi Indonesia adalah semakin tuanya ladang-ladang minyak yang ada di Indonesia. Selain itu, diperparah karena tidak adanya penemuan cadangan minyak bumi baru dalam jumlah besar. Akibatnya, Indonesia

hanya mengeruk cadangan minyak bumi yang ada, sehingga dibutuhkan sebuah inovasi teknologi untuk meningkatkan produksi minyak bumi.

Produktivitas minyak tidak terlepas dari pemanasan minyak dalam sumur bor. Pengeboran minyak selama ini masih menggunakan metode konvensional, salah satunya adalah dengan metode *steam injection*. Minyak mentah (*crude oil*) diangkat dari dasar reservoir dengan mengalirkan uap panas ke dalam sumur minyak. Tujuannya adalah agar terjadi penurunan viskositas minyak sehingga memiliki mobilitas yang tinggi. Metode termal ini merupakan metode yang paling banyak digunakan di dunia, namun salah satu kelemahannya adalah kehilangan panas selama distribusi kukus ke sumur injeksi. Di Indonesia, penerapan metode telah dilaksanakan di beberapa lokasi penambangan minyak seperti di Riau, namun masih menggunakan minyak bumi sebagai bahan bakar untuk produksi uap (Dewita, Priambodo, & Ariyanto, 2013).

Salah satu alternatif untuk pemanasan *crude oil* dalam sumur bor adalah dengan menggunakan energi gelombang mikro. Metode pemanasan dengan gelombang mikro didasarkan pada radiasi antenna yang dipengaruhi oleh formasi geologi yang mampu mendistribusikan panas meliputi volume reservoir yang besar. Dalam proses pendistribusian panas memanfaatkan propagansi energi gelombang elektromagnetik yang melintasi medium (Bientinesia, et al., 2013).

Metode pemanasan *crude oil* dengan gelombang mikro memiliki beberapa keuntungan diantaranya; kekompakan peralatan (termasuk wilayah *off-shore*), memiliki efisiensi yang tinggi dalam proses menghasilkan energi radiasi, mengurangi kehilangan panas ketika melewati *overburden* (Bientinesia, et al., 2013). Keuntungan lainnya dari metode pemanasan gelombang mikro adalah proses transfer panas secara cepat, bersifat volumetrik, pemanasan yang selektif, kecepatan switching “on” dan “off”, dan bebas polusi terhadap lingkungan (Cherbański & Rudniak, 2013).

Suatu material yang diberikan gelombang mikro maka material tersebut akan menyerap energi gelombang mikro. Kemampuan dalam menyerap energi gelombang mikro pada suatu material bergantung dari sifat dielektrik yang dikenal dengan istilah *loss factordielectric* (M. Hill & J. Jennings, 1993).

Untuk memprediksi pemanfaatan gelombang mikro dalam memanaskan *crude oil* pada skala industri pengeboran maka diperlukan sebuah model transfer kalor pada pemanasan *crude oil* dalam sumur bor. Model pemanasan dengan gelombang mikro ini didasarkan pada sifat dielektrik. Sebuah penelitian terkait dengan memanfaatkan gelombang mikro melalui pemodelan pada bahan silika dan mika dilakukan Hil & Marchant, 1996. Untuk bahan fluida, Ratanadecho, dkk (2002) melakukan studi pemanasan gelombang mikro secara numerik dan eksperimen pada air murni dan air garam. Dengan bahan yang serupa, Salvi dkk (2010) meneliti pemodelan pemanasan gelombang mikro untuk kasus aliran kontinyu, dan untuk bahan *oil palm kernels* telah dilakukan oleh Law dkk (2016).

Untuk Bahan *crude oil*, penelitian terkait dilakukan Muntini dkk dengan sumber gelombang mikro yang diletakkan di permukaan sumur bor. Pada peneliiian ini dengan menggunakan pandu gelombang berbentuk silinder telah diperoleh hasil suatu model transfer kalor pada pemanasan *crude oil* yang didasarkan pada sifat dielektrik menggunakan bentuk linear. Namun berdasarkan konsep *depth penetration* ( $D_p$ ), energi yang mencapai *crude oil* berkurang sampai  $\frac{1}{e}$  atau hanya tersisa 36,8% (Muntini, Pramono, & Yustiana, 2014).

Penelitian lainnya dilakukan oleh Ummu Kalsum (2014) dengan sumber gelombang mikro diletakkan di dasar reservoir. Hasil simulasi yang diperoleh dari perambatan panas dan gelombang mikro dengan metode FDTD adalah model distribusi suhu dengan bentuk matematis  $T(t) = 0,2262e(0,0101t)$  pada setiap variasi waktu dan  $T(r) = 531,24e(-0,03r)$  untuk variasi koordinat posisi, hanya saja *crude oil* yang digunakan tidak dikarakterisasi

Dalam penelitian ini, peneliti akan mengkaji pemanasan dengan model transfer kalor pada bahan *crude oil* dengan menggunakan sumber gelombang mikro yang diletakkan pada dua titik di reservoir.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah model perpindahan panas pada *crude oil* dengan sumber gelombang mikro di dua titik sumur bor secara komputasi?
2. Bagaimanakah distribusi medan listrik total pada pemanasan *crude oil* dengan sumber gelombang mikro di dua titik sumur bor?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan permasalahan pada penelitian ini adalah:

1. Pandu gelombang yang digunakan berbentuk silinder dengan parameter terdiri atas diameter 4 inchi atau 10.16 cm dan panjang silinder 0,5 m.
2. Suhu pemanasan pada bagian proses *steam injection* beroperasi antara 27 °C sampai 400°C.
3. Tranfer panas diasumsikan hanya terjadi antara udara dan fluida.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Membuat pemodelan perpindahan panas pada *crude oil* dengan sumber gelombang mikro di sumur bor secara komputasi, dengan data real dari hasil karakterisasi.
2. Menentukan distribusi medan listrik total pada pemanasan *crude oil* dengan sumber gelombang mikro di sumur bor.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan pengetahuan tentang pemodelan perpindahan panas pada *crude oil* dengan sumber gelombang mikro di sumur bor secara komputasi dan menentukan distribusi medan listrik total di dasar sumur bor. Diharapkan dengan mengetahui model dan simulasi pemanasan *crude oil* dengan gelombang mikro maka dapat diaplikasikan pada skala industri pengeboran kilang minyak.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 *Crude oil***

*Crude oil* atau yang biasa disebut minyak mentah adalah campuran berbagai hidrokarbon yang terdapat dalam bentuk fase cair. Pada keadaan ini *crude oil* berada dalam reservoir di bawah permukaan tanah dan tetap cair pada tekanan atmosfer setelah melalui fasilitas pemisah di atas permukaan.

Komposisi minyak bumi terdiri atas :

- a. Karbon: 83.0 – 87 %
- b. Hidrogen: 10.0 – 14.0 %
- c. Nitrogen : 0.1 – 2.0 %
- d. Oksigen: 0.05 – 1.5 %
- e. Sulfur: 0.05 – 6.0 %
- f. Logam (Ni dan V): < 1000 ppm

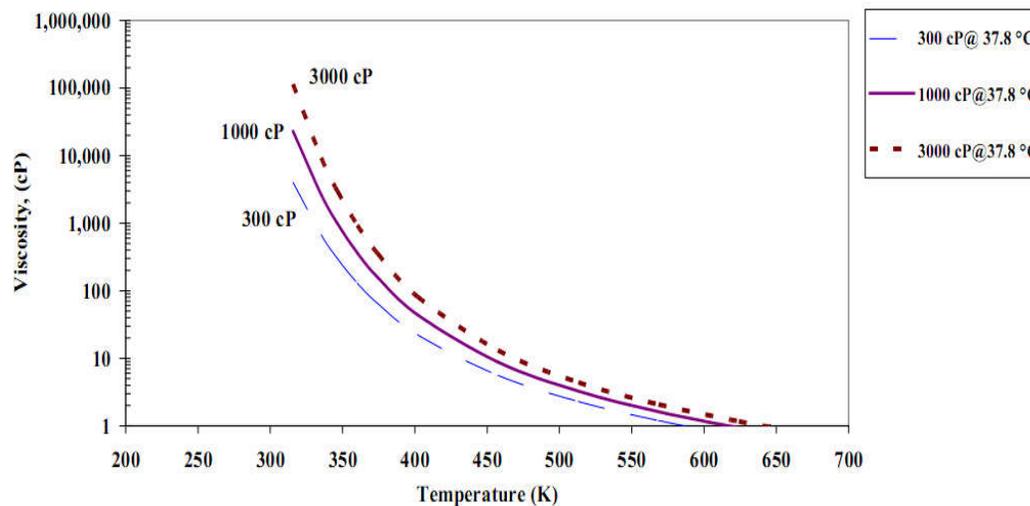
(Spight, 2001).

Secara umum minyak bumi terdiri dari campuran kompleks dari berbagai hidrokarbon, sebagian besar seri alkana, tetapi bervariasi dalam penampilan, komposisi, dan kemurniannya dan beberapa komponen non-hidrokarbon. Senyawa hidrokarbon merupakan senyawa organik yang hanya memiliki unsur karbon dan hidrogen pada setiap molekulnya. Dalam minyak bumi senyawa hidrokarbon terdiri atas hidrokarbon parafin, naftan, aromatik, monoolefin dan diolefin. Senyawa-senyawa ini memiliki susunan rantai karbon dan titik didih yang berbeda-beda. Sedangkan senyawa non-hidrokarbon dalam minyak bumi merupakan senyawa organik terdiri atas atom unsur belerang, oksigen, nitrogen dan logam-logam khusus misalnya nikel, besi, tembaga dan vanadium yang jumlahnya relatif sedikit. Umumnya senyawa non-hidrokarbon dianggap sebagai pengotor karena dapat menyebabkan terjadinya korosi, peracunan katalis, dan penurunan kualitas minyak bumi selama proses pengolahan minyak bumi (Hutagaol, 2009).

## 2.2 Viskositas *Crude oil*

Istilah Viskositas digunakan dalam deskripsi aliran fluida untuk mengkarakterisasi tingkat gesekan internal dalam cairan. Gesekan internal ini, atau kekentalan, dikaitkan dengan resistensi dua lapisan cairan yang berdekatan akan bergerak relatif terhadap satu sama lain. Viskositas menyebabkan bagian dari energi kinetik cairan dikonversi ke energi internal. Mekanisme ini mirip dengan obyek yang meluncur pada permukaan horizontal kasar akan kehilangan energi kinetik (Halliday, Resnick, & Walker, 2008).

Sebuah studi tentang pengaruh suhu terhadap viskositas minyak yang dilakukan oleh Barillas et. Al (2008). Dari tiga jenis viskositas minyak yang berbeda yakni 3000 Cp, 1000 Cp dan 300 Cp dengan kondisi suhu awal 37.8°C diperoleh kurva penurunan nilai viskositas minyak setelah suhu minyak dinaikkan.

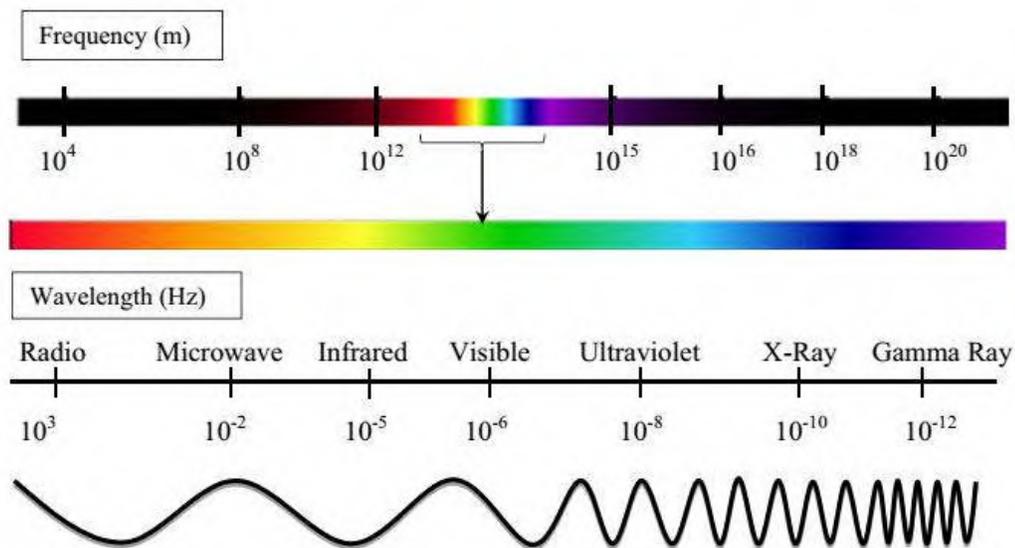


Gambar 2. 1 Pengaruh suhu terhadap viskositas minyak

Selain itu, penelitian tentang reduksi viskositas minyak lainnya dilakukan oleh Sahni et, al (2000) dengan viskositas awal 33.1 Cp pada suhu 100°F (-123°C). Setelah dipanaskan dengan menggunakan gelombang mikro hingga mencapai suhu 600°F (317°C) diperoleh viskositas akhir sebesar 0.193 Cp. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu pada suatu fluida termasuk *crude oil* maka menyebabkan terjadinya penurunan nilai viskositas pada fluida tersebut.

### 2.3 Gelombang Mikro

Gelombang mikro (*microwave*) adalah gelombang elektromagnetik dengan frekuensi super tinggi (*Super High Frequency*, SHF), yaitu di atas 3 GHz ( $3 \times 10^9$  Hz). Jika gelombang mikro diserap oleh sebuah benda, akan muncul efek pemanasan pada benda tersebut. Rentang frekuensi gelombang mikro adalah 1.12 – 40 GHz dan panjang gelombang sekitar 1 mm sampai 1 m (gambar 2.1) (Sajjadi, 2014).



Gambar 2.2 Daerah frekuensi dan panjang gelombang dari gelombang mikro

Dalam spektrum radiasi gelombang elektromagnetik, gelombang mikro terletak dalam daerah radiasi antara gelombang radio dan gelombang *infrared*. Pita gelombang mikro dibagi dalam 12 daerah pita dengan rentang frekuensi sebagaimana ditunjukkan dalam tabel 2.1 (Hund, 1989). Gelombang mikro dihasilkan dari resonansi elektron pada frekuensi tinggi. Secara umum, perangkat yang digunakan sebagai sumber osilasi penghasil gelombang mikro adalah *magnetron*. Sebuah *magnetron* mengkombinasikan medan listrik dan medan magnet yang tegak lurus terhadap satu sama lain. Medan listrik terbentuk antara katoda dalam dan anoda luar dengan perbedaan besar potensial antara keduanya, Sedangkan medan magnet dihasilkan dari magnet permanen yang biasa terletak di dasar *magnetron*. Elektron pada daerah ini bergerak dari katoda dalam suatu bagian terluar spiral menuju anoda. Selama elektron muncul dari resonansi wadah

maka elektron akan melepaskan energi. Energi ini dihasilkan melalui sebuah antena yang secara khusus digunakan pada suatu rongga melalui pandu gelombang (Mutyala, et.al, 2010)

Tabel 2.1 Band gelombang mikro dalam rentang frekuensi

<b>Band (pita)</b>	<b>Rentang frekuensi (GHz)</b>
HF	0.003-0.030
VHF	0.030-0.300
UHF	0.300-1.00
L	1.00-2.00
S	2.00-4.00
C	4.00-8.00
X	8.00-12.00
K <sub>u</sub>	12.0-18.0
K	18.0-27.0
K <sub>a</sub>	27.0-40.0
Millimeter	40.0-300.0
Submillimeter	Lebih dari 300

Pada dasarnya, energi gelombang mikro berasal dari interaksi molekul terhadap medan elektromagnetik yang dihantarkan secara langsung dalam bahan. Energi ini merupakan radiasi non-ionik yang menyebabkan pergerakan molekul melalui migrasi ion dan rotasi dipol, namun tidak mengubah struktur molekul dan rentang panjang gelombang. Karena Gelombang mikro dapat menembus bahan dan menyimpan energi maka panas yang dihasilkan meliputi seluruh volume bahan. Dalam transfer panas dari gelombang mikro tidak bergantung pada proses difusi panas dengan permukaan bahan sehingga memungkinkan untuk terjadi secara cepat dan pemanasan yang bersifat seragam dari lapisan bahan (Nour, Yunus, & Nour, 2010).

