

TESIS SF-142502

MODEL PEMANASAN CRUDE OIL DENGAN SUMBER GELOMBANG MIKRO PADA RESERVOIR

UMMU KALSUM NRP. 1113201047

DOSEN PEMBIMBING Dr. Melania Suweni Muntini, MT. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER BIDANG KEAHLIAN INSTRUMENTASI JURUSAN FISIKA FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2015



THESIS SF-142502

MODELLING OF CRUDE OIL HEATING WITH MICROWAVE SOURCE IN RESERVOIR

UMMU KALSUM NRP. 1113201047

SUPERVISOR Dr. Melania Suweni Muntini, MT. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

MAGISTER PROGRAM INSTRUMENTATION DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCE INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2015 Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

UMMU KALSUM NRP. 1113201047

oleh :

Tanggal Ujian : 2 Juli 2015 Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh:

1. Dr. Melania Suweni Muntini, MT. NIP. 19641229 199002 2 001

2. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng. NIP. 19690904 199203 1 003

(Pembimbing II)

(Pembimbing I)





3. Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si. NIP. 19750205 199903 1 004

(Penguji I)

4. Dr.rer.nat. Bintoro Anang Subagyo, M.Si. NIP. 19790719 200501 1 015

(Penguji II)

Direktur Program Pascasajana,

KNOLOG OGISE

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. NIP. 19640405 199002 1 001

MODEL PEMANASAN CRUDE OIL DENGAN SUMBER **GELOMBANG MIKRO PADA RESERVOIR**

Nama Mahasiswa NRP

: Ummu Kalsum : 1113201047 Dosen Pembimbing : Dr. Dra. Melania Suweni Muntini, MT Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng

ABSTRAK

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanasan crude oil di Indonesia dilakukan dengan memanfaatkan bahan bakar fosil, 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. Sebuah studi pemodelan pemanasan crude oil dengan sumber gelombang mikro pada reservoir telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan propagasi gelombang mikro dan tansfer panas pada reservoir crude oil. Simulasi perambatan gelombang mikro dan perpindahan panas divisualisasikan menggunakan Visual Basic 6.0 dengan metode FDTD (Finite Differrence Waktu Domain). Distribusi crude oil pada seluruh permukaan reservoir diasumsikan homogen sehingga hasil simulasi disajikan dalam bentuk dua dimensi. Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan, yaitu simulasi perambatan gelombang mikro dan simulasi perpindahan panas. Pemanasan crude oil menggunakan magnetron sebagai generator dari gelombang mikro dengan frekuensi operasional 2,45 GHz. Gelombang mikro dipandu dalam sebuah pandu gelombang rectangular dengan modus TM₁₁. Reservoir dengan ukuran 10 x 10 m² memiliki konstanta dielektrik 4,09 dengan loss dielektrik 0,007 dan crude oil memiliki konstanta dielektrik dan loss dielektrik masing-masing 2,8 dan 0,15. Konstanta propagasi gelombang mikro diperoleh berdasarkan karakteristik reservoir sebesar $\gamma = (0.04 + i50.33)m^{-1}$. Simulasi dijalankan menggunakan pulsa Gaussian dengan variasi parameter waktu dan posisi koordinat. Berdasarkan hasil simulasi, model distribusi temperatur yang diperoleh adalah $T(t) = 0.2262e^{(0.0101t)}$ untuk variasi waktu dan $T(r) = 531.24e^{(-0.03r)}$ untuk variasi koordinat posisi.

Kata kunci: crude oil, perambatan gelombang mikro, perambatan panas, FDTD, waktu, koordinat posisi, simulasi.

MODELLING OF CRUDE OIL HEATING WITH MICROWAVE SOURCES IN RESERVOIR

Student name: Ummu KalsumStudent Number Identify: 1113201047Supervisor: Dr. Dra. Melania Suweni Muntini, MT.
Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

ABSTRACT

In recent years, the heating of crude oil in Indonesia is done by fossil fuels, which has been known that fossil fuels are limited nonrenewable energy sources. One of alternative heating methods can be performed by using microwaves. A modelling study of the heating crude oil with a microwave sources fixed in the reservoir has been created. This study aims to simulate the microwave propagation and heat tansfer on the crude oil reservoir. The simulation of microwave propagation and heat transfer visualized by Visual Basic 6.0 with FDTD method (Finite Differrence Time Domain). The distribution of crude oil on the entire surface of the reservoir assumed homogeneously so that the simulation results presented in the two-dimensional form. The study conducted in two phases, namely microwave propagation simulation and heat transfer simulation. The heating of crude oil using a magnetron as the microwave generator with operating frequency of 2.45 GHz. The microwave guided by rectangular waveguide with TM₁₁ mode. The reservoir with size 10 x 10 m2 has the dielectric constant 4.09 and the dielectric loss 0.007 and the crude oil has the dielectric constant and dielectric loss 2.8 and 0.15, respectively. The constant of microwave propagation $\gamma = (0.04 + j50.33)m^{-1}$ obtained from characteristics of the reservoir. The simulation run by Gaussian pulse with the parameter variation of time and position coordinate. Based on the simulation results, the temperature distribution models are $T(t) = 0.2262e^{(0.0101t)}$ for time variation and $T(r) = 531.24e^{(-0.03r)}$ for the variation of position coordinate.

Keywords: *crude oil*, microwave propagation, heat transfer, FDTD, simulation, position coordinat, time.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul:

"MODEL PEMANASAN CRUDE OIL DENGAN SUMBER GELOMBANG MIKRO PADA RESERVOIR ".

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) Jurusan Fisika Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tesis ini dapat terselesaikan berkat bantuan, arahan, bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

- Ayahanda dan ibunda tercinta (Ansar & Suhuria) yang telah mendidik dan membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang, ketulusan, kesabaran, dan pengorbanan yang tidak terbalaskan. Berkat doa, dan sujud panjang beliau sehingga penulis mampu melewati setiap langkah dalam menempuh jenjang pendidikan magister. Terima kasih buat adik-adikku yang tersayang, Usman Ansar, Miftahul Jannah, Nurul Hidayah, Nasrullah, Mukhlis Ainun Akmal, Khusnul Auliyah, Misbahul Akhyar yang senantiasi memberikan doa, dan inspirasi yang tiada henti kepada penulis.
- Ibu Dr. Melania Suweni Muntini, MT selaku dosen wali, dan pembimbing yang telah memberikan nasehat, arahan, ilmu, semangat, dan bimbingan kepada penulis selama proses perkuliahan dan penyusunan tesis.
- Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan nasehat, arahan, ilmu, dengan penuh kesabaran selama proses penyusunan tesis.
- Bapak Dr.rer. nat Eko Minarto, M.Si dan Dr.rer.nat. Bintoro Anang Subagyo, M.Si. selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu dalam memberikan saran dan masukan demi kesempurnaan tesis ini.
- Para Pimpinan, staf pengajar, staf tata usaha akademi ITS, khususnya jurusan Fisika ITS atas layanan yang diberikan selama proses perkuliahan