Pemanasan gelombang mikro bersifat selektif. Artinya molekul non-polar yang lembab dalam medan listrik gelombang mikro jika memiliki konstanta

dielektrik yang tinggi berat molekul yang rendah dapat secara selektif menyerap energi gelombang mikro (Sajjadi, 2014).

Pada penelitian ini magnetron yang digunakan sebagai dasar model pemancaran adalah generator gelombang mikro MICRO DENSHI UM-1500 1.5 kW, dengan spesifikasi sebagai berikut:

P/N	: UM-1500-IS-B
Power Supply for Anode	: High Voltage Circuits with Switch-Mode
Magnetron	: H3181
Frequency	: 2455MHz ± 15MHz
Microwave Output	: 0.1~1.5kW
Adaptable Waveguide	: WRI-22 (WRJ-2) (IEC: R22 ; EIA: WR430)
Adaptable Flange	: FUDR22 (BRJ-2) (IEC: UDR22 ; EIA: UG1716/U)
Cooling Methods	: Power Supply Unit: Forced Air Oscillation Unit: Forced Air
Dimensions	: Power Supply Unit: 480(W) x 510(D) x 150(H) mm
Oscillation Unit	: 316(W) x 267(D) x 230(H) mm
Weight	: Power Supply Unit: approx. 15kg Oscillation Unit: approx. 11kg
Commercial Power	: 3φAC200V 50/60Hz 8A

(Micro Denshi Co., 2010)

Karakteristik di atas akan digunakan sebagai acuan sumber gelombang mikro yang dibangkitkan untuk pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini. Salah satu karakter yang dipakai untuk pemodelan, yaitu daya output dan frekuensi.

## 2.4 Pemanasan Gelombang Mikro

Proses pemanasan melalui gelombang mikro berhasil menggambarkan fenomena pemanasan pada lapisan cairan yang didasarkan pada persamaan Maxwell.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.4)$$

Keterangan:

$E$  = medan listrik (N/C)

$H$  = medan magnetik (Vs/m)

$\mu$  = permeabilitas magnet (H/m)

$\varepsilon$  = permitivitas listrik (F/m)

$q$  = muatan listrik (C)

$\sigma$  = konduktivitas listrik ( $\Omega^{-1}$ )

Fluks daya dari propagasi gelombang mikro adalah

$$S = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad (2.5)$$

dimana  $S$  menyatakan vektor energi yang dibawa oleh gelombang mikro,  $H^*$  merupakan konjuget dari medan magnet.

Teorema pointing sebagai evaluasi dari daya input gelombang mikro sebagai berikut,

$$P_{in} = \int S \, dA = \frac{A}{4Z_H} E_{in}^2 \quad (2.6)$$

Keterangan:

$P_{in}$  = daya input (W)

$E_{in}$  = nilai intensitas medan listrik input (N/C)

$Z_H$  = impedansi gelombang ( $\Omega$ )

$A$  = luas bidang ( $m^2$ )

(Ratanadecho, Aoki, & Akahori, 2002).

Untuk merambatkan energi gelombang mikro maka dibutuhkan sebuah pandu gelombang. Pandu gelombang adalah alat yang digunakan untuk menyalurkan energi elektromagnetik dengan perantara gelombang elektromagnetik dalam suatu pipa konduktor. Pipa konduktor ini biasanya berisi udara, dielektrik ataupun dalam kondisi vakum.

Pada Gelombang mikro dengan pandu gelombang silindrik memiliki persamaan maxwell,

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega H \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -i\mu\epsilon\omega\vec{E} \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.10)$$

Pandu gelombang silinder berisi suatu bahan dengan permitivitas bahan  $\epsilon$  dan permeabilitas  $\mu$  sehingga besar medan listrik dan medan magnet yang memenuhi,

$$(\nabla^2 + \mu\epsilon\omega^2)E = 0 \quad (2.11)$$

$$(\nabla^2 + \mu\epsilon\omega^2)B = 0 \quad (2.12)$$

Karena geometri silinder yang digunakan pada luaran tunggal variasi spasial dari medan dalam arah sumbu-z dengan asumsi,

$$E(x, y, z, t) = E(x, y)e^{\pm ikz - i\omega t} \quad (2.13)$$

$$H(x, y, z, t) = H(x, y)e^{\pm ikz - i\omega t} \quad (2.14)$$

Keterangan:

$k$  = bilangan gelombang

$z$  = arah propagansi gelombang

$t$  = waktu perambatan gelombang (s)

$\omega$  = frekuensi angular dari gelombang (rad/s)

(Jackson, 1999).

Persamaan Helmholtz pada koordinat silinder

$$\nabla^2 E = -\left(\frac{\omega}{v}\right)^2 E(\vec{r}) \quad (2.15)$$

$$\nabla^2 H(\vec{r}) = -\left(\frac{\omega}{v}\right)^2 H(\vec{r}) \quad (2.16)$$

untuk  $k = \frac{\omega}{v}$  dengan  $v$  sebagai kecepatan gelombang maka jika mengacu pada komponen koordinat silinder diperoleh bentuk umum diferensial gelombang

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -k^2 \psi \quad (2.17)$$

Melalui metode *separasi* variabel maka bentuk umum fungsi  $\psi(r, \phi, z)$  dengan

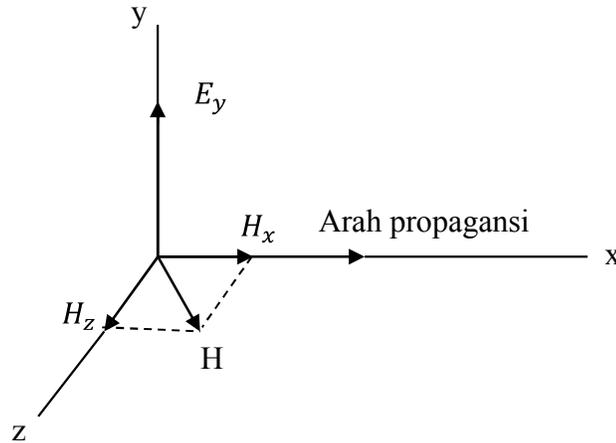
$$\psi(r, \phi, z) = R(r)\Phi(\phi)Z(z) \quad (2.18)$$

maka solusi persamaan gelombang pada pandu gelombang

$$\psi = \psi_0 \cos n\phi J_n(k_e r) e^{-j\beta_g z} \quad (2.19)$$

dengan  $J_n(k_e r)$  merupakan fungsi Bessel,  $\beta_g$  adalah konstanta propagansi.

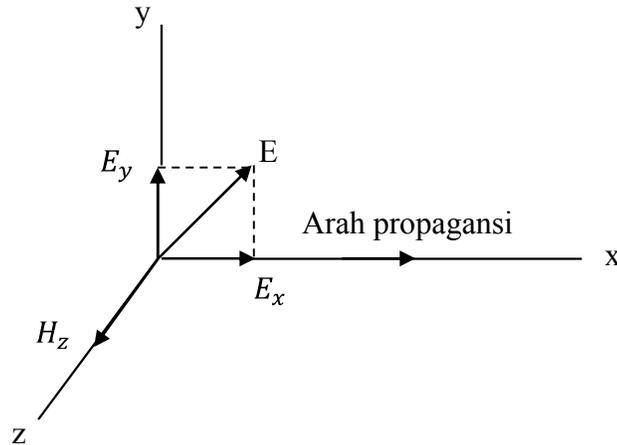
Pada pandu gelombang silindrik, mode pandu gelombangnya terdiri atas *tranverse electric* (TE) dan *tranverse magnetic* (TM). *Tranverse electric* (TE) adalah gelombang yang medan listriknya tegak lurus terhadap arah propagansi gelombang. Dalam hal ini medan magnet untuk TE memiliki komponen pada sumbu x dan z terhadap medan listrik, seperti ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mode gelombang TE

Sedangkan *Tranverse magnetic* (TM) adalah gelombang yang medan magnetnya tegak lurus terhadap arah propagansi gelombang. Dalam hal ini medan listrik untuk TM memiliki komponen pada sumbu x dan y terhadap medan listrik, seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.

Variasi nilai dari mode TE dan TM maka dinyatakan dalam bentuk  $TE_{m,n}$  dan  $TM_{m,n}$ . Suku  $m$  menyatakan jumlah gelombang penuh di sekitar keliling lingkaran dalam dari pandu (komponen radial medan listrik). Sedangkan suku  $n$  menyatakan jumlah setengah panjang gelombang yang melintasi diameter dalam dari pandu gelombang (Hund, 1989).



Gambar 2. 4 Mode Gelombang TM

Dengan demikian solusi medan listrik dan medan magnet pada mode TE ( $E_z = 0, H_z \neq 0$ ) dan mode TM ( $E_z \neq 0, H_z = 0$ ) didasarkan pada fungsi Bessel menjadi

$$E_z = E_{oz} \cos n\phi J_n(k_e r) e^{-j\beta_g z} \quad (2.20)$$

$$H_z = H_{oz} \cos n\phi J_n(k_e r) e^{-j\beta_g z} \quad (2.21)$$

Pada modus TM (a) dan TE (b) masing-masing konstanta propagansi  $\beta_g$  adalah

$$\beta_g = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{x_{np}}{a}\right)^2} \quad (2.22)$$

$$\beta_g = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{x'_{np}}{a}\right)^2} \quad (2.23)$$

dengan  $x_{np}$  dan  $x'_{np}$  adalah pembuat nol fungsi Bessel, dan  $a$  adalah jari-jari pandu gelombang. Pembuat nol fungsi untuk PD Bessel ditampilkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Bessel Roots

Mode TE		Mode TM	
$x'_{01}$	3.821	$x_{01}$	2.405
$x'_{11}$	1.841	$x_{11}$	3.832
$x'_{21}$	3.054	$x_{22}$	5.136
$x'_{31}$	4.201	$x_{02}$	5.520
$x'_{02}$	7.016	$x_{12}$	7.016

$x'_{12}$	5.332	$x_{03}$	8.654
$x'_{22}$	6.706		
$x'_{32}$	8.031		

(Hund, 1989)

## 2.5 Aliran Panas dalam Pemanasan Gelombang Mikro

Pemanasan dengan menggunakan gelombang mikro pada prinsipnya adalah membangkitkan panas dari bahan tersebut. Pemanasan menggunakan gelombang mikro bersifat selektif yang artinya besarnya energi panas, bergantung dengan dielektrik properties bahan, sehingga pemanasan yang dihasilkan lebih efektif dan hemat daya.

Mekanisme pemanasan gelombang mikro melibatkan proses agitas molekul polar yang menyebabkan terjadinya osilasi medan listrik. Osilasi medan ini mengakibatkan dipol molekul berorientasi dalam fase yang sesuai dengan medan bolak-balik. Orientasi tersebut dibatasi oleh gaya interaksi molekul dan meningkatkan energi kinetik molekul. Jika energi kinetik meningkat maka temperatur sistem pun meningkat dalam waktu yang singkat. Periode waktu ini bergantung pada sifat kelistrikan dan fisikal dari bahan yang dipanasi (Farang, et.al, 2012)

Persamaan aliran panas pada suatu fluida menyatakan distribusi suhu setiap satuan waktu sebagai akibat dari pemanasan dengan gelombang mikro. Besarnya distribusi suhu ini dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\nabla T = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (2.24)$$

Keterangan:

$\rho$  = densitas bahan (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = kalor jenis (J/kg.K)

$k$  = konduktivitas kalor (W/mk),

$T$  = temperatur (K)

$v$  = kecepatan fluida (m/s),

$Q$  = kalor volumetrik sebagai akibat gelombang datang (W/m<sup>3</sup>)

(Salvi, et.al, 2010).

Besarnya kalor akibat paparan gelombang mikro bergantung pada sifat dielektrik cairan dan intensitas medan listrik dinyatakan dengan persamaan,

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' (\tan \delta) |E|^2 \quad (2.25)$$

dimana  $\varepsilon_0$  adalah permitivitas bahan di udara,  $\varepsilon'$  adalah konstanta dielektrik cairan  $f$  adalah frekuensi,  $|E|^2$  adalah amplitudo medan listrik dan  $\tan \delta$  adalah loss tangensial yang menyatakan dimensi pengurangan dielektrik bahan yang didefinisikan sebagai,

$$(\tan \delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.26)$$

dengan  $\varepsilon''$  menyatakan efektivitas faktor loss. Dalam hal ini,  $\varepsilon''$  sebagai indikator kemampuan bahan untuk mengkonversi energi gelombang mikro menjadi panas. Konstantas dielektrik  $\varepsilon'$  menyatakan karakteristik penetrasi energi gelombang mikro pada bahan. Baik  $\varepsilon''$  maupun  $\varepsilon'$ , keduanya bergantung pada frekuensi dan temperatur bahan,  $\tan \delta$  merupakan indikator yang menyatakan kemampuan suatu bahan untuk menyerap energi gelombang mikro (Salvi, et.al, 2010).

## 2.6 Pemancaran Gelombang Mikro dengan Multi Sumber

Gelombang mikro merupakan gelombang elektromagnetik, sehingga dalam sifatnya gelombang mikro bertindak sebagaimana gelombang elektromagnetik lainnya. Ketika terdapat dua buah atau lebih gelombang dipancarkan secara bersamaan maka gelombang mikro akan mengalami suatu peristiwa yang disebut interferensi gelombang. Interferensi adalah interaksi antar gelombang di dalam suatu daerah. Interferensi dapat bersifat membangun dan merusak. Bersifat membangun jika beda fase kedua gelombang sama dengan nol, sehingga gelombang baru yang terbentuk adalah penjumlahan dari kedua gelombang tersebut. Bersifat merusak jika beda fasenya adalah 180 derajat, sehingga kedua gelombang saling menghilangkan.

Energi gelombang sebanding dengan pangkat dua amplitudo gelombang. Oleh karena itu, ketika gelombang materi identik dalam keadaan koherensi, gelombang yang dihasilkan memiliki amplitudo ganda dan energi kuadrupol.

Secara matematis intensitas energi elektromagnetik dirumuskan sebagai,

$$I = \langle |S| \rangle = \frac{1}{Z} \langle |E|^2 \rangle \quad (2.27)$$

dengan,

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

dimana  $\vec{S}$  adalah poynting vektor,  $\vec{E}$  energi listrik,  $\vec{B}$  medan magnetik, dan  $I$  adalah intensitas gelombang.

Jika terdapat dua gelombang berada pada satu medium maka akan terjadi interferensi, sehingga:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{Z} \langle E_1 + E_2 \rangle \\ I &= \frac{1}{Z} \langle E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \rangle \\ I &= \frac{1}{Z} (I_1 + I_2 + 2\langle E_1E_2 \rangle) \\ I &= \frac{1}{Z} (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \langle \cos \Delta\varphi \rangle) \end{aligned} \quad (2.28)$$

dengan  $\Delta\varphi$  adalah perbedaan phase antara dua gelombang. Apabila  $\langle \cos \Delta\varphi \rangle > 0$ , maka interferensi gelombang tersebut adalah interferensi yang konstruktif, sedangkan apabila  $\langle \cos \Delta\varphi \rangle < 0$  maka interferensi yang terbentuk adalah interferensi yang destructive atau dengan kata lain kedua gelombang akan saling menghilangkan (Halliday, Resnick, & Walker, 2008).

Vektor persamaan gelombang mikro didapatkan dari persamaan Maxwell, yaitu

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - \mu_r \delta_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (2.29)$$

dimana  $\epsilon_r$  adalah pemetivitas relatif dielektrik,  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vacum,  $\sigma$  adalah konduktivitas,  $\mu_0$  adalah permebealitas vacum,  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif,  $\omega$  adalah frekuensi angular dan  $\vec{E}$  adalah medan elektrik.

Berdasarkan teori superposisi medan elektrik, total radiasi sumber  $\vec{E}(z, r, \phi)$  adalah jumlah vektor medan elektrik yang dihasilkan tiap pemancar, yaitu

$$\vec{E}(z, r, \phi) = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(z, r, \phi) \quad (2.30)$$

$$|\vec{E}(z, r, \phi)| = |\vec{E}_i(z, r, \phi)| \cdot \left| \frac{\sin \frac{N}{2} \psi}{\sin \frac{\psi}{2}} \right| \quad (2.31)$$

Dimana  $\vec{E}_i(z, r, \phi)$  adalah medan elektrik pada setiap pemancar gelombang mikro,  $(z, r, \phi)$  adalah komponen pada koordinat silinder, dan  $\psi$  adalah perbedaan phase medan elektrik (Wang, Zhao, & Qiu, 2015).

## 2.7 Sifat Dielektrik

Dielektrik adalah sejenis bahan isolator yang dapat dikutubkan dengan cara menempatkannya dalam medan listrik. Ketika bahan ini berada dalam medan listrik, muatan listrik yang terkandung di dalamnya tidak akan mengalir, sehingga tidak timbul arus seperti bahan konduktor, tapi hanya sedikit bergeser dari posisi setimbangnya mengakibatkan terciptanya pengutuban dielektrik. Karena adanya pengutuban dielektrik, muatan positif bergerak menuju kutub negatif medan listrik, sedang muatan negatif bergerak pada arah berlawanan. Hal ini menimbulkan medan listrik internal di dalam bahan dielektrik yang menyebabkan jumlah keseluruhan medan listrik yang melingkupi bahan dielektrik menurun. Istilah dielektrik biasanya digunakan untuk bahan-bahan isolator yang memiliki tingkat kemampuan pengutuban tinggi yang besarnya diwakili oleh konstanta dielektrik (Dielectric-Physics, 2016).

Dalam permasalahan pemanasan gelombang mikro, sifat dielektrik bahan memegang peranan penting dalam memprediksi suatu teori. Suatu evaluasi yang akurat dari medan elektromagnetik ditentukan oleh adanya daya disipasi gelombang mikro dalam bahan dielektrik. Daya disipasi menyatakan besarnya daya gelombang mikro yang diserap oleh bahan dielektrik. Temperatur akan menghasilkan perubahan dalam sifat dielektrik. Selain itu, sifat dielektrik ini akan berpengaruh pada energi disipasi dengan efek variasi dari distribusi suhu.

Pada air murni besar dielektrik didefinisikan melalui persamaan Debye,

$$\epsilon_{rw} = \epsilon_{rwh} + \frac{\epsilon_{rwl} - \epsilon_{rwh}}{1 + \omega^2 \tau_w^2} \quad (2.32)$$

$$\tan \delta_w = \frac{(\varepsilon_{rWL} - \varepsilon_{rWH})\omega\tau_w}{\varepsilon_{rWL} + \varepsilon_{rWH}\omega^2\tau_w^2} \quad (2.33)$$

dimana  $\varepsilon_{rWH}$  adalah batas frekuensi tinggi  $\varepsilon_{rW}$  (tidak berdimensi),  $\varepsilon_{rWL}$  adalah konstanta dielektrik statis air murni (tidak berdimensi),  $\tau_w$  adalah waktu relaksasi air murni (s) dan  $\omega$  adalah frekuensi sudut (rad/s) (Ratanadecho, Aoki, & Akahori, 2002).

Pada emulsi minyak-air besar dielektrik yang diperoleh dari hasil eksperimen Fricke dinyatakan dengan,

$$\kappa^* = \kappa_C^* \frac{\kappa_D^*(1 + a\phi) + \kappa_C^*a(1 - \phi)}{\kappa_C^*(a + \phi) + \kappa_D^*(1 - \phi)} \quad (2.34)$$

dimana  $\kappa_C^*$  adalah relatif kompleks conjugate sifat dielektrik pada fase kontinu dan  $\kappa_D^*$  adalah relatif kompleks conjugate sifat dielektrik pada fase disperse,  $\phi$  adalah volume fraksi fase disperse, dan  $a$  adalah dispersi (untuk disperse bola,  $a = 2$  dan untuk disperse silinder,  $a = 1$ ). Berdasarkan hasil observasi eksperimen untuk  $a = 1$  maka sifat dielektrik dari emulsi minyak-air yang diperoleh Lichtenecker dan Rother dinyatakan,

$$\ln \kappa^* = \phi \ln \kappa_D^* + (1 - \phi) \ln \kappa_C^* \quad (2.35)$$

(Basak, 2004)

Pada *crude oil* faktor *loss* dielektrik dinyatakan dengan persamaan,

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2.36)$$

dimana  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik bahan,  $f$  adalah frekuensi, dan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas listrik di ruang hampa (Abdulrahman & Meribout, 2014).

Persamaan gerak dari muatan elektron  $e$  yang dibatasi oleh gaya harmonik dan ditunjukkan melalui medan listrik  $E(x,t)$  adalah,

$$m[\ddot{x} + \gamma\dot{x} + \omega_0^2 x] = -eE(x,t) \quad (2.37)$$

dimana  $\gamma$  mengukur fenomena gaya redaman dan  $\omega_0$  adalah frekuensi resonansi dasar. Dalam hal ini, pengaruh gaya magnet diabaikan. Jika medan divariasikan secara harmonik dalam waktu dengan frekuensi  $\omega$  sebagai  $e^{-i\omega t}$ , maka momen dipol yang terjadi untuk sebuah muatan elektron  $e$  adalah,

$$p = -ex = \frac{e^2}{m}(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)E \quad (2.38)$$

Jika  $N$  adalah jumlah molekul tiap satuan volume dengan  $Z$  adalah elektron tiap molekul dan sebagai gantinya dari frekuensi ikatan tunggal untuk semua. Konstanta dielektrik,

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + X_c \quad (2.39)$$

dan konstanta dielektrik dengan frekuensi ikatan  $\omega_j$  dan konstantas redaman  $\gamma_j$  adalah,

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \sum f_i (\omega_j^2 + \omega^2 + i\omega\gamma_i)^{-1} \quad (2.40)$$

Secara umum konstanta redaman  $\gamma_i$  lebih kecil dibandingkan frekuensi resonansi  $\omega_j$ . Hal ini berarti bahwa  $\epsilon(\omega)$  merupakan pendekatan real untuk sebagian besar frekuensi. Faktor  $(\omega_j^2 - \omega^2)^{-1}$  adalah positif untuk  $\omega < \omega_j$  dan negatif jika  $\omega > \omega_j$ . Bagian real penyebut dari persamaan di atas dihilangkan ketika  $\omega = \omega_j$ .

Dispersi normal dihubungkan dengan peningkatan  $\text{Re } \epsilon(\omega)$  dengan  $\omega$  adalah dispersi abnormal yang berlawanan dari dispersi normal. Dispersi normal terjadi pada setiap lokasi kecuali di sekitar frekuensi resonansi dan hanya dimana terdapat dispersi abnormal bagian imajiner dari  $\epsilon$  bermakna. Jika bagian emajinear dari  $\epsilon$  menyatakan energi disipasi yang berasal dari gelombang elektromagnetik dalam medium, daerah dimana  $\text{Im } \epsilon$  bernilai besar disebut daerah absorpsi resonansi.

Atenuasi dari bidang gelombang secara langsung dinyatakan dalam suku real dan imajiner dari jumlah gelombang  $k$ . Jika jumlah gelombang dituliskan,

$$k = \beta + i \frac{\alpha}{2} \quad (2.41)$$

dimana  $\alpha$  adalah konstantas atenuasi atau koefisien absorpsi. Intensitas gelombang sebagai  $e^{-\alpha z}$ . Persamaan medan yang menghubungkan antara  $(\alpha, \beta)$  dan  $(\text{Re } \epsilon, \text{Im } \epsilon)$ ,

$$\beta^2 - \frac{\alpha^2}{4} = \frac{\omega^2}{c^2} \text{Re } \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.42)$$

$$\beta\alpha = \frac{\omega^2}{c^2} \text{Im } \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.43)$$

Jika  $\alpha \ll \beta$  terjadi kecuali absorpsi sangat kuat atau  $\text{Re } \epsilon$  maka konstanta atenuasi  $\alpha$  dapat dituliskan dengan pendekatan sebagai berikut,

$$\alpha = \frac{\text{Im } \epsilon(\omega)}{\text{Re } \epsilon(\omega)} \beta \quad (2.44)$$

dimana  $\beta = \sqrt{\text{Re}(\epsilon/\epsilon_0)} \omega/c$ . Fraksi peningkatan dalam intensitas tiap panjang gelombang dibagi  $2\pi$  diberikan melalui rasio,  $\text{Im } \epsilon / \text{Re } \epsilon$ .

Pada daerah frekuensi tinggi berlaku  $\omega \gg \omega_{i \max}$  maka persamaan 2.40 menjadi,

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.45)$$

dimana  $\omega_p^2 = \frac{NZe^2}{\epsilon_0 m}$  merupakan frekuensi bahan dan  $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$  (Jackson, 1999).

## 2.8 Metode Pemodelan Komputasi

Untuk menentukan distribusi suhu setiap satuan waktu sebagai akibat dari pemanasan dengan gelombang mikro, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan 2.24 sebelumnya. Karena gerakan *crude oil* diasumsikan konstan sehingga suku kedua pada ruas kiri dapat diabaikan sehingga persamaan distribusi suhu akibat dari pemanasan dengan gelombang mikro pada *crude oil* menjadi,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (2.46)$$

dalam mempropagansikan gelombang mikro digunakan pandu gelombang silinder sehingga,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (2.47)$$

dengan mengetahui besar generation maka diperoleh,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + BT \quad (2.48)$$

dimana  $K = \frac{k}{\rho C_p}$  dan  $B = \frac{Q}{\rho C_p}$ .

Untuk memodelkan distribusi suhu *crude oil* solusi numerik dari persamaan di atas menggunakan transformasi koordinat  $\eta = \ln r$  sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + BT \quad (2.49)$$

dengan asumsi bahwa tidak ada variasi sudut sehingga variabel  $\phi$  diabaikan sehingga persamaan menjadi,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + BT \quad (2.50)$$

persamaan distribusi suhu pada pemanasan *crude oil* mengandung persamaan differensial biasa dan differensial parsial yang diselesaikan dengan *Finite Element Methods* (FEM).

### 2.8.1 Finite Element Methods (FEM)

*Finite element method* (metode elemen hingga) atau FEM adalah salah satu metode numerik yang berusaha memecahkan persamaan differensial parsial dan persamaan integrasi lainnya yang dihasilkan dari hasil diskritisasi benda kontinu. Pada metode finite element variasi dari *field variable* dalam domain fisik merupakan sebuah bagian utuh dari prosedur. Berdasarkan fungsi interpolasi yang dipilih, *field variable* diseluruh bagian sebuah elemen hingga dispesifikasikan sebagai sebuah bagian utuh dari prosedur.

Secara umum langkah-langkah dalam FEM bisa diringkas sebagai berikut:

1. Membagi obyek analisa ke dalam elemen-elemen kecil.
2. Melakukan modelisasi sederhana yang berlaku untuk setiap elemen.
3. Membuat formula sederhana untuk setiap element tersebut. Pada langkah ini kita akan memperoleh sebuah persamaan yang disebut "*element stiffness matrix*" atau matriks kekakuan elemen.
4. Mengkombinasikan seluruh elemen dan membuat persamaan simultan yang mencakup semua variabel. Pada langkah ini akan diperoleh sebuah persamaan yang disebut "*global stiffness matrix*" atau matriks kekakuan global.

Pemodelan dilakukan pada bidang dua dimensi axial symetrik koordinat silinder, menggunakan FEM. Berdasarkan FEM besarnya medan elektrik ( $\vec{E}$ ) dan medan magnetik ( $\vec{H}$ ) pada pemancar gelombang mikro adalah,

$$\vec{E} = \vec{e}_r \frac{\xi}{r} e^{j(\omega t - \delta z)} \quad (2.51)$$

$$\vec{H} = \vec{e} \frac{\xi}{Zr} e^{j(\omega t - \delta z)} \quad (2.52)$$

$$P_{in} = \int_{r_{inner}}^{r_{outer}} \text{Re} \left( \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H} \right) 2\pi dr = e_z \pi \frac{\xi^2}{Z} \ln \left( \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \right) \quad (2.53)$$

dengan,

$$\xi = \sqrt{\frac{Z P_{in}}{\pi \cdot \ln \left( \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \right)}} \quad (2.54)$$

dimana  $Z$  adalah impedansi gelombang pada dielektrik pandu gelombang,  $P_{in}$  adalah input power antenna,  $r_{outer}$  adalah radius luar konduktor,  $r_{inner}$  adalah radius dalam konduktor dan  $\xi$  adalah konstanta integrasi (FEMLAB, 2004).

Untuk persamaan *heat transfer* pada suatu benda, persamaan dasar yang digunakan adalah persamaan

$$-\left( \frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial q_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial q_\phi}{\partial \phi} \right) + Q = \rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2.55)$$

dimana  $q_z$ ,  $q_r$  dan  $q_\phi$  adalah komponen aliran panas pada satuan luas. Berdasarkan Hukum Fourier komponen aliran dapat dinyatakan,

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.56. a)$$

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.56. b)$$

$$q_\phi = -k \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad (2.56. c)$$

dimana  $k$  merupakan koefisien konduktivitas termal pada media. Substitusi persamaan 2.56 ke persamaan 2.55 didapat,

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \right) + Q = \rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2.57)$$

Persamaan di atas diasumsikan sebagai *boundary condition* dan dapat dituliskan sebagai,

1. Spesifik temperatur

$$T_s = T_1(z, r, \phi) \text{ pada } S_1.$$

2. Spesifik aliran panas

$$q_z n_z + q_r n_r + q_\phi n_\phi = -q_s \text{ pada } S_2.$$

3. *Boundary condition* konveksi

$$q_z n_z + q_r n_r + q_\phi n_\phi = h(T_s - T_e) \text{ pada } S_3.$$

4. Radiasi

$$q_z n_z + q_r n_r + q_\phi n_\phi = \sigma \varepsilon T_a^4 - \alpha q_r \text{ pada } S_4.$$

dimana  $h$  adalah koefisien konveksi,  $T_s$  adalah temperatur permukaan,  $T_e$  adalah pertukaran konveksi temperatur,  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzman,  $\varepsilon$  adalah koefisien emisi,  $\alpha$  adalah koefisien penyerapan bahan, dan  $q_r$  adalah aliran radiasi panas per satuan luas bahann.

Untuk kasus transient kondisi awal temperatur untuk bahan pada  $t = 0$ , adalah

$$T(z, r, \phi, 0) = T_0(z, r, \phi) \quad (2.58)$$

(Lewis, Nithiarasu, & Seetharamu, 2004).