- DIKTI selaku pemberi beasiswa yang telah memberikan kesempatan kepada penulis dalam mengikuti progam PRA-S2 SAINTEK dan menyelesaikan studi program Magister (S2) Fisika FMIPA ITS Surabaya.
- Teman-teman di lab. Instrumen dan Optoelektronika (Mas rudi, Mas hendra, Mas Isa, mbak yustiana, Mas Adi, Haerul Ahmadi, Okta, Hadisan, Pak Richard atas diskusi dan kebersamaannya selama ini.
- 8. Bapak Rohim, bapak Arifin dan ibu Mutmainna yang telah berbagi ilmu dan pengetahuan seta diskusi terkait topik penelitian.
- 9. Sahabat-sahabat seperjuangan Pra-S2 dan S2 (ayu, anti, nurul, keysia, kk helga, kk lina, ian, ros, dan teman-teman S2 angkatan 2013 yang namanya tidak dapat disebutkan satu persatu). Keterbukaan kalian menerimaku sebagai sahabat membuat keberadaanku menjadi lebih berarti.
- 10. Andi Quraisy S.Si, M.Si yang senantiasa memberikan motivasi dan inspirasi selama menjalani hari-hari di tanah rantau Surabaya. Terima kasih atas segala rasa yang kau cipta dalam momentum kehidupanku.
- 11. Teman-teman seperantaun di R6 (Iwan, Asri, Zul, Iccank, mbak lia, arni, dilla, yuli, ifan, alfi, Arul, Edi), Radar (asra, uni, winda) dan Rudal (madi, yos, kak ichsan, ippang dan aan). Terima kasih telah mewarnai hari-hariku yang penuh suka dan duka selama berada di kota perjuangan Surabaya.
- 12. Semua pihak yang telah banyak membantu selama prose penyusunan tesis yang namanya tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih terdapat banyak kekurangannya sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan pengembangan pengetahuan dan teknologi. Aamiin.

Surabaya, Agustus 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	Х
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
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	
2.1 Gelombang Mikro	7
2.2 Crude Oil	9
2.3 Viskositas Crude oil	10
2.4 Pemanasan Gelombang Mikro	11
2.5 Aliran Panas Dalam Pemanasan Gelombang Mikro	13
2.6 Sifat Dielektrik	15
2.7 Metode Pemodelan Komputasi	20
2.8 Metode FDTD	23
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Perangkat dan Bahan	32
3.2 Diagram Alir Penelitian	32
3.3 Studi Literatur	33
3.4 Metode Pemodelan	34
3.5 Penetuan Pemodelan	34

3.6 Langkah-Langkah Pemodelan Secara Numerik	35
3.7 Pembuatan Simulasi	39
3.8 Pengujian Model dan Analisa Error	40
3.9 Final Model	41
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Perbandingan hasil simulasi gelombang mikro dan kalor	41
4.2 Variasi Parameter Waktu	43
4.3 Variasi Koordinat Posisi	48
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	57
TENTANG PENULIS	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Band gelombang mikro dalam rentang frekuensi	7
Tabel 4.2 Pengaruh waktu terhadap suhu crude oil	44
Tabel 4.3 Pengaruh jarak dari pusat terhadap suhu crude oil	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Daerah frekuensi dan panjang gelombang dari gelombanga mikro	7
Gambar 2.3 Pengaruh suhu terhadap viskositas minyak	10
Gambar 2.4.1 Mode gelombang TE	12
Gambar 2.4.2 Mode gelombang TM	12
Gambar 2.5. Pemanasan dengan sumber gelombang mikro di dekat reservoir	13
Gambar 2.6. Bentuk imajinear dan real dari $\in (\omega)$	19
Gambar 2.7. Grid posisi sistem dua dimensi	22
Gambar 2.8 Grid Algoritma Yee tiga dimensi	24
Gambar 2.9 Penyisipan medan E dan H dalam ruang dan waktu	25
Gambar 2.10 Penyisipan medan E dan H untuk mode TM dua dimensi	29
Gambar 3.1 Dimensi Cavity dari Crude oil	32
Gambar 3.3 Bagan Alir Penelitian	33
Gambar 3.5 Diagram Alir simulasi	38
Gambar 4.1 Simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor	41
Gambar 4.2.1 Pengaruh waktu pemanasan terhadap suhu crude oil	44
Gambar 4.2.2 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = $100 \dots$	45
Gambar 4.2.3 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = $150 \dots$	46
Gambar 4.2.4 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = $200 \dots$	46
Gambar 4.2.5 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = $300 \dots$	47
Gambar 4.2.6 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = $350 \dots$	47
Gambar 4.3.1 Pengaruh jarak dari Pusat terhadap suhu crude oil	49
Gambar 4.3.2 Simulasi dengan koordinat posisi (110,110)	50
Gambar 4.3.3 Simulasi dengan koordinat posisi (120,120)	50
Gambar 4.3.4 Simulasi dengan koordinat posisi (130,130)	51
Gambar 4.3.5 Simulasi dengan koordinat posisi (140,140)	51

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 (Penentuan Frekuensi Cut-Off)	59
LAMPIRAN 2 (Perhitungan Konstanta Propagansi)	61
LAMPIRAN 3 (Hasil Simulasi Perambatan Panas dan perambatan	
gelombang mikro)	63
LAMPIRAN 4 (Sintaks Program Visual Basic)	70

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan ekonomi suatu negara tidak terlepas dari suplay energi yang digunakan dalam menjalankan serangkaian proses industri baik secara operasional maupun non-operasional. Untuk negara berkembang seperti Indonesia, pemenuhan kebutuhan energi baik aktifitas produksi maupun kegiatan pemenuhan energi publik sebagian besar masih menggandalkan minyak bumi sebagai sumber energi. Meskipun telah muncul energi terbarukan sebagai pendatang baru dalam sumber energi nasional, namun penggunaannya masih 5%. Ketergantungan terhadap minyak bumi ini sebagai penyuplai energi memberikan permasalahan serius bagi permasalahan global.

Minyak bumi merupakan sumber energi yang tak terbarukan karena berasal dari penguraian senyawa-senyawa organik dari jasad mikroorganisme pada jutaan tahun yang lalu di dasar lautan. Pemanfaatan minyak bumi sebagai sumber energi nasional dalam kurung waktu yang lama tentunya menyebabkan cadangan bahan bakar fosil ini semakin menipis. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa dari tahun ke tahun produksi minyak Indonesia mengalami penurunan. Pada tahun 1996 produksi minyak mentah Indonesia mencapai 485.573,80 barel sedangkan pada tahun 2012 mengalami kemunduran menjadi 279.412,10 barel. Hal ini menyebabkan Indonesia harus melakukan impor minyak untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (http://www.bps.go.id).

Merosotnya produksi bahan bakar fosil minyak Indonesia sebagai bentuk peningkatan kebutuhan energi disebabkan semakin tuanya ladang-ladang minyak yang ada di Indonesia. Kondisi ini diperparah karena tidak adanya penemuan cadangan minyak bumi baru dalam jumlah besar. Akibatnya, Indonesia hanya mengeruk cadangan minyak bumi yang ada. Karena hanya bergantung pada ladang minyak bumi yang ada maka dibutuhkan sebuah inovasi teknologi untuk meningkatkan produksi minyak.

Peningkatan produksi minyak bumi tidak terlepas dari proses pemanasan minyak bumi pada proses industri perminyakan. Istilah untuk minyak bumi yang

masih mentah disebut *crude oil*. Selama ini sejumlah industri pengeboran minyak bumi masih menggunakan metode konvensional. Metode konvensional yang dimaksud adalah metode pemanasan minyak bumi dengan menggunakan bahan bakar fosil, misalnya dengan metode s*team injection*. Steam injection merupakan proses memanaskan *crude oil* dengan cara mengalirkan uap panas ke dalam sumur minyak. Tujuan dari pemanasan *crude oil* ini adalah untuk menurunkan nilai viskositas minyak sehingga memiliki mobilitas yang tinggi dan pendesakan minyak yang lebih efektif. Akan tetapi, kelemahan dari metode s*team injection* adalah adanya kehilangan panas dalam proses transmisi dan biaya untuk sumur produksi cukup besar karena menggunakan bahan bakar fosil sehingga masih kurang efektif (Erlan Dewita, dkk, 2013).