## 2.8.2 Validasi Menggunakan Metode Statistik

### 2.8.2.1 Auto Korelasi

Auto korelasi (korelasi diri) adalah korelasi yang terjadi antar observasi dalam satu variabel. Korelasi ini terjadi antar waktu atau individu, kasus autokorelasi banyak terjadi pada data time series (Wei, 2006). Fungsi korelasi diri menunjukkan seberapa cepat suatu data acak berubah dalam waktu. Jika korelasi diri meluruh dengan cepat ke nol maka data tersebut berubah-ubah dengan cepat dalam waktu. Dan suatu data yang berubah-ubah dengan lambat akan mempunyai fungsi korelasi diri yang meluruh dengan lambat. Auto korelasi dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$R_{xx}[k] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]x[n+k] \quad (2.59)$$

Dimana:  $R_{xx}$  = nilai korelasi  
 $x[n]$  = data ke-n  
 $x[n+k]$  = data ke n+1

Beberapa sifat auto korelasi:

1.  $R_{xx}[k] = R_{xx}[-k]$
2.  $|R_{xx}[k]| \leq R_{xx}[0]$
3. Jika  $\lim_{k \rightarrow \infty} |R_{xx}[k]| = C$ , maka  $C = \mu_x^2$

(Altiok & Melamed, 2007)

### 2.8.2.2 Kros Korelasi

Kros korelasi atau korelasi silang digunakan untuk mengacu pada korelasi antara masukan dari dua vektor acak X dan Y. Fungsi korelasi silang menunjukkan ketergantungan harga simpangan satu data dengan harga simpangan data lainnya pada kondisi pengukuran yang sama. Secara matematis korelasi silang dapat dituliskan sebagai berikut

$$R_{xy}[k] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n+k] \quad (2.60)$$

Dimana:  $R_{xy}$  = nilai korelasi  
 $x[n]$  = data 1 ke-n  
 $y[n+k]$  = data 2 ke n+1

Beberapa sifat korelasi silang:

1.  $R_{xy}[k] = R_{xy}[-k]$
2.  $|R_{xy}[k]| \leq \sqrt{R_{xx}[k]R_{yy}[k]}$
3.  $|R_{xy}[k]| \leq \frac{1}{2}(R_{xx}[0] + R_{yy}[0])$

(Altiok & Melamed, 2007)

### BAB 3

## METODOLOGI PENELITIAN

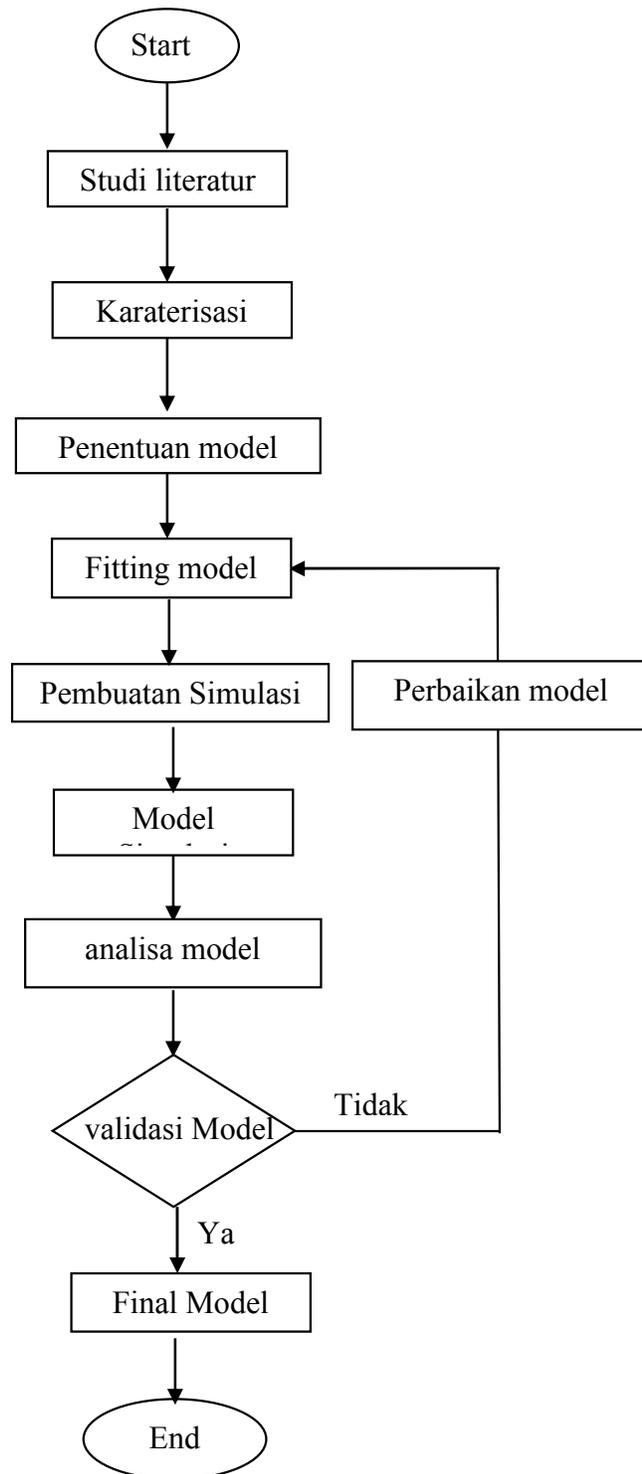
Pemodelan pemanasan *crude oil* dengan energi gelombang mikro dilakukan dengan metode *Finite Element Methods* (FEM). Metode ini merupakan salah satu metode numerik yang berusaha memecahkan persamaan differensial parsial dan persamaan integrasi lainnya yang dihasilkan dari hasil diskritisasi benda kontinu. Penentuan persamaan model dengan mempertimbangkan sifat dielektrik bahan.

Gelombang mikro dihasilkan dari sebuah generator. Dalam penelitian ini model yang dibuat menggunakan karakter dari magnetron jenis (MICRO DENSHI UM-1500), beroperasi pada frekuensi 2.45 GHz, dengan maksimum power input 1.5 Kw (Ratanadecho et al., 2002). Berikutnya dengan pembangkit gelombang mikrokomersial (MEGA LP 320) dengan daya output 500 W dengan modus perambatan dan frekuensi yang sama.

Gelombang mikro merupakan gelombang elektromagnetik sehingga untuk mentransmisikan sebuah gelombang elektromagnetik dibutuhkan sebuah pandu gelombang. Dalam penelitian ini jenis pandu gelombang yang digunakan adalah pandu gelombang berbentuk silindrik yang disesuaikan dengan model sumur bor. Pandu gelombang silindrik yang digunakan memiliki dimensi pandu gelombang terdiri atas diameter sebesar 4 inci (10,16 cm) dan panjang sebesar 0,5 m. Gelombang mikro ini akan ditransmisikan pada dua titik sepanjang sumbu z.

Pemodelan pemanasan dengan mempertimbangkan sifat dielektrik bahan ini difokuskan pada proses *steam injection*. *Steam injection* adalah suatu proses pemanasan *crude oil* di dalam sumur dengan menggunakan energi termal. Dalam penelitian ini energi termal yang digunakan bersumber dari energi gelombang mikro. Selama proses *steam injection*, besar energi kukus yang digunakan didasarkan pada salah satu kilang minyak milik PT. Pertamina dengan tiga bagian energi kukus pada suhu pemanasan sekitar 400°C terdiri atas 41.23 MWt (16.51 Mwe), 101.47 MWt (40.63 Mwe) dan 24 Mwe (60 MWt).

Ada pun bagan alir dalam penelitian sebagai berikut,



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

### 3.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan suatu tahap awal yang dilakukan dalam penelitian ini untuk memperoleh informasi yang menunjang terkait masalah pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro dengan dengan metode *fitting*. Informasi yang diperoleh bersumber dari jurnal-jurnal penelitian yang terkait sehingga mendapatkan beberapa model persamaan pemanasan *crude oil* dengan menggunakan gelombang mikro.

### 3.2 Metode Pemodelan

Pemodelan dilakukan pada bidang dua dimensi axial symetrik koordinat silinder, menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Berdasarkan FEM besarnya medan elektrik ( $\vec{E}$ ) dan medan magnetik ( $\vec{H}$ ) pada pemancar gelombang mikro seperti pada persamaan 2.51 saapai 2.54.

Pada penelitian ini menggunakan dua sumber sumber gelombang mikro, berdasarkan teori superposisi medan elektrik, total radiasi sumber  $\vec{E}(z, r, \phi)$  adalah jumlah vektor medan elektrik yang dihasilkan tiap pemancar, seperti pada persamaan 2.30 dan 2.31.

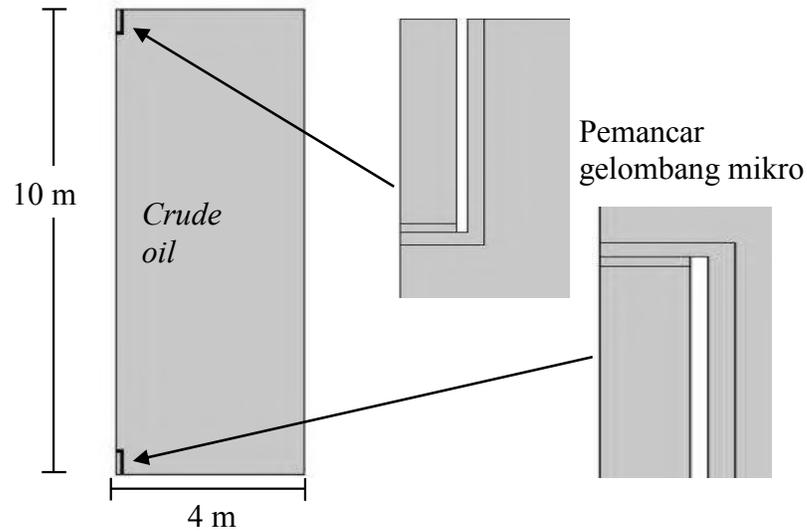
Metode pemodelan pemanasan *crude oil* dengan menggunakan gelombang mikro didasarkan pada bentuk matematis persamaan dan bentuk numerik. Dalam hal ini persamaan matematis didasarkan pada transfer kalor pada persamaan sebagai persamaan 2.24  $Q$  dari persamaan 2.25.

### 3.3 Penentuan Pemodelan

Penentuan pemodelan pemanasan *crude oil* dengan menggunakan gelombang mikro dilakukan dengan tahap-tahap sebagai berikut:

- a. Pemodelan dilakukan dalam bentuk silinder 2D asimetrik, dengan penampang ditunjukkan pada gambar 3.2.
- b. Menentukan karakter *crude oil*. *Crude Oil* diasumsikan berada pada kondisi awal dengan parameter fisik terdiri atadari *crude oil* terdiri atas : viskositas sebesar 3,9 cp, konduktivitas termal sebesar  $0.38 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ , konduktivitas elektris  $0.43 \text{ S/m}$ , massa jenis sebesar  $900 \text{ m}^{-3}$ , dan kalor jenis *crude oil*

sebesar  $2000 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ , konstanta dielektrik 2,8 dan loss dielektrik 0,15. (Basak, 2004).



Gambar 3.2 Bentuk Geometri 2D asimetrik Model

- c. Menentukan model dan ukuran dari pemancar gelombang mikro yang disebut cavity. Cavity yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk silinder sesuai bentuk sumur bor dengan panjang 0,5 m dan diameter 10,16 cm. Sumber pembangkit gelombang mikro yang digunakan adalah pembangkit gelombang mikro magnetron jenis MICRO DENSHI UM-1500 beroperasi pada frekuensi 2.45 GHz, dengan maksimum power input 1.5 Kw.
- d. Menentukan model penempatan sumber gelombang mikro, dimana sumber dipasang di dua titik sepanjang sumur bor.
- e. Menentukan model persamaan pembangkit panas lokal

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r (\tan \delta) |E|^2$$

dimana  $\vec{E}$  adalah jumlah vektor medan elektrik yang dihasilkan tiap pemancar berdasarkan persamaan 2.30 dan 2.31

- f. Menentukan model transfer kalor sesuai dengan persamaan 2.24, yang merupakan distribusi suhu sebagai fungsi posisi dan waktu, dalam koordinat silinder di sepanjang model silinder dapat diketahui

- g. Menentukan posisi peletakkan kedua sumber pemancar gelombang mikro, yaitu sumber diletakkan pada koordinat  $(r,z)$  pada  $(0;0,5)$  dan  $(0;9,5)$
- h. Menentukan solusi dari persamaan distribusi suhu pada langkah keempat dengan menggunakan metode FEM.
- i. Melakukan variasi perubahan waktu pemanasan dan posisi pemanasan.
- j. Membuat diagram dan grafik hasil persamaan model transfer kalor dalam koordinat silinder berdasarkan hasil pada tahap keempat dengan menggunakan program matlab.

### 3.4 Langkah-langkah Pemodelan secara Numerik

Dari persamaan distribusi suhu

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + BT \quad (3.1)$$

Dimana  $f(t_n, T_n) = \frac{\partial T}{\partial t}$ , saat  $T(t_0) = 38^\circ C$  pada kedalaman 1000 m dengan diameter pipa 10,16 cm. Setelah dipanasi selama 4800 detik suhu di sekitar sumber sebesar  $200^\circ C$ . Dengan demikian langkah-langkah numerik berdasarkan solusi persamaan diferensial dengan metode,

1. Membagi obyek analisa ke dalam elemen-elemen kecil.
2. Melakukan modelisasi sederhana yang berlaku untuk setiap elemen.
3. Membuat formula sederhana untuk setiap element tersebut.
  - a. Medan Elektrik total

$$\vec{E}(z, r, \phi) = \sum_{i=1}^2 \vec{E}_i(z, r, \phi)$$

$$|\vec{E}(z, r, \phi)| = |\vec{E}_i(z, r, \phi)| \cdot \left| \frac{\sin \frac{N}{2} \psi}{\sin \frac{\psi}{2}} \right|$$

- b. Kalor

$$Q(z, r, \phi) = \frac{\sigma_{crude\ oil}}{2} |\vec{E}(z, r, \phi)|$$

- c. Tansfer panas

$$[C]\{\dot{T}\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\}$$

4. Mengkombinasikan seluruh elemen dan membuat persamaan simultan yang mencakup semua variabel.

### **3.5 Pembuatan Simulasi**

Pembuatan simulasi berdasarkan persamaan pemodelan transfer kalor pada *crude oil* sesuai point 3.4 tahap ketiga. Hasil simulasi berupa grafik dari persamaan model transfer kalor dengan distribusi suhu sepanjang sebagai fungsi posisi dan waktu dalam pandu gelombang silindrik. Alur simulasi ditunjukkan pada gambar 3.3.

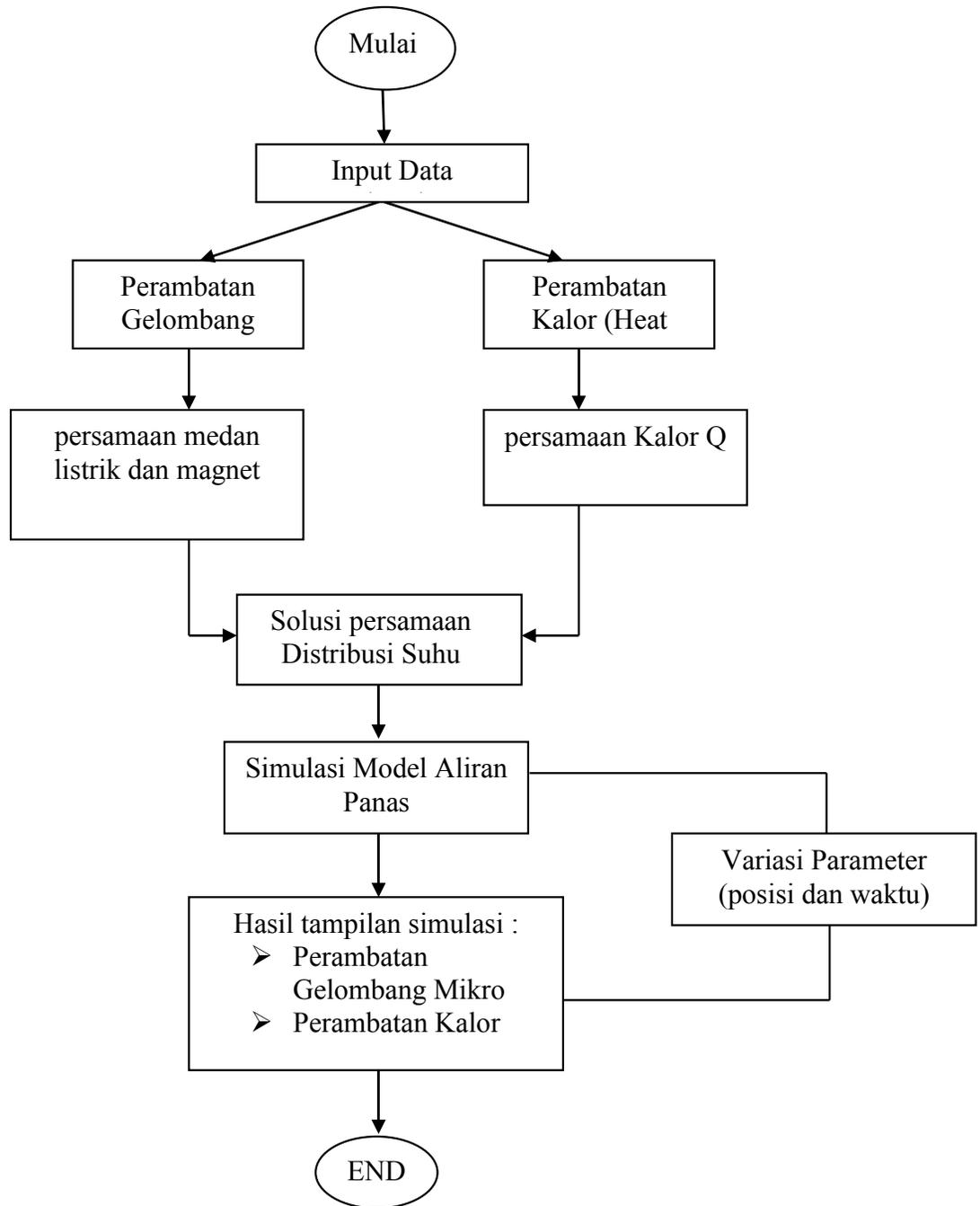
### **3.6 Pengujian Model dan Analisis Error**

Pada tahap pengujian model, melakukan variasi terhadap parameter fisik berupa variabel bebas yang terukur diantaranya suhu, posisi dan waktu yang berdasarkan konstanta-konstanta yang sesuai. Tujuan dilakukan variasi adalah untuk menguji keberhasilan model yang dipilih. Jika grafik memberikan bentuk dan respon yang sama maka dikatakan pengujian berhasil. Pengujian ini sekaligus sebagai validasi model untuk data-data lain diluar data penelitian.