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

Sebuah studi eksperimental yang membandingkan penggunaan gelombang elektromagnetik terhadap peningkatan *enhanced oil recovery* (EOR). Dari dua sampel yang diujikan, satu sampel diletakkan dalam wadah tanpa gelombang elektromagnetik (sampel-A) sedangkan sampel lainnya diletakkan dalam wadah dekat antena dengan frekuensi kerja 50 Mhz dan tegangan peak to peak 10 V (sampel-B). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sampel-A pada suhu kamar diperoleh 7.66% OOIP setelah dipanasi pada suhu 55°C nilai *enhanced oil recovery* menjadi 23.15% OOIP. Sementara sampel-B pada suhu kamar diperoleh 10.60% OOIP setelah dipanasi pada suhu 55°C nilai *enhanced oil recovery* menjadi 23.15% OOIP. Hal ini menunjukkan peningkatan nilai *enhanced oil recovery* dengan menggunakan gelombang elektromagnetik lebih besar dibandingkan tanpa gelombang elektromagnetik (Kashif, dkk, 2011).

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,

2

mengurangi kehilangan panas ketika melewati *overburden* (Bientinesi, dkk, 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 dan Rudniak, 2013)

Menurut Hill dan Jenning (1993), 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 factor dielectric*.

Untuk memprediksi pemanfaatan gelombang mikro dalam memanaskan *crude oil* pada skala industri pengeboran maka diperlukan sebuah model transfer kalor pada pemanasan *crude oil* pada reservoir. Model pemanasan dengan gelombang mikro ini didasarkan pada sifat dielektrik. Sebuah penelitian terkait dengan memanfaatkan gelombang mikro melalui pemodelan pada bahan kristal inorganik (KRS5), KRS6, Resinox 10231, Steatite 7292 dan mika dilakukan Hill dan Jenning (1993). Selanjutnya dengan sumber energi gelombang mikro, Hill dan Marchant melakukan penelitian pada bahan silika dan mika.

Untuk bahan fluida, Cherbański dan Rudniak(2013) melakukan pemodelan pemanasan gelombang mikro pada air. Namun, dengan bahan yang berbeda Ratanadecho, dkk (2002) melakukan studi pemanasan gelombang mikro secara numerik dan eksperimen pada air murni dan air garam. Selanjutnya untuk bahan yang serupa, Salvi, dkk (2010) meneliti pemodelan pemanasan gelombang gelombang mikro untuk kasus aliran kontinyu.

Khusus untuk bahan *crude oil*, penelitian terkait dilakukan Santos dkk (2011) dengan sumber gelombang mikro yang diletakkan di reservoir yang berbentuk silinder dengan analisis distribusi kalor menggunakan metode *moment*. Penelitian terkait dengan sumber gelombang mikro pada reservoir dilakukan Abdurrahman dan Merribout (2014), hanya saja bentuk reservoir berupa kotak dengan analisis distribusi kalor menggunakan metode *COMSOL*.

Dalam penelitian ini, peneliti bermaksud mengkaji model pemanasan transfer kalor pada bahan *crude oil* dengan menggunakan sumber gelombang mikro yang diletakkan di dasar sumur bor (pada reservoir) agar energi gelombang mikro untuk mencapai *crude oil* pada daerah reservoir lebih efektif. Distribusi kalor dan perambatan gelombang mikro menggunakan metode FDTD dua dimensi. Dengan demikian, berdasarkan uraian di atas maka dirancang sebuah penelitian tentang pemodelan pemanasan *crude oil* dengan menggunakan gelombang mikro pada reservoir.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

- 1. Bagaimana model perpindahan panas secara komputasi pada pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro pada reservoir ?
- 2. Bagaimana model perambatan gelombang mikro secara komputasi pada pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro pada reservoir?

1.3 Batasan Masalah

Batasan permasalahan pada penelitian ini adalah:

- 1. Diasumsikan reservoir berbentuk kotak
- Pandu gelombang yang digunakan berbentuk rectangular dengan modus TM₁₁.
- 3. Meode FDTD yang digunakan adalah bentuk dua dimensi
- 4. Diasumsikan dinding reservoir merupakan pemantul yang sempurna
- 5. Diasumsikan crude oil bersifat homogen

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- 1. Membuat pemodelan perpindahan panas pada *crude oil* dengan sumber gelombang mikro pada reservoir secara komputasi.
- 2. Membuat pemodelan perambatan gelombang mikro pada *crude oil* pada reservoir secara komputasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitin ini adalah dapat memberikan pengetahuan tentang pemodelan perpindahan panas dan perambatan gelombang mikro secara komputasi

pada pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro di reservoir. Diharapkan dengan mengetahui model dan simulasi pemanasan *crude oil* dengan gelombang mikro maka dapat diaplikasikan pada skala indusri pengeboran kilang minyak.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA

2.1 Gelombang Mikro

Gelombang mikro merupakan gelombang elektromagnetik dengan rentang frekuensi 1.12 - 40 GHz dan panjang gelombang sekitar 1 mm sampai 1 m.



Gambar 2.1 Daerah frekuensi dan panjang gelombang dari gelombang mikro (Sajjadi dkk, 2014).

Dalam spektrum radiasi gelombang elektromagnetik, gelombang mikro terletak dalam daerah radiasi antara gelombang radio dan gelombang *infrared* (Sajjadi dkk, 2014).

Menurut, I.E.E.E dalam Hund, Edgar. (1989) pita gelombang mikro dibagi dalam 12 daerah pita dengan rentang frekuensi sebagaimana ditunjukkan dalam tabel berikut:

Band (pita)	Rentang frekuensi (GHz)
HF	0.003-0.030
VHF	0.030-0.300
UHF	0.300-1.00

Tabel 2.1 Band gelombang mikro dalam rentang frekuensi

Band (pita)	Rentang frekuensi (GHz)
L	1.00-2.00
S	2.00-4.00
С	4.00-8.00
X	8.00-12.00
Ku	12.0-18.0
K	18.0-27.0
Ka	27.0-40.0
Millimeter	40.0-300.0
Submillimeter	Lebih dari 300

Gelombang mikro dihasilkan 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, dkk, 2010)

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, dkk, 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,dkk, 2014).

2.2 Crude oil

Berdasarkan Undang-undang nomor 22 tahun 2001 tentang minyak dan gas bumi menyatakan bahwa :

"minyak bumi adalah hasil proses alami berupa hidrokarbon yang dalam kondisi tekanan dan temperatur atmosfer berupa fasa cair atau padat, termasuk aspal, lilin mineral atau ozokerit, dan bitumen yang diperoleh dari proses penambangan, tetapi tidak termasuk batubara atau endapan hidrokarbon lain yang berbentuk padat yang diperoleh dari kegiatan yang tidak berkaitan dengan kegiatan usaha Minyak dan Gas Bumi".