Validasi berikutnya dengan melakukan uji autokorelasi. Uji autokorelasi dilakukan untuk melihat apakah ada hubungan linier antara error serangkaian observasi yang diurutkan menurut waktu (data time series).

### **3.7 Final Model**

Final model merupakan tahap akhir penentuan model transfer kalor dalam pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro. Penentuan final model dengan menggunakan tingkat error sebesar 0-20% dengan tingkat kebenaran mode sebesar 80-100%. Final model yang diperoleh ditunjukkan dalam bentuk persamaan dan grafik model pemanasan gelombang mikro yang menyatakan distribusi suhu sebagai fungsi posisi dan waktu.



Gambar 3.3 Diagram Alir simulasi

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian akan ditampilkan hasil pemodelan pemanasan *crude oil* dan perambatan gelombang mikro pada reservoir. Simulasi perambatan gelombang mikro dan transfer kalor ditampilkan dalam bentuk dua dimensi asimetrik dengan menggunakan metode FEM.

Sumber gelombang mikro ditempatkan pada posisi  $r = 0$ , dengan  $z_1 = 0,5$  m dan  $z_2 = 9.5$  m. Pandu gelombang yang digunakan berbentuk silindrik dengan diameter 10,16 cm, panjang 50 cm, tebal isolator 3 cm, tebal konduktor 2 cm, gap udara 2 cm. *Crude oil* diasumsikan homogen pada seluruh volume reservoir. Parameter yang divariasikan dalam permodelan ini adalah parameter waktu, dengan variasi waktu ini diperoleh hasil simulasi gelombang mikro dan kalor, sebagai berikut.

### 4.1 Bentuk Penyelesaian Matematis

Dalam penelitian ini magnetron sebagai sumber gelombang mikro bekerja pada frekuensi 2,45 GHz. Dengan menggunakan pandu gelombang silinder, yang didasarkan pada bentuk tiga dimensi dari reservoir maka besar frekuensi *cut-off* pada medium udara adalah 0,21 GHz sedangkan dalam medium *crude oil* adalah 0,003 GHz. Syarat propagansi gelombang bahwa jika  $f_{kerja} > f_{cut-off}$  maka gelombang akan dipropagansikan. Dengan meninjau nilai dari frekuensi kerja dan frekuensi *cutt-off* maka gelombang mikro dapat dipropagansikan dalam reservoir.

Propagansi gelombang dinyatakan dalam suatu besaran yang dikenal dengan konstanta propagansi. Konstanta propagansi merupakan bilangan kompleks dengan terdiri atas bagian real dan imajiner. Bagian real dari konstanta propagansi adalah konstanta atenuasi  $\alpha$  sedangkan bagian imajiner adalah konstanta fase  $\beta$ . Secara matematis, konstanta propagansi  $\gamma$  dinyatakan dalam persamaan,

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Berdasarkan bentuk dari dimensi pandu gelombang silender (diameter 10,16 cm, tinggi 50 cm), frekuensi kerja gelombang mikro sebesar 2,45 GHz, konstanta dielektrik reservoir sebesar 4,09 dan nilai loss dielektrik reservoir sebesar 0,007 maka besar konstanta atenuasi dalam penelitian ini adalah  $0,04 \text{ m}^{-1}$  dan konstanta fasa  $50,33 \text{ m}^{-1}$ .

Ketika *crude oil* berinteraksi dengan gelombang mikro maka energi gelombang akan diserap oleh *crude oil*. Energi ini menyebabkan perputaran dipol-dipol *crude oil*. Gerakan perputaran dari dipol-dipol *crude oil* mengikuti gerak osilasi yang menghasilkan gesekan antara dipol-dipol. Gerakan dari gerak osilasi dipol-dipol ini bergantung pada frekuensi gelombang mikro yang datang. Semakin tinggi frekuensi dari gelombang mikro maka semakin besar gesekan dipol-dipol yang terjadi, sehingga mengakibatkan energi gelombang mikro semakin banyak yang hilang. Energi yang hilang ini dikonversi dalam bentuk kalor, dengan demikian suhu *crude oil* setelah mendapat paparan radiasi dari gelombang mikro menjadi meningkat.

Berdasarkan prinsip pemanasan gelombang mikro maka kalor pada *crude oil* dibangkitkan setelah mendapat radiasi gelombang mikro. Hal ini menyebabkan perambatan gelombang mikro pada mencakup luasan wilayah reservoir dari pusat radiasi lebih besar dibandingkan perambatan kalor. Secara matematis hal ini daktualisasikan dalam bentuk persamaan kalor.

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2$$

dimana E merupakan medan elektrik yang diperoleh dari hasil simulasi perambatan gelombang mikro. Persamaan di atas menunjukkan bahwa kalor bergantung pada medan listrik dari gelombang mikro. Kalor dari persamaan di atas merupakan kalor dari sumber gelombang mikro. Setelah kalor merambat pada *crude oil* persamaan kalor menjadi,

$$Q(z, r, \phi) = \frac{\sigma_{crude\ oil}}{2} |\vec{E}(z, r, \phi)|$$

dengan  $\sigma_{crude\ oil}$  merupakan koefisien konstanta dielektrik *crude oil* pada penelitian ini digunakan 2,8 dan  $|\vec{E}(z, r, \phi)|$  adalah medan elektrik gelombang mikro.

Pada penelitian ini terdapat dua sumber gelombang mikro, yaitu berada pada koordinat (0;0,5) dan (0;9,5). Berdasarkan sifat gelombang ketika terdapat dua gelombang pada suatu medium maka akan terjadi interferensi. Kedua sumber gelombang mikro mempunyai karakteristik yang sama dan terpisah sejauh 9 m, dengan fasa yang berhadapan, sehingga interferensi kedua sumber adalah

$$I = \frac{1}{Z} (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \Delta\phi \rangle) \quad (4.1)$$

karena fasa gelombang saling berhadapan maka  $\Delta\phi = 0$ , sehingga persamaan diatas menjadi,

$$I = \frac{1}{Z} (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}) \quad (4.2)$$

dimana  $I$  adalah intensitas interferensi.

Pada penelitian ini medium *crude oil* dibagi menjadi beberapa *finite element* yang dihubungkan oleh node-node. Persamaan umum untuk domain dapat dikumpulkan dari persamaan *finite element* yang saling terkoneksi. Persamaan diskrit untuk permasalahan *finite element heat transfer* adalah,

$$[C]\{\dot{T}\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\} \quad (4.3)$$

dengan

$$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV$$

$$[K_c] = \int_V k [B]^T [B] dV$$

$$[K_h] = \int_{S_3} h [N]^T [N] dS$$

$$[K_r]\{T\} = \int_{S_4} \sigma \epsilon T^4 [N]^T dS$$

$$\{R_T\} = - \int_{S_1} \{q\}^T \{n\} [N]^T dS$$

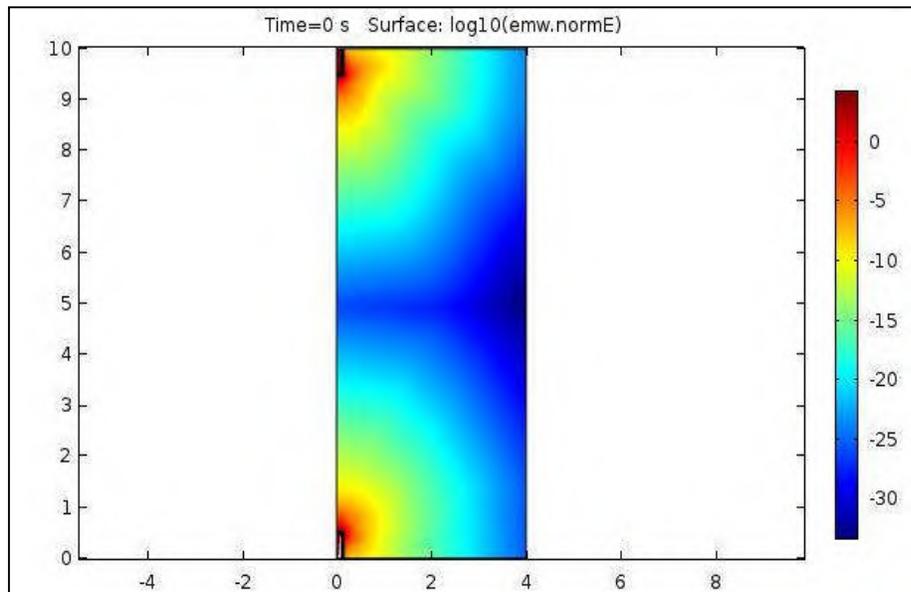
$$\{R_Q\} = \int_V Q [N]^T dV$$

$$\begin{aligned} \{R_q\} &= \int_{S_2} q_s [N]^T dS \\ \{R_h\} &= \int_{S_3} h T_e [N]^T dS \\ \{R_r\} &= \int_{S_4} \alpha q_r [N]^T dS \end{aligned} \quad (4.4)$$

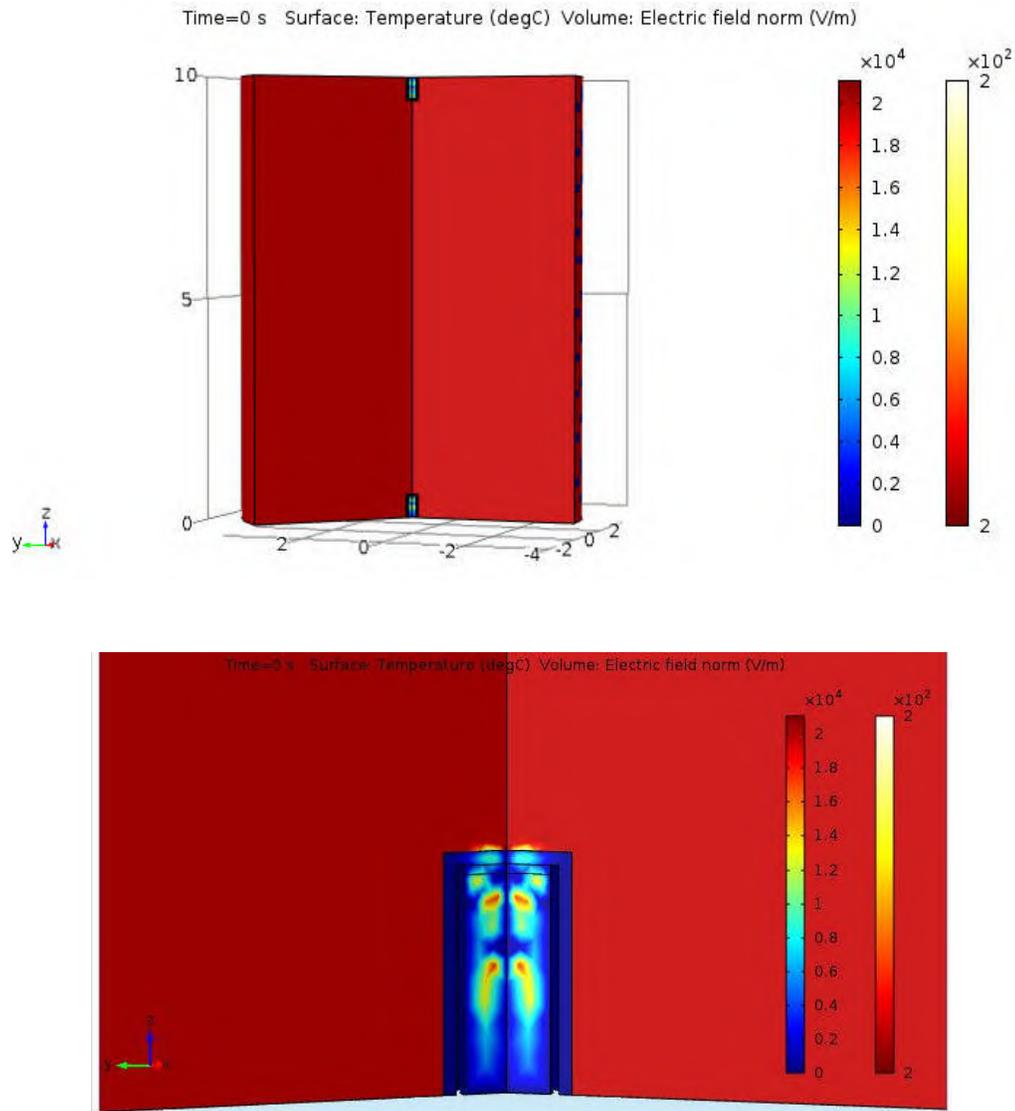
dimana,  $\{\dot{T}\}$  adalah nodal vektor temperatur derivatif terhadap perubahan waktu.

#### 4.2 Hasil Simulasi Gelombang Mikro

Pada FEM penyelesaian persamaan *heat transfer* –yang merupakan persamaan diferensial– diselesaikan dengan membuat domain-domain penyelesaian sehingga memudahkan dan dapat meminimalkan kesalahan penyelesaian. Kondisi awal pada pemodelan dipilih pada waktu 0 s. Hasil simulasi pada kondisi awal ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2.



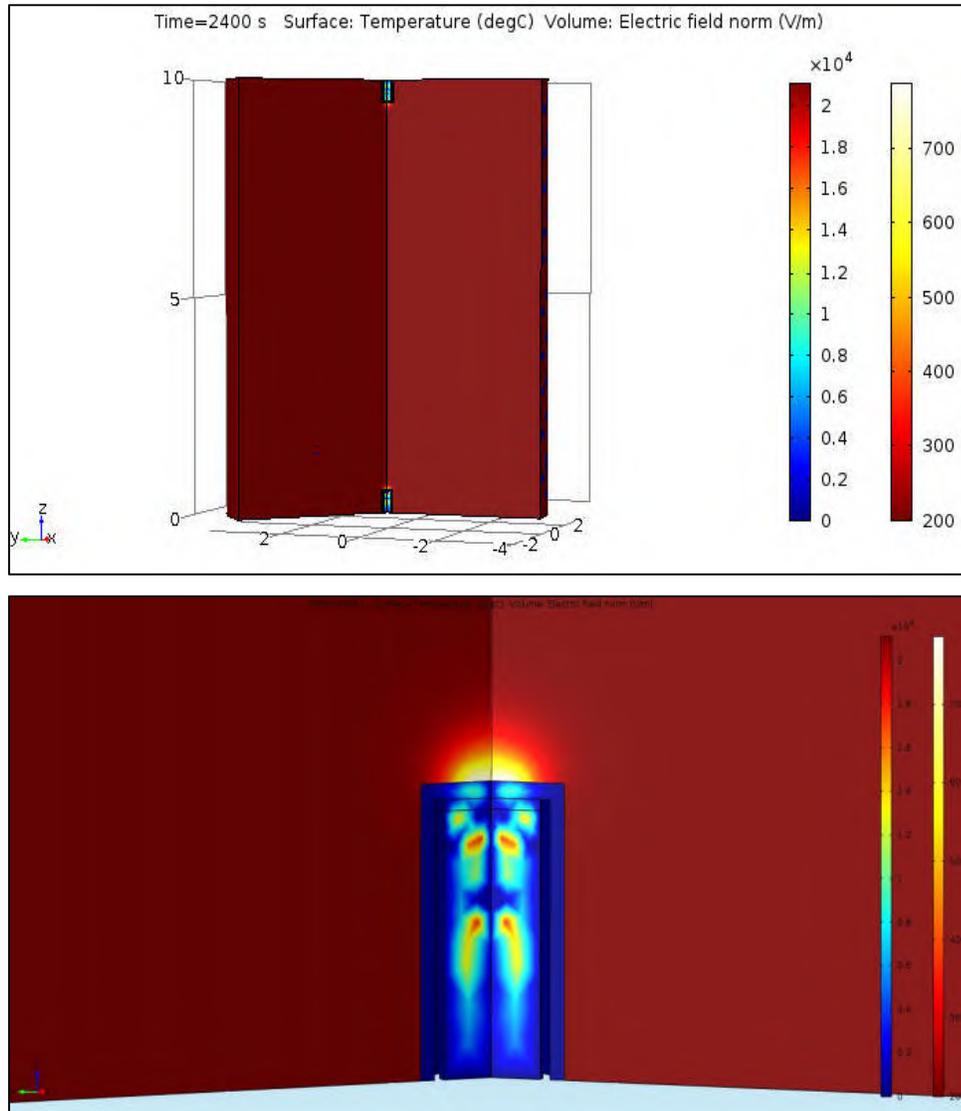
Gambar 4.1 Model radiasi gelombang elektromagnetik