Sedangkan dalam kamus minyak dan gas bumi, minyak bumi atau *crude oil* adalah campuran berbagai hidrokarbon yang terdapat dalam bentuk fase cair 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 atas senyawa hidrokarbon 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, aromat, 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, nitroge

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)

2.3 Viskositas Crude oil

Viskositas merupakan gesekan internal fluida. Gaya viskos melawan gerakan sebagaian fluida relatif terhadap yang lain. Fluida viskos cenderung melekat pada permukaan padat yang bersentuhan dengannya. Fluida yang mengalir dengan mudah memiliki viskositas yang lebih kecil daripada cairan "kental". Untuk seluruh jenis fluida, besarnya viskositas bergantung pada suhu. (Young dan Freedman, 2002)

Sebuah studi tentang pengaruh suhu terhadap viskositas minyak yang dilakukan oleh Barillas, dkk (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 2.2 Pengaruh suhu terhadap viskositas minyak (Barillas, dkk, 2008)

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

2.4 Pemanasan Gelombang Mikro

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

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{2.1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \tag{2.2}$$

$$\nabla \boldsymbol{D} = \boldsymbol{\rho}_{\boldsymbol{v}} \tag{2.3}$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0 \tag{2.4}$$

Dimana : E adalah kuat medan listrik (V/m), D adalah kerapatan fluks arus listrik (C/m²), J adalah kerapatan arus listrik (A/m²), H adalah kuat medan magnet (A/m), B adalah kerapatan fluks magnet (Wb/m²), ε adalah permitivitas listrik, ρ_v adalah rapat muatan.

Untuk fluks daya dari propagansi gelombang mikro dinyatakan dengan :

$$S = \frac{1}{2}R_e(E \times H^*) \tag{2.5}$$

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 :

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

Dimana E_{yin} adalah nilai intensitas medan listrik input, Z_H adalah impedansi gelombang, dan A adalah luas bidang. (Ratanadecho, dkk, 2001)

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, diektrik ataupun dalam kondisi vakum.

Pada pandu gelombang , mode pandu 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 berikut :



Gambar 2.3 mode gelombang TE .(Hund, Edgar, 1989)

Sedangkan *Tranverse magnetic* (TM) adalah gelombang yang medan magneknya 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 berikut :



Gambar 2.4 mode gelombang TM.(Hund, Edgar, 1989)

Untuk variasi nilai dari mode TE dan TM maka dinyatakan dalam bentuk $TE_{m,n}$ dan TM_{*m*,*n*}. (Hund, Edgar, 1989)

2.5 Aliran Panas dalam pemanasan gelombang mikro

Secara prinsipal mekanisme pemanasan gelombang mikro melibatkan proses agitasi molekul polar yang menyebabkan terjadinya osilasi medan listrik (pada bahan non-magnetik). Kehadiran osilasi medan membuat dipol molekul bereorientasi 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 (Farag, dkk, 2012).





(Farag, dkk, 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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\nabla T = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c_p}$$
(2.7)

Dimana , ρ adalah densitas bahan (kg/m³), C_p adalah kalor jenis (J/kg.K), k adalah konduktivitas kalor (W/mk), T adalah temperatur (K), ν adalah kecepatan fluida

(m/s), Q adalah kalor volumetrik sebagai akibat gelombang datang (W/m³) (Salvi, dkk, 2010).

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

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' |E|^2 \tag{2.8}$$

dimana ε_0 adalah permitivitas bahan di udara, ε' adalah konstanta dielektrik cairan f adalah frekuensi, $|E|^2$ adalah amplitudo medan listrik. Setelah kalor merambat pada *crude oil* persaman kalor menjadi :

$$Q = hA(T_f - T_i) \tag{2.9}$$

Dengan h merupakan koefisien transfer kalor. Dalam penelitian nilai h yang digunakan untuk crude oil sebesar 300 Wm⁻²k⁻¹. Persamaan ini menggambarkan besarnya kalor pada crude oil dalam suatu luasan wilayah dari reservoir pada selisih suhu tertentu. $(T_f - T_i)$ menyatakan selisih suhu pada setiap langkah waktu pemanasan. (Chen, Hao dkk, 2007)

Pada dasarnya parameter yang menyatakan besarnya heat generation yang dihasilkan sebagai akibat dari penyerapan gelombang mikro adalah permitivitas. Tanpa adanya pengaruh sifat magnetik yang signifikan, maka besaran permitivitas merupakan bentuk kompleks yang dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2.10}$$

Dimana ε' merupakan konstanta dielektrik dan ε'' merupakan faktor loss. Dari besaran permitivitas, bagian yang menunjukkan peranan dalam menyerap gelombang mikro adalah bagian imajinear. Pada dasarnya permitivitas berkaitan dengan kemampuan suatu bahan dalam mendistribusikan dan menghantarkan medan listrik. Besaran ini merupakan fungsi dari temperatur dan frekuensi.Secara umum permitivitas dalam hubungannnya terhadap permitivitas dalam ruang bebas dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \tag{2.11}$$

Dengan ε_0 adalah permitivitas udara (8,85x10⁻¹² F/m). (Erdogen, Levent.2011)

Dalam kasuus perambatan gelombang elektromagnetik perbandingan kecepatan rambat gelombang dalam ruang hampa dan di dalam bahan disebut indeks bias bahan.

$$n = \frac{c}{v} \tag{2.12}$$

Karena untuk semua bahan, kecuali bahan ferromagnetik konstanta magnetik mendekati 1 sehingga indeks bias bahan dikatakan sama dengan akar dari konstanta dielektrik.

$$n = \sqrt{\varepsilon} \tag{2.13}$$

Untuk profil kecepatan dalam cairan panas yang diperoleh dengan menyelesaikan Navier-Stokes Persamaan (menggambarkan keseimbangan persamaan momentum dan persamaan kontinuitas) sebagai berikut :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + \eta (\nabla^2 v) + \rho g \qquad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{2.15}$$

Dimana, ∇p adalah gaya tekan pada elemen tiap satuan volume (N/m²), *g* adalah percepatan gravitasi dan η adalah viskositas (Pa.s) untuk fuida Newtonian (Salvi, dkk, 2010).

2.6 Sifat Dielektrik

Suatu material nonkonduktor disebut dielektrik. Pada bahan dielektrik, umumnya distribusi elektron tanpa kehadiran medan listrik luar adalah sedemikian rupa sehingga titik pusat muatan positif berhimpit dengan muatan negatif pada setiap molekul. Akan tetapi, apabila berada dalam medan listrik luar maka muatan negatif cenderung bergeser ke arah yang berlawanan dengan arah medan sedangkan muatan positif bergeser searah dengan arah medan. Akibatnya, muatan positif tidak berhimpit dengan muatan negatif. Molekul-molekul tersebut menjadi suatu *dwikutub* atau *dipol*. Dengan demikian, kehadiran medan listrik luar menyebabkan dipol molekul mengalami *momen* atau perputaran.

Dielektrik dapat melemahkan medan listrik antara keping-keping suatu kapasitor karena hadirnya medan listrik sehingga molekul-molekul dalam dielektrik akan menghasilkan medan listrik tambahan yang arahnya berlawanan dengan medan listrik luar. Jika molekul dalam dielektrik bersifat polar maka dielektrik tersebut memiliki momen dipol permanen. Secara normal momen dipol tersebar dengan secara acak. (Tipler, Paul. 2001)

Dalam permasalahan pemanasan gelombang mikro, sifat dielektri 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 gelombanga mikro yang diserap oleh bahan dielektrik. Perubahan dalam sifat dielektrik akan menghasilkan temperatur. 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 sebagai berikut :

$$\varepsilon_{\rm rw} = \varepsilon_{\rm rwH} + \frac{\varepsilon_{\rm rwL} - \varepsilon_{\rm rwH}}{1 + \omega^2 \tau_{\rm w}^2} \tag{2.16}$$

$$\tan \delta_{\rm w} = \frac{(\varepsilon_{\rm rwL} - \varepsilon_{\rm rwH})\omega\tau_{\rm w}}{\varepsilon_{\rm rwL} + \varepsilon_{\rm rwH}\omega^2\tau_{\rm w}^2}$$
(2.17)

Dimana ε_{rwH} adalah batas frekuensi tinggi ε_{rw} (tidak berdimensi), ε_{rwL} adalah konstanta dielektrik statis air murni (tidak berdimensi), τ_w adalah waktu relaksasi air murni (s) dan ω adalah frekuensi sudut (rad/s). (Ratanadecho, dkk, 2002)

Pada *crude oil* faktor loss dielektrik dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Abdulrahman dan Meribout, 2014):

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \tag{2.18}$$

Dimana σ adalah konduktivitas listrik bahan, f adalah frekuensi, dan ϵ_0 adalah permitivitas listrik di ruang hampa.