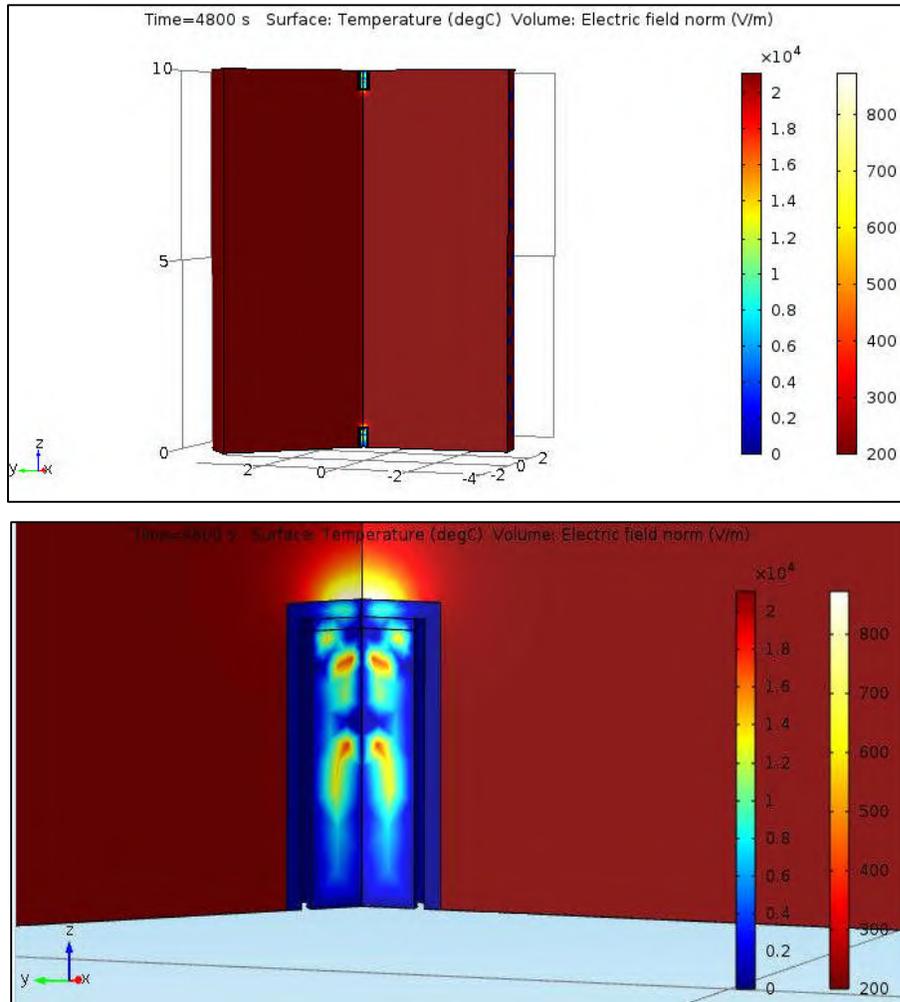
Gambar 4.2 Model Perambatan panas dan sebaran medan elektrik

### 4.3 Variasi Parameter Waktu

Penyelesaian permasalahan transfer panas merupakan persamaan diferensial bergantung waktu, sehingga parameter waktu merupakan parameter yang sangat penting dalam penelitian ini. Pemanasan dilakukan selama 4800 s dengan step pengukuran tiap 60 s. Contoh bentuk tampilan hasil simulasi pada waktu 24000 s dan 4800 s ditunjukkan pada gambar 4.3 dan 4.4, sedangkan untuk variasi waktu lainnya disajikan dibagian lampiran.



Gambar 4.3 Hasil Simulasi pada Waktu 2400 s

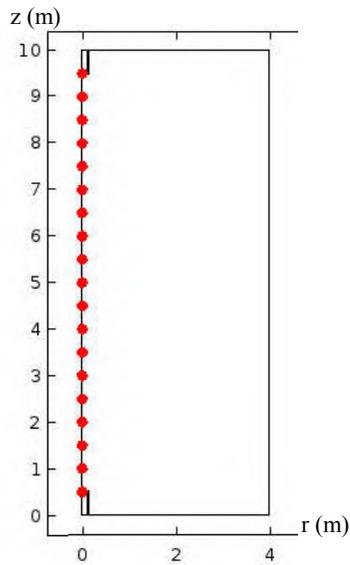


Gambar 4.4 Hasil Simulasi pada Waktu 4800 s

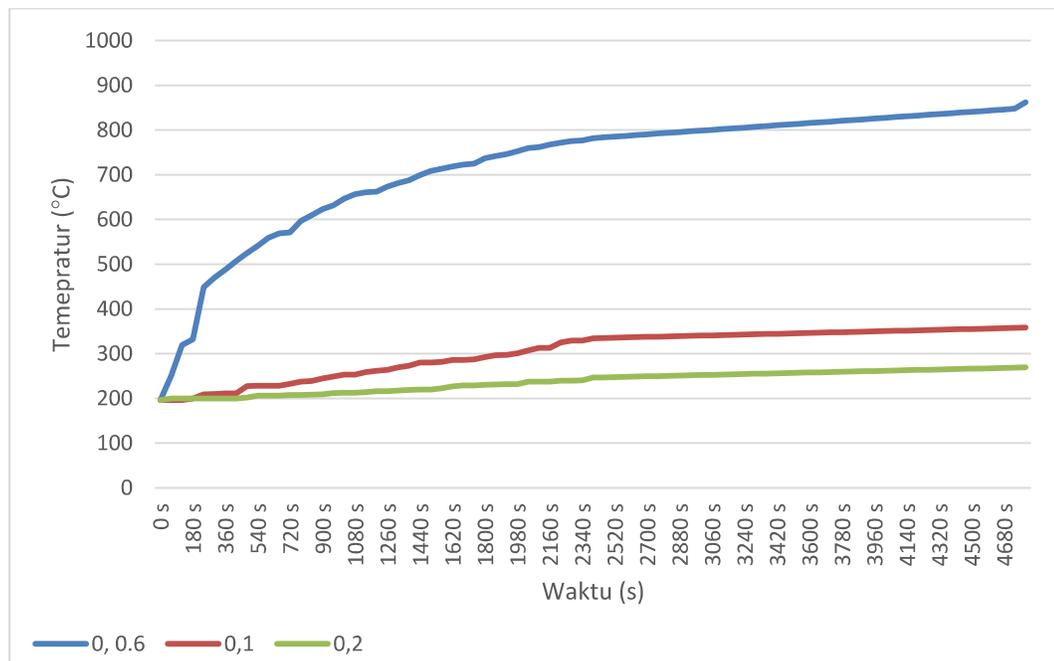
Berdasarkan gambar hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar lama waktu pemanasan maka perambatan gelombang mikro semakin meluas dan suhu *crude oil* semakin meningkat, sehingga jika waktu pemanasan ditambah maka pemanasan dapat mencapai dinding reservoir dan gelombang mikro akan dipantulkan. Pantulan gelombang mikro ini kembali dimanfaatkan untuk pemanasan *crude oil*. Adapun untuk sebaran medan elektrik tetap konstan, yaitu sebesar  $2 \times 10^4$  V/m.

Pengukuran suhu ini dilakukan pada setiap jarak 0,5 m pada koordinat  $z$ , titik-titik pengambilan data suhu dapat dilihat pada gambar 4.5. Sedangkan plot pengukuran pada tiap posisi ditampilkan pada gambar 4.6. Posisi pengukuran

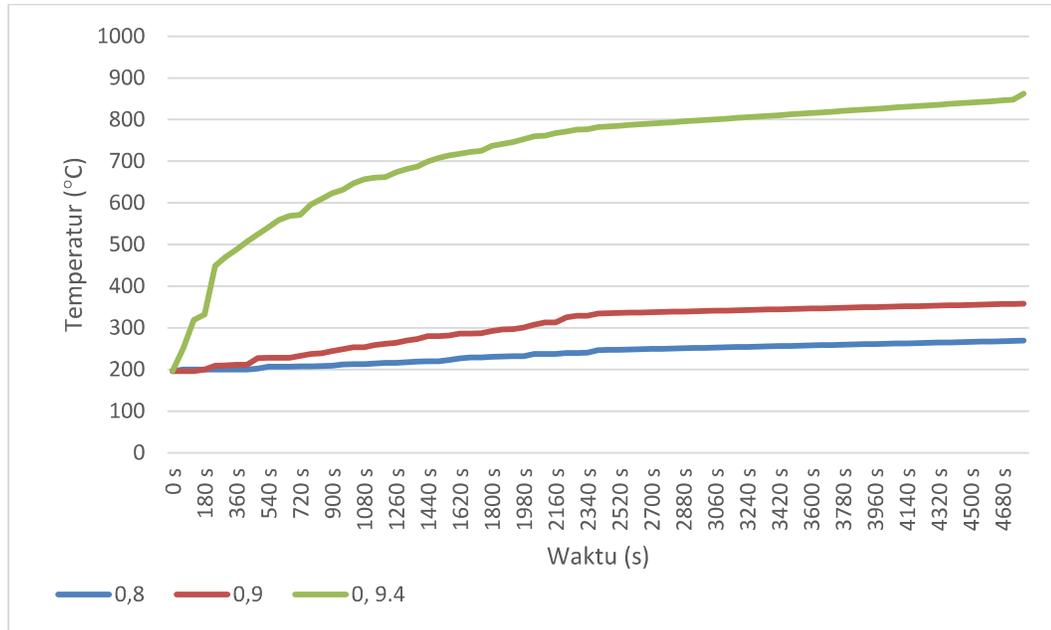
yang dimulai pada koordinat (0;0.6) sampai posisi (0;9.4) dengan interval 0,5 m. Data hasil pengukuran pada tiap posisi disajikan dalam lampiran 4.



Gambar 4.5 Titik pengambilan data perubahan suhu



Gambar 4. 6 Plot pengukuran suhu pada posisi (0;0,6), (0;1), dan (0;2)



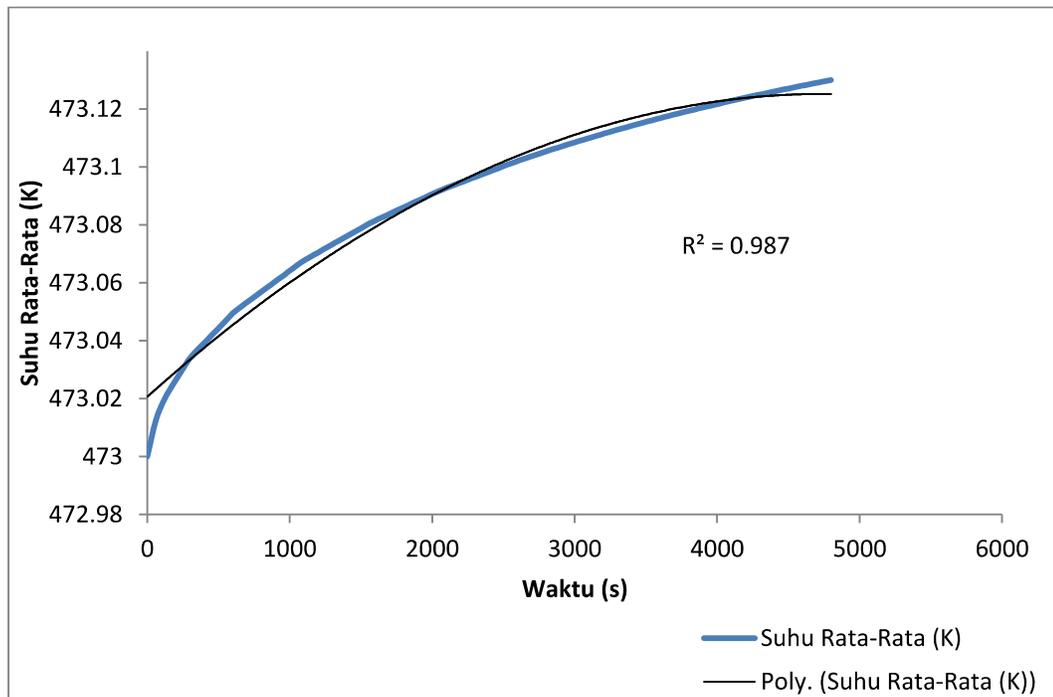
Gambar 4.7 Plot pengukuran suhu pada posisi (0;8), (0;9), dan (0;9,4)

Berdasarkan plot data pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa semakin besar jarak titik tinjau dari pusat radiasi maka semakin kecil nilai suhu *crude oil*. Dari data tersebut kita dapat melihat bahwa suhu *crude oil* tertinggi berada pada posisi (0;0,6) dan (0,9,4), terendah pada posisi (0;8) dan (0;2).

Hasil simulasi suhu rata-rata per m<sup>3</sup> volume reservoir secara garis besarnya ditunjukkan pada tabel 4.1, dan jika dinyatakan dalam grafik ditunjukkan pada gambar 4.8.

Tabel 4.1 Suhu Rata-Rata

Waktu (s)	Suhu Rata-Rata (K)
0	473
300	473.03402
600	473.04943
900	473.06052
1200	473.07051
1500	473.07886
1800	473.08608
2100	473.09275
2400	473.09838
2700	473.10374
3000	473.10849
3300	473.11287
3600	473.11686
3900	473.12054
4200	473.12394
4500	473.12709
4800	473.13003



Gambar 4.8 Suhu Rata-Rata

Berdasarkan data pada tabel 4.1 dapat kita ketahui bahwa semakin lama waktu pemanasan maka sebaran suhu rata-rata *crude oil* semakin meningkat. Bentuk dari pemodelan pemanasan ditunjukkan pada grafik 4.8 dan dengan menggunakan analisis regresi didapatkan nilai,

Regression Statistics	
Multiple R	0.959732792
R Square	0.921087031
Adjusted R Square	0.920088133
Standard Error	0.009057146
Observations	81

*Multiple R* (R majemuk) adalah suatu ukuran untuk mengukur tingkat keeratan hubungan linear antara variabel terikat dengan seluruh variabel bebas secara bersama-sama. Dari hasil diatas dapat dilihat bahwa model sudah memiliki keeratan yang baik karena memiliki nilai mendekati 1, yaitu sebesar 0,959732792. *R square* atau sering disebut dengan koefisien determinasi, adalah mengukur kebaikan suai (*goodness of fit*) dari persamaan regresi; yaitu memberikan proporsi atau persentase variasi total dalam variabel terikat yang dijelaskan oleh variabel bebas. Nilai  $R^2$  terletak antara 0 – 1, dan kecocokan model dikatakan lebih baik kalau  $R^2$  semakin mendekati 1, dari nilai diatas dapat disimpulkan bahwa model memiliki kecocokan yang baik karena memiliki nilai  $R^2$  0,921087031. Dari data diatas dapat dilihat pula bahwa model memiliki error yang sangat kecil, yaitu sebesar 0,0090557146 atau sekitar 0,91 %.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

**LAMPIRAN 1**  
**Perhitungan Persamaan Heat Transfer menggunakan FEM**

Bentuk fungsi  $N_i$  yang digunakan untuk interpolasi temperatur dalam sebuah *finite elemen*, adalah

$$T = [N] \{T\} \quad (1)$$

$$[N] = [N_1 \ N_2 \ \dots] \quad (2)$$

$$\{T\} = \{T_1 \ T_2 \ \dots\} \quad (3)$$

Diferensiasi dari persamaan suhu-interpolasi memberikan hubungan interpolasi berikut untuk gradien suhu

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots \end{bmatrix} \{T\} = [B]\{T\} \quad (4)$$

dimana  $\{T\}$  merupakan vektor temperatur pada tiap noda,  $[N]$  adalah matrik fungsi bentuk, dan  $[B]$  adalah matrik untuk interpolasi gradien temperatur.