Pada prinsipnya ketika gelombang mikro mengenai *crude oil* maka energi gelombang mikro akan diserap oleh *crude oil*. Energi ini menyebabkan momen atau perputaran dipol-dipol *crude oil* mengikuti gerak osilasi. Osilasi ini menghasilkan gesekan antara dipol-dipol yang bergantung dari frekuensi gelombang mikro. Semakin tinggi frekuensi dari gelombang mikro maka semakin besar gesekan dipol-dipol yang terjadi. Akibatnya, energi gelombang mikro semakin banyak yang hilang. Energi yang hilang ini tentunya dikonversi dalam bentuk kalor. Dengan

demikian suhu *crude oil* setekah mendapat paparan radiasi dari gelombang mikro menjadi meningkat.

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

$$m[\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x] = -eE(x, t)$$
(2.19)

Dimana γ mengukur fenomena gaya redaman dan ω_0 adalah frekuensi resonansi dasar, m adalah massa elektron. Dalam hal ini, pengaruh gaya magnet diabaikan. Untuk frekuensi dasar ω_0 dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\omega_0 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a^3 m_e}$$
(2.20)

Jika $x = e^{-i\omega t}$ maka, solusi dari persamaan orde dua pada persamaan 2.17 adalah :

$$\dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t} = -i\omega e^{i\omega t} \tag{2.21}$$

$$\ddot{x} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\omega^2 e^{i\omega t}$$
(2.22)

Dengan mensubtitusi persamaan (2.21) dan (2.22) pada persamaan (2.19) diperoleh solusi persamaan orde dua pada ruas kiri sebagai berikut :

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

$$[-\omega^2 e^{-i\omega t} - \gamma i\omega e^{-i\omega t} + \omega_0^2 e^{-i\omega t}] = \frac{-eE(x,t)}{m}$$

$$[-\omega^2 - \gamma i\omega + \omega_0^2] e^{-i\omega t} = \frac{-eE(x,t)}{m}$$

$$x = \frac{-eE(x,t)}{m[\omega_0^2 - \omega^2 - \gamma i\omega]}$$
(2.23)

Jika medan divariasikan secara harmonik dalam waktu dengan frekuensi ω sebagai $e^{-i\omega t}$, maka momen dipol yang terjadi untuk sebuah muatan elektron *e* adalah

$$p = -ex = \frac{e^2}{m} (\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)^{-1}E = 4\pi\varepsilon_0 \alpha(\omega)E$$
(2.24)

Dimana polarisabilitas atom,

$$4\pi\varepsilon_0 \alpha(\omega) = \frac{(e^2/m)}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)}$$
(2.25)

Sekarang polarisasi dielektrik bergantung pada frekuensi dan faktor redaman yang tidak lain merupakan bagian imaginer.

$$4\pi\varepsilon_0\alpha(\omega) = \frac{e^2}{m} \left[\frac{(\omega_0^2 - \omega^2) + i\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \right]$$
(2.26)

Jika N adalah jumlah molekul tiap satuan volume dengan Z adalah elektron tiap molekul dan sebagai gantinya dari frekuensi ikatan tunggal untuk semua maka polarisasi menjadi :

$$\boldsymbol{P}(x,t) = 4\pi\varepsilon_0 N\alpha(\omega)\boldsymbol{E}(x,t) = \varepsilon_0 X_c.\,\mathbf{E}$$
(2.27)

Akibatnya besarnya pergeseran dielektrik (*dielectric displacement*) di dalam bahan :

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$$
$$\varepsilon. \, \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \varepsilon_0 X_c \boldsymbol{E}$$

Dengan demikian diperoleh konstanta dielektrik :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + X_c \tag{2.28}$$

(Cottingham, dan Greenwood, 1991)

Konstanta dielektrik dengan frekuensi ikatan ω_i dan konstantas redaman γ_i adalah

$$\frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \sum f_i (\omega_j^2 + \omega^2 + i\omega\gamma_i)^{-1}$$
(2.29)

Secara umum konstanta redaman γ_i lebih kecil dibandingkan frekuensi resonansi ω_j . Hal ini berarti bahwa $\varepsilon(\omega)$ merupakan pendekatan real untuk sebagian besar frekuensi. Faktor $(\omega_j^2 - \omega^2)^{-1}$ adalah positif untuk $\omega < \omega_j$ dan negatif jika $\omega > \omega_j^{\varepsilon}$. Bagian real penyebut dari persamaan di atas dihilangkan ketika $\omega = \omega_j$. Secara umum bentuk imajiner dan real dari $\varepsilon(\omega)$ dengan dua frekuensi berurutan ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.6 bentuk imajeniar dan real dari $\epsilon(\omega)$ (Jackson, John. D, 1999) Dispersi normal dihubungkan dengan peningkatan Re $\epsilon(\omega)$ dengan ω 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 imajinear dari ϵ bermakna. Jika bagian emajinear dari ϵ menyatakan energi disipasi yang berasal dari gelombang elektromagnetik dalam medium, daerah dimana Im ϵ 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 :

$$k = \beta + i\frac{\alpha}{2} \tag{2.30}$$

Dimana α adalah konstantas atenuasi atau koefisien absorbsi. Intensitas gelombang sebagai $e^{-\alpha z}$. Persamaan medan yang menghubungkan antara (α, β) dan (Re ϵ , Im ϵ):

$$\beta^2 - \frac{\alpha^2}{4} = \frac{\omega^2}{c^2} Re \,\epsilon/\epsilon_0 \tag{2.31}$$

$$\beta \alpha = \frac{\omega^2}{c^2} Im \,\epsilon / \epsilon_0 \tag{2.32}$$

Jika $\alpha \ll \beta$ terjadi kecuali absorbsi sangat kuat atau Re ϵ maka konstanta atenuasi α dapat dituliskan dengan pendekatan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{Im \,\epsilon(\omega)}{Re \,\epsilon(\omega)}\beta\tag{2.33}$$

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

Pada daerah frekuensi tinggi berlaku $\omega \gg \omega_{i max}$ maka persamaan (2.29) menjadi :

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{2.34}$$

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

2.7 Metode Pemodelan Komputasi

Untuk menentukan distribusi suhu setiap satuan waktu sebagai akibat dari pemanasan dengan gelombang mikro, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (2.11) sebelumnya :

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

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 :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p}$$
(2.35)

Dalam mempropagangsikan gelombang mikro digunakan bentuk model reservoir kotak sehingga :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T + \frac{Q}{\rho C_p}$$
(2.36)

Karena tinjauan dua dimensi maka :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p}$$
(2.37)

Dengan mengetahui besar generation maka diperoleh bentuk transfer kalor. Dalam memodelkan distribusi suhu *crude oil* digunakan metode beda hingga dengan software program visual basic 6.0. Bentuk diskrit distribusi suhu pada kasus ini berdasarkan persamaan transfer kalor.

Metode Beda Hingga (Finite difference)

Metode beda hingga merupakan suatu metode pendekatan numerik untuk menyelesaikan persoalan-persoalan matematis berbentuk diferensial parsial. Karakteristik dari persamaan diferensial parsial adalah persamaan diferensial yang memiliki lebih dari satu variabel bebas dengan turunan setiap variabel bebas dilakukan secara parsial. Metode beda hingga ini didasarkan pada deret *Taylor* dengan tingkatan orde yang disesuaikan dengan kebutuhan. Secara matematis deret Taylor dinyatakan dalam dengan bentuk :

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\Delta x}{1!}f'(x) + \frac{\Delta x^2}{2!}f''(x) + \frac{\Delta x^3}{3!}f'''(x) + \dots \quad (2.38)$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \frac{\Delta x}{1!} f'(x) - \frac{\Delta x^2}{2!} f''(x) - \frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x) + \dots$$
(2.39)

Untuk pendekatan orde-1 dari deret *Taylor* dengan bentuk derivatif $\frac{\partial f}{\partial x}$, metode beda hingga terdiri atas :

a. Beda maju (forward difference)

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$
(2.40)

b. Beda mundur (backward diffrence)

$$f'(x) = \frac{f(x - \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$
(2.41)

c. Selisih pusat (central difference)

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$
(2.42)

Sedangkan pada pendekatan orde-2 dari deret *Taylor* dengan bentuk derivatif $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$ dilakukan dengan menguraikan deret taylor pada persamaan (2.38) dan (2.39) dan menjumlahkan hasil pengurainnya sebagai berikut :

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\Delta x}{1!} f'(x) + \frac{\Delta x^2}{2!} f'(x)$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \frac{\Delta x}{1!} f'(x) - \frac{\Delta x^2}{2!} f'(x)$$

$$------+$$

$$f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x) = 2f(x) + \Delta x^2 f''(x)$$

$$f''(x) = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{\Delta x^2}$$
(2.43)

Dalam memodelkan suatu fenomana fisik secara komputasi, maka bentuk matematis dari suatu rumusan permasalahan dinyatakan dalam bentuk diskrit. Berdasarkan keperluan ini maka dibutuhkan suatu grid untuk menggambarkan daerah tinjauan sistem. Pada kasus dua dimensi maka bentuk grid sel digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.7 grid posisi sistem dua dimensi

Untuk menentukan derivatif pertama dan kedua maka bentuk diskrit dinyatakan dengan :

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\Delta x^2} \tag{2.44}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta x^2}$$
(2.45)

Berdasarkan persamaan heat generation pada (2.11) diketahui terdapat dua bentuk derivatif yang terdiri atas :

Sisi kiri merupakan derivatif pertama dengan bentuk diskrit sebagai berikut :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_z^{n+1/2}(i,j) - T_z^{n+1/2}(i,j)}{\Delta t}$$

Sisi Kanan merupakan derivatif kedua dengan bentuk diskrit sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_y^n(i+1/2,j) - 2T_y^n(i,j) + T_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x^2}$$
$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_x^n(i,j+1/2) - 2T_x^n(i,j) + T_x^n(i,j-1/2)}{\Delta y^2}$$

Maka diperoleh :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p}$$

$$\begin{aligned} \frac{T_z^{n+1/2}(i,j) - T_z^{n+1/2}(i,j)}{\Delta t} \\ &= \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{T_y^n(i+1/2,j) - 2T_y^n(i,j) + T_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x^2} \right) \\ &+ \frac{T_x^n(i,j+1/2) - 2T_x^n(i,j) + T_x^n(i,j-1/2)}{\Delta y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p} \end{aligned}$$

Atau :

$$T_{z}^{n+1/2}(i,j) = T_{z}^{n+1/2}(i,j) + \frac{k\Delta t}{\rho C_{p}} \left(\frac{T_{y}^{n}(i+1/2,j) - 2T_{y}^{n}(i,j) + T_{y}^{n}(i-1/2,j)}{\Delta x^{2}} + \frac{T_{x}^{n}(i,j+1/2) - 2T_{x}^{n}(i,j) + T_{x}^{n}(i,j-1/2)}{\Delta y^{2}} \right) + \frac{Q\Delta t}{\rho C_{p}}$$

$$(2.46)$$

2.8 Metode FDTD

Metode FDTD (*Finite Diferrence Time Domain*)merupakan metode beda hingga (*Finite Diferrence*) yang didasarkan pada algoritma *Yee* dalam menganalisis dan mensimulasikan gelombang elektromagnetik.



Gambar 2.8 Grid Algoritma Yee tiga dimensi (Inan dan Marshall, 2011) Bentuk matematis dalam simulasi gelombang elektromagnetik tentunya mengacu pada persamaan *Maxwell*. Secara matematis persamaan *Maxwell* untuk perambatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{H} \tag{2.47}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{E} \tag{2.48}$$

Pada kasus satu dimensi persamaan (2.451) dan (2.46) menjadi :

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z}$$
(2.49)

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z}$$
(2.50)

Persamaan (2.47) dan (2.48) menunjukkan bahwa gelombang merambat dalam arah sumbu z dengan medan listrik mengarah pada sumbu x dan medan magnet mengarah pada sumbu y. Dengan menggunakan pendekatan *central difference* untuk turunan waktu dan spasial maka diperoleh bentuk diskrit dari persamaan (2.47) dan (2.48) sebagai berikut :

$$\frac{E_x^{n+1/2}(k) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)}{\Delta z} \quad (2.51)$$
$$\frac{H_y^{n+1}(k+1/2) - H_y^{n+1}(k+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n+1/2}(k)}{\Delta z} \quad (2.52)$$

Dari persamaan (2.51) dan (2.52), simbol n menyatakan sebagai waktu dengan $t = \Delta t. n$. Suku n+1 berarti langkah waku berikutnya. Variabel yang berada dalam tanda yaitu k menyatakan sebagai jarak, $z = \Delta x. k$. Untuk medan magnet H menggunakan argumentasi k + 1/2 dan k - 1/2. Hal ini berarti bahwa nilai medan H diasumsikan terletak diantara medan listrik *E*.



Gambar 2.9 Penyisipan medan E dan medan H dalam ruang dan waku (Sullivan, Dennis, 2000)

Berdasarkan gambar 2.8.1 untuk menghitung H_y (k+1/2), maka diperlukan nilai E_x yang berdekatan pada argumen k dan k+1. Dengan cara yang sama dapat digunakan untuk menghitung E_y (k+1) dibutuhkan nilai H_y pada k+1/2 dan k+ $1\frac{1}{2}$. Persamaan (2.49) dan (2.50) dapat disusun kembali dalam suatu algoritma :

$$E_x^{n+1/2}(k) = E_x^{n-1/2}(k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \cdot \Delta z} \Big[H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2) \Big]$$
(2.53)

$$H_{y}^{n+1}(k+1/2) = H_{y}^{n}(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu_{0} \Delta z} \cdot E_{x}^{n+1/2}(k+1) - E_{x}^{n+1/2}(k) \quad (2.54)$$

Diketahui bahwa dalam penyisipan medan E dan medan H dalam ruang waktu menggunakan perhitungan dari nilai sebelumnya. Misalnya, nilai E_x yang terbaru dihitung dari nilai E_x sebelumnya dan nilai terbaru dari H_y. Hal ini merupakan dari paradigma dasar dari metode FDTD.