Menggunakan metode Galerkin, persamaan *heat transfer* dapat dituliskan dalam bentuk,

$$\int_V \left( \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - Q + \rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right) N_i dV = 0 \quad (5)$$

dengan teori divergen, didapatkan hubungan:

$$\begin{aligned} & \int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i dV - \int_V \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} \{q\} dV \\ & = \int_V Q N_i dV - \int_S \{q\}^T \{n\} N_i dS \end{aligned} \quad (6)$$

$$\{q\}^T = [q_x \ q_y \ q_z]$$

$$\{n\}^T = [n_x \ n_y \ n_z]$$

dimana  $\{n\}$  adalah matrik normalisasi. Setelah dimasukkan kondisi bata ke persamaan di atas, persamaan diskrit menjadi,

$$\begin{aligned}
& \int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i dV - \int_V \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \{q\} dV \\
&= \int_V Q N_i dV - \int_V \{q\}^T \{n\} N_i dS + \int_{S_2} q_s N_i dS \\
&- \int_{S_3} h(T - T_c) N_i dS - \int_{S_4} (\sigma \epsilon T^4 - \alpha q_r) N_i dS \quad (7)
\end{aligned}$$

dengan,

$$\{q\} = -k[B]\{T\} \quad (8)$$

sehingga didapatkan persamaan diskrit untuk permasalahan *finite element heat transfer* adalah,

$$[C]\{\dot{T}\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\} \quad (9)$$

dengan

$$\begin{aligned}
[C] &= \int_V \rho c [N]^T [N] dV \\
[K_c] &= \int_V k [B]^T [B] dV \\
[K_h] &= \int_{S_3} h [N]^T [N] dS \\
[K_r]\{T\} &= \int_{S_4} \sigma \epsilon T^4 [N]^T dS \\
\{R_T\} &= - \int_{S_1} \{q\}^T \{n\} [N]^T dS \\
\{R_Q\} &= \int_V Q [N]^T dV \\
\{R_q\} &= \int_{S_2} q_s [N]^T dS \\
\{R_h\} &= \int_{S_3} h T_e [N]^T dS \\
\{R_r\} &= \int_{S_4} \alpha q_r [N]^T dS \quad (10)
\end{aligned}$$

dimana,  $\{\dot{T}\}$  adalah nodal vektor temperatur derivatif terhadap perubahan waktu.

Persamaan untuk different types dapat diambil dari persamaan umum:

*Stationary linear problem*

$$([K_c] + [K_h])\{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} \quad (11)$$

*Transient linear problem*

$$[C]\{T(t)\} + ([K_c] + [K_c(t)])\{T(t)\} = \{R_Q(t)\} + \{R_q(t)\} + \{R_h(t)\} \quad (12)$$

Menghitung elemen matrix konduktivias  $[k_c]$  dan vector aliran panas  $\{r_q\}$  diilustrasikan untuk elemen triangular dua dimensi dengan tiga node. Finite element triangular pada gambar 4.2. Distribusi tempertur  $T(x,y)$  didalam elemen triangular dideskripsikan sebagai interpolasi linear dari nodal values :

$$T(x, y) = N_1(x, y)T_1 + N_2(x, y)T_2 + N_3(x, y)T_3 \quad (13)$$

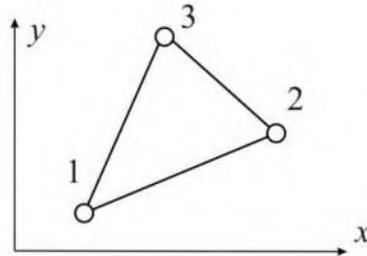
dimana,

$$N_i(x, y) = \alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y$$

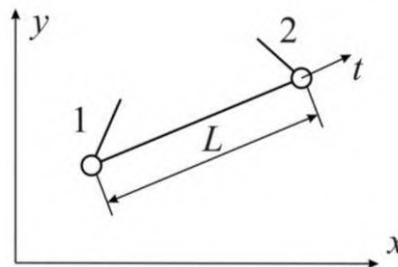
Fungsi interpolasi (biasa disebut shape function)  $N_i(x, y)$  harus dihitung menggunakan,

$$T(x_i, y_i) = T_i; \quad i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

Solusi persamaan system yang tersedia untuk shape function :



Gambar 4.2 Trianguler Finite Element



Gambar 4.3 Integrasi pada tiap elemen

$$N_i = \frac{1}{2\Delta} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (15)$$

dimana,

$$a_i = x_i + 1y_{i+2} - x_{i+2}y_{i+1},$$

$$b_i = y_{i+1} - y_{i+2},$$

$$c_i = x_{i+2} - x_{i+1},$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (x_2 y_3 + x_3 y_1 + x_1 y_2 - x_2 y_1 - x_3 y_2 - x_1 y_3),$$

dengan  $\Delta$  adalah elemen area

Matriks konduktivitas elemen triangular ditentukan oleh integrasi area elemen A (diasumsikan elemen memiliki unit ketebalan),

$$[k_c] = \int_A k [B]^T [B] dx dy \quad (16)$$

Matriks differential temperature  $[B]$  memiliki ekspresi

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Karena matriks differensial temperatur tidak bergantung pada koordinat, integrasi matrik konduktivitas disederhanakan ;

$$[k_c] = \frac{k}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 b_1 b_2 + c_1 c_2 b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 b_2^2 + c_2^2 b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 b_2 b_3 + c_2 c_3 b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Vektor aliran panas  $\{r_q\}$  dievaluasi oleh integrasi bagian elemen, yang ditunjukkan pada gambar 4.3.

$$\{r_q\} = - \int_L q_s [N]^T dL = - \int_0^1 q_s [N_1 N_2]^T L dt \quad (19)$$

Disini, integrasi elemen bagian L digantikan oleh integrasi menggunakan variable t dengan range 0 ke 1. Shape function  $N_1$  dan  $N_2$  pada bagian elemen 1-2 dapat ditunjukkan melalui t,

$$N_1 = 1 - t, \quad N_2 = t \quad (20)$$

Setelah integrasi dengan mensubstitusi batas integrasi, vector aliran panas menjadi,

$$\{r_q\} = -q_s \frac{L}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Elemen matriks dan vector dihitung untuk semua elemen di dalam mesh dan dimasukkan ke persamaan umum sistem. Setelah temperatur ditentukan, solusi persamaan umum sistem menghasilkan temperatur pada node

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

**LAMPIRAN 2**  
**Data Perubahan Suhu Rata-Rata**

Waktu (s)	Suhu Rata-Rata (K)
0	473
60	473.01253
120	473.01985
180	473.02493
240	473.02948
300	473.03402
360	473.03725
420	473.04029
480	473.04334
540	473.04638
600	473.04943
660	473.05181
720	473.05399
780	473.05617
840	473.05835
900	473.06052
960	473.0627
1020	473.06488
1080	473.06705
1140	473.06884
1200	473.07051
1260	473.07218
1320	473.07385
1380	473.07552
1440	473.07719
1500	473.07886
1560	473.08053
1620	473.08197
1680	473.08334
1740	473.08471
1800	473.08608
1860	473.08745

1920	473.08882
1980	473.09019
2040	473.09156
2100	473.09275
2160	473.09387
2220	473.095
2280	473.09613
2340	473.09726
2400	473.09838
2460	473.09951
2520	473.10064
2580	473.1017
2640	473.10273
2700	473.10374
2760	473.10473
2820	473.1057
2880	473.10665
2940	473.10758
3000	473.10849
3060	473.1094
3120	473.11029
3180	473.11116
3240	473.11202
3300	473.11287
3360	473.11369
3420	473.1145
3480	473.1153
3540	473.11609
3600	473.11686
3660	473.11763
3720	473.11838
3780	473.11911
3840	473.11984
3900	473.12054
3960	473.12124
4020	473.12193
4080	473.12261

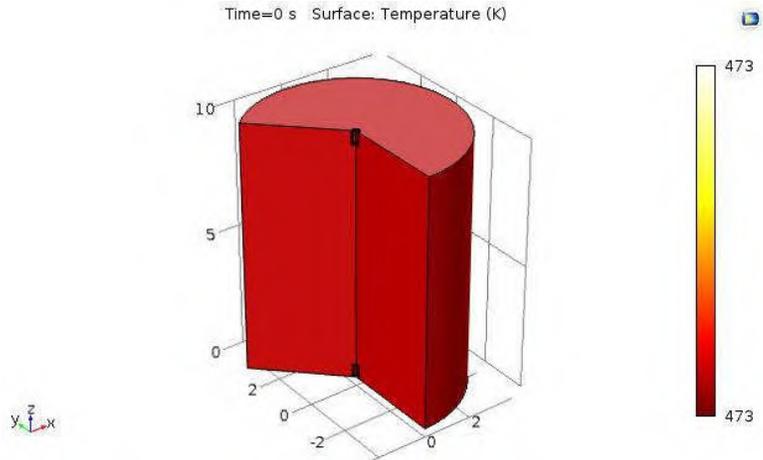
4140	473.12328
4200	473.12394
4260	473.12459
4320	473.12523
4380	473.12586
4440	473.12647
4500	473.12709
4560	473.12769
4620	473.12829
4680	473.12888
4740	473.12946
4800	473.13003