Secara matematis medan listrik dan medan magnet pada kasus 1 dimensi dengan menggunakan metode FDTD. Berdasarkan persamaan (2.53) dan persamaan (2.54), namun karena ε_0 dan μ_0 berbeda untuk beberapa orde magnitudo maka nilai medan E dan medan H menjadi berbeda pula. Untuk mengatasi hal ini diperlukan perubahan variabel dalam bentuk :

$$\tilde{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E \tag{2.55}$$

Dengan mensubtitusi persamaan (2.53) ke persamaan (2.51) dan (2.52) diperoleh :

$$\tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k) = \tilde{E}_{x}^{n-1/2}(k) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{0} \cdot \mu_{0}}} \frac{\Delta t}{\Delta z} \left[H_{y}^{n}(k+1/2) - H_{y}^{n}(k-1/2) \right] (2.56)$$

$$H_{y}^{n+1}(k+1/2) = H_{y}^{n}(k+1/2) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{0} \cdot \mu_{0}}} \frac{\Delta t}{\Delta z} \cdot \tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k+1) - \tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k) (2.57)$$

Dari ukuran sel Yee Δx yang dipilih, langkah waktu Δt dinyatakan dengan :

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2.c_0} \tag{2.58}$$

Dimana c_0 adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa, sehingga :

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = c_0 \cdot \frac{\frac{\Delta x}{2 \cdot c_0}}{\Delta x} = \frac{1}{2}$$
(2.59)

Dalam metode FDTD, waktu bersifat implisit sedangkan posisi bersifat eksplisit. Dari persamaan (2.54) menunjukkan bahwa nilai ex pada sisi kanan merupakan nilai ex sebelumnya pada n-1/2 dan nilai ex pada sisi kiri adalah nilai ex yang baru diperoleh dari hasil perhitungan pada n+1/2. Untuk menguraikan posisi dalam suatu *array* program maka suku k+1/2 dan k-1/2 masing-masing dibulatkan menjadi k+1 dan k-1. (Sullivan, Dennis, 2000)

Propagansi dalam medium dielektrik

Untuk mensimulasikan gelombang elektromagnetik pada suatu mediumyang memiliki konstanta dielektrik tertentu, maka perlu menambahkan variabel konstanta dielektrik relatif ε_r pada persamaan *Maxwell*. Selain itu, medium dielektrik tersebut memiliki nilai konduktivitas tertentu σ sehingga analisis persamaan gelombang *Maxwell* menjadi :

$$\varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{H} - \boldsymbol{J} \tag{2.60}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{E} \tag{2.61}$$

Dengan J adalah rapat arus yang dinyatakan :

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{\sigma}.\boldsymbol{E} \tag{2.62}$$

Dimana σ adalah konduktivitas. Dengan mensubtitusi persamaan rapat arus pada persamaan (2.60) dan membagi dengan konstanta dielektrik $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ maka diperoleh :

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{H} - \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \boldsymbol{E}$$
(2.63)

Untuk tinjauan kasus satu dimensi dengan medan listrik dalam arah sumbu x dan medan magnet pada sumbu y sedangkan gelombang merambat dalam arah sumbu z sehingga persamaan medan listrik dan medan magnet menjadi :

$$\frac{\partial E_x(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \frac{\partial H_y(t)}{\partial z} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} E_x(t)$$
$$\frac{\partial H_y(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x(t)}{\partial z}$$

Jika dilakukan perubahan variabel maka :

$$\frac{\partial \tilde{E}_{x}(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_{r}\sqrt{\varepsilon_{0}.\mu_{0}}} \frac{\partial H_{y}(t)}{\partial z} - \frac{\sigma}{\varepsilon_{0}.\varepsilon_{r}} \tilde{E}_{x}(t)$$

$$\frac{\partial H_{y}(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{0}.\mu_{0}}} \frac{\partial \tilde{E}_{x}(t)}{\partial z}$$
(2.64)
(2.65)

Selanjutnya dengan menggunakan pendekatan*finite difference*untuk turunan waktu dan spasial maka diperoleh bentuk diskrit dari persamaan (2.64) dan (2.65) sebagai berikut :

$$\frac{\tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k) - \tilde{E}_{x}^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\varepsilon_{r}\sqrt{\varepsilon_{0}.\mu_{0}}} \frac{H_{y}^{n}(k+1/2) - H_{y}^{n}(k-1/2)}{\Delta z} -\frac{\sigma}{\varepsilon_{0}.\varepsilon_{r}} \frac{\tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k) - \tilde{E}_{x}^{n-1/2}(k)}{2}$$
(2.66)
$$\frac{H_{y}^{n+1}(k+1/2) - H_{y}^{n}(k+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{0}.\mu_{0}}} \frac{\tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k+1) - \tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k)}{\Delta z}$$
(2.67)

Dimana suku terakhir dari persamaan (2.66) merupakan pendekatan sebagai ratarata dua langkah waktu, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (2.59)

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}}\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{2}$$

Sehinggga persamaan (2.66) menjadi :

$$\tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k)\left[1+\frac{\Delta t.\,\sigma}{2\varepsilon_{r}\varepsilon_{0}}\right] = \tilde{E}_{x}^{n-1/2}(k)\left[1-\frac{\Delta t.\,\sigma}{2\varepsilon_{r}\varepsilon_{0}}\right] - \frac{\frac{1}{2}}{\varepsilon_{r}}\left[H_{y}^{n}(k+1/2) - H_{y}^{n}(k-1/2)\right]$$
... (2.68)

$$\tilde{E}_{x}^{n+1/2}(k) = \frac{\left[1 - \frac{\Delta t.\sigma}{2\varepsilon_{r}\varepsilon_{0}}\right]}{\left[1 + \frac{\Delta t.\sigma}{2\varepsilon_{r}\varepsilon_{0}}\right]} \tilde{E}_{x}^{n-1/2}(k) - \frac{\frac{1}{2}}{\varepsilon_{r}\left[1 + \frac{\Delta t.\sigma}{2\varepsilon_{r}\varepsilon_{0}}\right]} \left[H_{y}^{n}(k+1/2) - H_{y}^{n}(k-1/2)\right] (2.69)$$

Jika persamaan (2.8.19) dan (2.8.20) dituliskan dalam bentuk sintaks code :

$$ex[k] = ca[k]*ex[k]+cb[k]*(hy[k-1]-hy[k])(2.8.20)$$

 $hy[k]=hx[k]+0.5*(ex[k]-ex[k+1])(2.62)$

Dimana :

Analisa Gelombang Mikro dengan Metode FDTD pada Dua Dimensi

Gelombang mikro merupakan bagian dari gelombang elektromagnetik sehingga untuk menganalisis propagansi gelombang mikro dalam medium dielektrik didasarkan pada persamaan Maxwell sebagai berikut :

$$\frac{\partial \widetilde{\boldsymbol{D}}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}} \nabla x \boldsymbol{H} \tag{2.70}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{D}}(\omega) = \varepsilon_r^*(\omega).\,\widetilde{\boldsymbol{E}}(\omega) \tag{2.71}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{E}$$
(2.72)

Ketika mensimulasikan gelombang elektromagnetik dalam tiga dimensi maka akan ditinjuau enam vektor medan yang berbeda diantaranya : $\tilde{E}_x, \tilde{E}_y, \tilde{E}_z, H_x, H_y$, dan H_z . Namun, jika mensimulasikan gelombang elektromagnetik dalam dua dimensi maka akan dipilih dua group dari tiga vektor yaitu :

- (1) Mode TM (*Tranverse Magnetic*) terdiri atas : \tilde{E}_z , H_x , H_y
- (2) Mode TE (*Tranverse Electric*) terdiri atas : \tilde{E}_x , \tilde{E}_y , H_z

Dalam simulasi ini dipilih mode TM dengan bentuk penyisipan medan E dan H pada gambar berikut :



Gambar 2.10 Penyisipan Medan E dan H untuk mode TM dua dimensi (Sullivan, Dennis, 2000)

Berdasarkan mode TM maka persamaan (2.67), (2.68) dan (2.69) menjadi :

$$\frac{\partial \widetilde{\boldsymbol{D}}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial x} \right) \tag{2.73}$$

$$D_z(\omega) = \varepsilon_r^*(\omega). E_z(\omega) \tag{2.74}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial y}$$
(2.75)

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial y}$$
(2.76)

Keempat persamaan di atas menggambarkan distribusi Medan Listrik dan Medan magnet dalam domain ruang dan waktu dengan mode pandu TM. Bidang gelombang dibentuk oleh sumbu x dan sumbu y sehingga kooordinat posisi medan listrik dan medan magnet dinyatakan dalam vektor satuan (i,j) (Sullivan, Dennis, 2000).