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

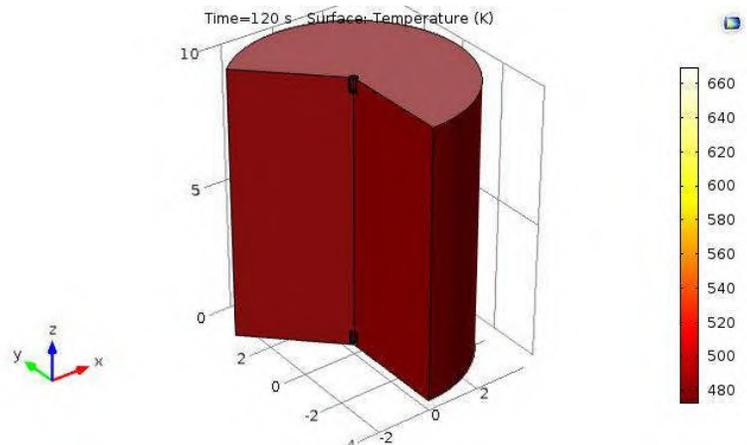
### LAMPIRAN 3

#### Hasil Simulasi *Heat Transfer*

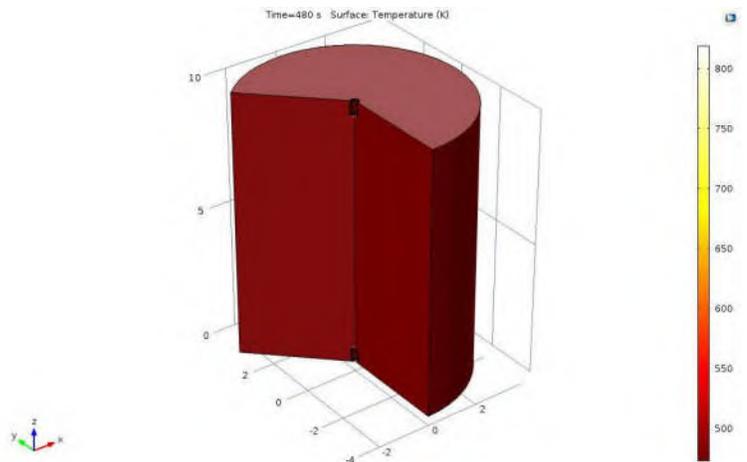
1. Waktu = 0 s



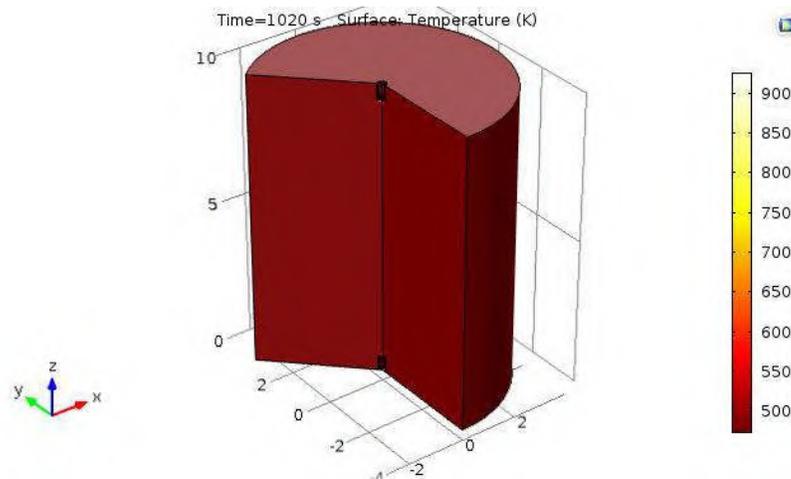
2. Waktu = 120 s



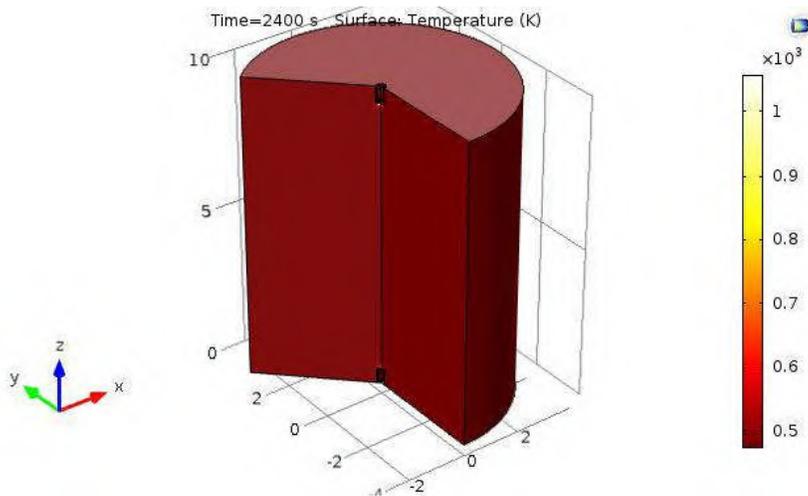
3. Waktu = 480 s



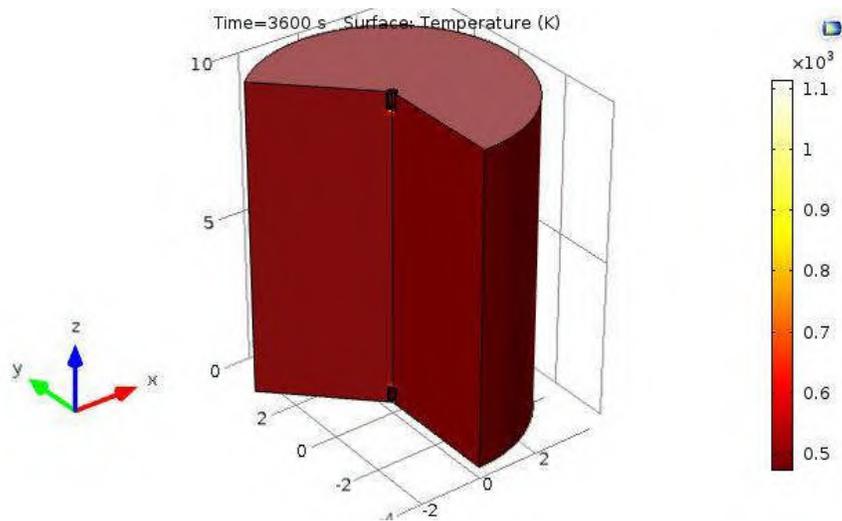
4. Waktu = 1020 s



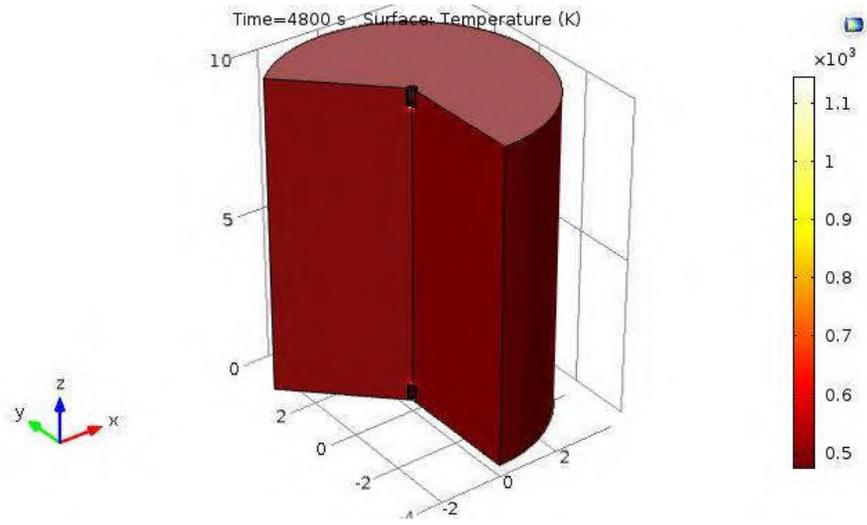
5. Waktu = 2400 s



6. Waktu = 3600 s



7. Waktu = 4800 s



*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN 4

### Data Perubahan Suhu Tiap Posisi

Waktu	0, 0,6	0,1	0,1,5	0,2	0,2,5	0,3	0,3,5	0,4	0,4,5	0,5
0 s	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9
	251.2	195.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8
60 s	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		195.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8
120 s	319.1	5	5	5	5	5	5	5	5	5
180 s	332	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1
240 s	449.1	208.9	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1
300 s	470.4	209.4	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1
360 s	487.6	211.2	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1
420 s	506.8	211.2	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1
480 s	524.6	227.5	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1
540 s	541.4	228.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5
600 s	559.2	228.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5
660 s	569.1	228.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5
720 s	571.5	232.3	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5
780 s	596.5	237.3	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5
840 s	609.3	239.1	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2
900 s	622.8	244.3	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1
960 s	631.3	248.7	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9
1020 s	646.4	253.1	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6
1080 s	656.8	253.1	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6
1140 s	660.5	258.6	214	214	214	214	214	214	214	214
1200 s	662.1	261.9	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2
1260 s	673.3	263.7	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2
1320 s	681.3	269.5	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6
1380 s	687.6	273.3	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8
1440 s	699.2	279.9	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5
1500 s	708.1	280.2	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9
1560 s	713.7	281.5	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8
1620 s	718.1	285.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9
1680 s	722.5	285.9	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8
1740 s	724.7	287	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8
1800 s	736.6	292.5	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1
1860 s	741.7	296.2	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9
1920 s	746.5	297	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1
1980 s	752.7	300.8	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1
2040 s	759.5	307.5	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2
2100 s	761.7	313.1	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2
2160 s	767.3	313.1	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2
2220 s	771.6	325.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2

2280 s	775.6	329.3	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2
2340 s	777	329.3	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5
2400 s	782	334.5	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3
2460 s	783.7	335.1	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9
2520 s	785.4	335.7	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5
2580 s	787.1	336.2	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1
2640 s	788.7	336.8	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6
2700 s	790.4	337.4	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2
2760 s	792.1	338	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8
2820 s	793.8	338.6	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3
2880 s	795.5	339.2	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9
2940 s	797.1	339.8	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5
3000 s	798.8	340.4	252	252	252	252	252	252	252	252
3060 s	800.5	341	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6
3120 s	802.2	341.6	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2
3180 s	803.9	342.1	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8
3240 s	805.5	342.7	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3
3300 s	807.2	343.3	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9
3360 s	808.9	343.9	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5
3420 s	810.6	344.5	256	256	256	256	256	256	256	256
3480 s	812.3	345.1	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6
3540 s	813.9	345.7	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2
3600 s	815.6	346.3	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7
3660 s	817.3	346.9	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3
3720 s	819	347.4	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9
3780 s	820.7	348	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5
3840 s	822.3	348.6	260	260	260	260	260	260	260	260
3900 s	824	349.2	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6
3960 s	825.7	349.8	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2
4020 s	827.4	350.4	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7
4080 s	829.1	351	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3
4140 s	830.7	351.6	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9
4200 s	832.4	352.2	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4
4260 s	834.1	352.8	264	264	264	264	264	264	264	264
4320 s	835.8	353.3	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6
4380 s	837.5	353.9	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2
4440 s	839.1	354.5	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7
4500 s	840.8	355.1	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3
4560 s	842.5	355.7	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9
4620 s	844.2	356.3	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4
4680 s	845.9	356.9	268	268	268	268	268	268	268	268
4740 s	847.5	357.5	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6
4800 s	862.2	358.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1

Waktu	0,5,5	0,5,5	0,6	0,6,5	0,7	0,7,5	0,8	0,8,5	0,9	0, 9,4
0 s	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9	195.9
	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	195.8	251.2
60 s	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6
	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	199.8	195.8	
120 s	5	5	5	5	5	5	5	5	5	319.1
180 s	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	332
240 s	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	208.9	449.1
300 s	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	209.4	470.4
360 s	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	211.2	487.6
420 s	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	200.1	211.2	506.8
480 s	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	202.1	227.5	524.6
540 s	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	228.5	541.4
600 s	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	228.5	559.2
660 s	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	206.5	228.5	569.1
720 s	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	232.3	571.5
780 s	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	207.5	237.3	596.5
840 s	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	208.2	239.1	609.3
900 s	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	209.1	244.3	622.8
960 s	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	248.7	631.3
1020 s	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	253.1	646.4
1080 s	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	212.6	253.1	656.8
1140 s	214	214	214	214	214	214	214	214	258.6	660.5
1200 s	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	261.9	662.1
1260 s	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	216.2	263.7	673.3
1320 s	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	217.6	269.5	681.3
1380 s	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	218.8	273.3	687.6
1440 s	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	219.5	279.9	699.2
1500 s	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	219.9	280.2	708.1
1560 s	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	222.8	281.5	713.7
1620 s	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	226.9	285.9	718.1
1680 s	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	285.9	722.5
1740 s	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	228.8	287	724.7
1800 s	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	230.1	292.5	736.6
1860 s	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	230.9	296.2	741.7
1920 s	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	297	746.5
1980 s	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	232.1	300.8	752.7
2040 s	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	307.5	759.5
2100 s	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	313.1	761.7
2160 s	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	313.1	767.3
2220 s	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	325.2	771.6
2280 s	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	239.2	329.3	775.6

2340 s	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	240.5	329.3	777
2400 s	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	246.3	334.5	782
2460 s	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9	335.1	783.7
2520 s	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5	335.7	785.4
2580 s	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	248.1	336.2	787.1
2640 s	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	248.6	336.8	788.7
2700 s	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	337.4	790.4
2760 s	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	249.8	338	792.1
2820 s	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	250.3	338.6	793.8
2880 s	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	250.9	339.2	795.5
2940 s	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	251.5	339.8	797.1
3000 s	252	252	252	252	252	252	252	252	252	340.4	798.8
3060 s	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	252.6	341	800.5
3120 s	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	341.6	802.2
3180 s	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	253.8	342.1	803.9
3240 s	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	254.3	342.7	805.5
3300 s	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	254.9	343.3	807.2
3360 s	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	255.5	343.9	808.9
3420 s	256	256	256	256	256	256	256	256	256	344.5	810.6
3480 s	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	256.6	345.1	812.3
3540 s	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	257.2	345.7	813.9
3600 s	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	257.7	346.3	815.6
3660 s	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	258.3	346.9	817.3
3720 s	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	258.9	347.4	819
3780 s	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	259.5	348	820.7
3840 s	260	260	260	260	260	260	260	260	260	348.6	822.3
3900 s	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	260.6	349.2	824
3960 s	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2	349.8	825.7
4020 s	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	261.7	350.4	827.4
4080 s	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	351	829.1
4140 s	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	262.9	351.6	830.7
4200 s	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	263.4	352.2	832.4
4260 s	264	264	264	264	264	264	264	264	264	352.8	834.1
4320 s	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	264.6	353.3	835.8
4380 s	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	265.2	353.9	837.5
4440 s	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	265.7	354.5	839.1
4500 s	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	266.3	355.1	840.8
4560 s	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	355.7	842.5
4620 s	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	267.4	356.3	844.2
4680 s	268	268	268	268	268	268	268	268	268	356.9	845.9
4740 s	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	268.6	357.5	847.5
4800 s	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	269.1	358.1	862.2

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan analisa dan pembahasan dapat disimpulkan:

1. Pemodelan pemanasan *crude oil* dengan dual sumber gelombang mikro secara komputasi dapat disimulasikan dengan baik dengan metode FEM, yaitu dengan nilai error 0,91%.
2. Hasil simulasi pemanasan *crude oil* dengan dual sumber gelombang mikro menunjukkan model distribusi suhu dengan bentuk grafik polinomial dengan sebaran medan elektrik konstan.

#### **5.2 Saran**

Untuk penelitian lebih lanjut tentang pemodelan pemanasan *crude oil* menggunakan sumber gelombang mikro dengan metode FEM dapat dilakukan dengan menambahkan sumber pemanasan dan waktu pemanasan agar menjangkau setiap sudut reservoir. Selain itu, untuk aplikasi dalam gelombang mikro pada pemanasan *crude oil* dapat mempertimbangkan karakteristik dari sumur bor. Hal ini mengingat sumur bor terbuat dari logam sehingga ketika gelombang mikro merambat dalam *crude oil* maka hasil pantulan dari dinding sumur dapat digunakan kembali untuk memanaskan *crude oil*. Akibatnya, pemanasan *crude oil* dapat dilakukan secara efisien.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, M. M., & Meribout, M. (2014). Antenna Array Design for Enhanced Oil Recovery Reservoir Constraints with Experimental Validation. *Energy Vol.66* , 868-880.
- Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis Arena*. Boston, USA: Elsevier.
- Basak, T. (2004). Role of Resonances on Microwave Heating of Oil–Water Emulsions. *American Institute of Chemical Engineers, Volume 50, Issue 11* , 2659–2675.
- Bientinesia, M., Petarcab, L., Cerutti, A., Bandinelli, M., De Simoni, M., Manottid, M., et al. (2013). A Radio Frequency/Microwave Heating Method for Thermal Heavy Oil Recovery Based on A Novel Tight-Shell Conceptual Design. *Journal of Petroleum Science and Engineering* , 18-30.
- Chen, H., Tang, J., & Fang, L. (2007). Coupled simulation of electromagnetic heating process using the finite difference time domain method. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy Vol.41* , 50-68.
- Cherbański, R., & Rudniak, L. (2013). Modelling of microwave heating of water in a monomode applicator – Influence of operating conditions. *International Journal of Thermal Sciences Volume 74* , 214–229.
- Dewita, E., Priambodo, D., & Ariyanto, S. (2013). enentuan Jarak PLTN dengan Sumur Minyak untuk Enhanced Oil Recovery (EOR) Ditinjau dari Aspek Kehilangan Panas dan Keselamatan. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Volume 15, Nomor 2* , 127-137.
- Dielectric-Physics*. (2016). Retrieved March 22, 2016, from Ensiclopedia Britanica: <http://www.britannica.com/science/dielectric>
- ESDM. (2006). *Peraturan Presiden No.5 2006*. Retrieved Maret 1, 2016, from MINERBA ESDM: [http://www.minerba.esdm.go.id/library/sijh/perpres\\_05\\_2006.pdf](http://www.minerba.esdm.go.id/library/sijh/perpres_05_2006.pdf)
- ESDM. (2014, Agustus). *Produksi Minyak Bumi*. Retrieved Maret 16, 2016, from Pusat Data dan Teknologi Informasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral: <http://kip.esdm.go.id/pusdatin/index.php/data-informasi/data-energi/minyak-dan-gas-bumi/produksi-minyak-bumi-dan-kondensat-indonesia>
- Farag, S., Sobhy, A., Akyel, C., Doucet, J., & Chaou, J. (2012). Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45 GHz. *Applied Thermal Engineering Vol. 36* , 360-369.
- FEMLAB. (2004). Electromagnetics Module Model Library. p. 32.

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2008). *Fundamental of Physics, 8th Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Hil, J. M., & Marchant, T. R. (1996). Modelling microwave heating. *Applied Mathematical Modelling Volume 20, Issue 1* , 3–15.
- Hund, E. (1989). *Microwave Communications components and circuit*. New York: Mc Graw-Hill.
- Hutagaol, N. (2009). *Tugas Akhir: Studi Pengaruh Kadar Hidrogen Sulfida Yang Terdapat pada Minyak Bumi dalam Proses Pengolahan di PT. Pertamina EP Region Sumatra Field Pangkalan Susu*. Medan: Universitas Sumatra Utara.
- Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics, 3rd Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Law, M., Liew, E., Chang, S., Chan, Y., & Leo, C. (2016). Modelling microwave heating of discrete samples of oil palm kernels. *Applied Thermal Engineering Volume 98* , 702–726.
- Lewis, R. W., Nithiarasu, P., & Seetharamu, K. N. (2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. London, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- M. Hill, J., & J. Jennings, M. (1993). Formulation of model equations for heating by microwave radiation. *Applied Mathematical Modelling Volume 17, Issue 7* , 369–379.
- Micro Denshi Co., L. (2010). *Microwave Device*. Retrieved April 18, 2016, from Micro Denshi Co.,Ltd.: <http://www.microdenshi.co.jp/en/device/>
- Muntini, M. S., Pramono, Y. H., & Yustiana. (2014). Modeling of Well Drilling Heating on Crude Oil Using Microwave. *The 4th International Conference on Theoretical and Applied Physics (ICTAP) 2014* (pp. 030011-2-030011-7). Bali, Indonesia: American Institute of Physics.
- Mutyala, S., Fairbridge, C., Paré, J., Bélanget, J., & Hawkins, R. (2010). Microwave application to oil sand and petroleum : A review. *Fuel Processing Technology* , 127-135.
- Nour, H. A., Yunus, R., & Nour, . H. (2010). Demulsification of Water-in Oil Emulsion by Microwave Heating Technology. *World Academy of Science, Engineering and Technology Vol.4* .
- Ratanadecho, P., Aoki, K., & Akahori, M. A. (2002, March). A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effects of natural convection and dielectric properties). *Applied Mathematical Modelling Volume 26, Issue 3* , 449–472.
- Sajjadi, B. A. (2014). Investigation, modellingn and reviewing the effective parameters in microwave-assisted transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Review Vol. 37* , 762-777.

- Salvi, D., Boldor, D., Ortego, Aita, G., & Sabliov, C. (2010). Numerical Modelling of Continuous Flow Microwave Heating: A critical Comparison of COMSOL and ANSYS. *Microwave Power Electromagnetic Energy* , Vol. 44, Hal. 187-197.
- Spight, J. (2001). *Handbook of petroleum analysis*. New Jersey: Jhon Wiley and Son, INC.
- Wang, T., Zhao, G., & Qiu, B. (2015). Theoretical Evaluation of The Treatment Effectiveness of A Novel Coaxial Multi-Slot Antenna for Conformal Microwave Ablation of Tumors. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 81-91.
- Wei, W. W. (2006). *Time Series Analysis Univariate and Multivariate Methods, 2nd Edition* . Boston: Pearson Addison Wesley.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## TENTANG PENULIS

Neny Kurniawati dilahirkan di Bantan pada 21 Maret 1989, anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Pauzi Thalhah dan Rusmiati. Riwayat pendidikan penulis:

- Tahun 1994-2000: SDN Mandomai 3, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah.
- Tahun 2000-2003: SMPN 1 Kapuas Barat, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah
- Tahun 2003-2006: SMAN 3 Kuala Kapuas, Kabupaten Kapuas, Kalimantan tengah
- Tahun 2006-2011: Program Studi S1 Fisika, FMIPA, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan
- Tahun 2013-2014: Program Pra-S2 Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur
- Tahun 2014-2016: Program Magister Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur

Kontak surat menyurat penulis: Komplek Bukit Sirkuit Damai Blok G No 233, Banjarbaru, Kalimantan Selatan. Email: [nenyphysics@windowslive.com](mailto:nenyphysics@windowslive.com).