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB 3 METODA PENELITIAN

Pada bagian ini akan dijelaskan metode, perangkat, tahapan dan analisis yang digunakan. Orientasi dalam penelitian ini berupa simulasi pemanasan *crude oil* dengan menggunakan gelombang mikro pada reservoir. Reservoir merupakan wadah *crude oil* yang terletak di bawah permukaan tanah pada kedalaman dan tekanan tertentu. Diasumsikan bahwa reservoir berbentuk kotak. Karakteristik reservoir dan *crude oil* diperoleh dari data sekunder. Pemodelan pemanasan dilakukan dengan menggunakan metode beda hingga yang berbasis ruang dan waktu. Metode ini dikenal dengan istilah *finite difference time domain* (FDTD). FDTD merupakan metode yang digunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang elektromagnetik berdasarkan rumusan persamaan Maxwell (Inan dan Marshall, 2011). Oleh karena, distribusi *crude oil* pada seluruh permukaan reservoir diasumsikan homogen sehingga hasil simulasi disajikan dalam bentuk dua dimensi.

Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan, yaitu simulasi perambatan gelombang mikro dan simulasi perpindahan panas. Pemodelan pemanasan mempertimbangkan sifat dielektrik bahan difokuskan pada proses *thermal injection* adalah salah satu teknik EOR (*Enhanced Oil Recovery*) yang menggunakan panas untuk meningkatkan perolehan *crude oil*. Energi termal dalam proses *thermal injection* digunakan untuk memanaskan *crude oil* pada reservoir (Erlan Dewita, dkk, 2013). Dalam penelitian ini energi termal yang digunakan bersumber dari energi gelombang mikro.

Gelombang mikro termasuk sebagai gelombang elektromagnetik. yang dipropagansikan dalam sebuah pandu gelombang. Jenis pandu gelombang yang digunakan adalah rectangular dengan ukuran panjang 10 m dan lebar 10 m. Pandu gelombang tersebut bekerja pada mode TM₁₁. Gelombang mikro selanjutnya ditransmisikan di sepanjang sumbu z.

3.1 Perangkat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah minyak mentah (*crude oil*) yang diasumsikan berada pada kondisi awal dengan parameter fisik terdiri atas dari *crude oil* terdiri atas : viskositas sebesar 3,9 cp, konduktivitas termal sebesar 0.38 Wm^{-1} °C⁻¹, massa jenis sebesar 900 m^{-3} , dan kalor jenis *crude oil*sebesar 2000 $Ws kg^{-1}$ °C⁻¹, konstanta dielektrik 2.8 dan *loss* dielektrik 0.15. (Basak, 2004).

Gelombang mikro dihasilkan dari sebuah generator. Jenis generator untuk membangkit gelombang mikro yang digunakan adalah magnetron tipe MICRO DENSHI UM-1500. Magnetron bekerja pada frekuensi operasional 2.45 GHz dengan maksimum power input 1.5 kW (Ratanadecho dkk., 2002). Pemilihan jenis generator ini dilakukan dengan alasan bahwa magnetron dapat bekerja pada daya yang tinggi sehingga dapat diaplikasikan dalam memanaskan *crude oil* pada skala industri.

Dalam menvisualisasikan perambatan gelombang mikro dan kalor pada reservoir digunakan Visual Basic 6.0. Reservoir memiliki dimensi ukuran terdiri atas panjang (a) sebesar 10 m dan lebar (b) sebesar 10 m, seperti ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 3.1 dimensi cavity dari crude oil

Reservoir memiliki karakteristik terdiri atas konstanta dielektrik sebesar 4,09; loss dielektrik sebesar 0,007; koefisien transfer kalor sebesar 300 Wm⁻²k⁻¹; permeabilitas sebesar 1000 mD, porositas sebesar 23%; Tekanan 6,89 Mpa (Abdulrahman dan Meribout, 2014)

3.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram penelitian memberikan informasi tentang langkah-langkah dalam penelitian dengan tujuan untuk mensimulasikan perambatan gelombang mikro dan panas dalam *crude oil* pada reservoir. Diagram alir dalam penelitian ini disajikan pada gambar berikut :



Gambar. 3.2 Bagan Alir Penelitian

3.3 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. Informasi yang diperoleh bersumber dari jurnal-jurnal penelitian yang terkait dan buku. Data sekunder yang menggambarkan karakteristik *crude oil* dan reservoir diperoleh dari tahapan studi literatur.

3.4 Metode Pemodelan

Metode pemodelan pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro didasarkan pada bentuk matematis persamaan. Untuk gelombang mikro didasarkan pada persamaan Maxwell dan transfer kalor pada persamaan (2.5.1) berikut :

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

Dimana Q diperoleh dari persamaan 2.5.2 :

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

Bentuk matematis heat transfer pada persamaan (2.5.1) dari pemanasan *crude oil* merupakan bentuk persamaan diferensial parsial. Untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial ini dilakukan dengan menggunakan metode beda hingga. Metode beda hingga merupakan suatu pendekatan numerik dalam memodelkan suatu permasalahan yang memiliki bentuk matematis berupa persamaan diferensial parsial. Oleh karena persamaan heat transfer berada dalam domain waktu dan posisi sehingga digunakan metode *finite difference time domain* (FDTD).

3.5 Penentuan Pemodelan

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

a. Menentukan persamaan gelombang mikro yang didasarkan pada persamaan Maxwell.

b. Menentukan nilai medan listrik lokal dari penjabaran persamaan Maxwell

c. Menentukan persamaan pembangkit panas lokal

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

d. Menentukan model transfer kalor sesuai dengan persamaan heat transfer berikut :

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

dimana nilai Q diperoleh dari tahap ketiga. Koordinat yang digunakan dalam persamaan heat transfer adalah kartesian. Persamaan heat transfer ini menggambarkan distribusi suhu sebagai fungsi posisi dan waktu.

- e. Mengubah bentuk persamaan gelombang mikro dan heat transfer dalam bentuk diskrit.
- f. Memvisualisikan perambatan gelombang mikro dan heat transfer menggunakan Visual Basic 6.0
- g. Melakukan variasi waktu dan koordinat posisi untuk perambatan gelombang mikro dan heat transfer
- h. Membuat grafik dari hasil variasi waktu dan koordinat posisi untuk memperoleh distribusi suhu dalam pemodelan pemanasan *crude oil*.

3.6 Langkah-langkah Pemodelan secara Numerik

Dalam penelitian ini terbagi dua tahapan simulasi yaitu perambatan gelombang mikro dan heat transfer. Untuk keperluan komputasi, maka kedua tahapan dijabarkan dalam langkah-langkah pemodelan secara numerik dengan rincian sebagai berikut :

a. Perambatan Gelombang mikro

Langkah-langkah pemodelan secara numerik pada perambatan gelombang mikro terdiri atas:

1. Menentukan medan listrik dan medan magnet berdasarkan persamaan Maxwell

$$\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{H}$$
$$\tilde{\boldsymbol{D}}(\omega) = \varepsilon_r^*(\omega) \cdot \tilde{\boldsymbol{E}}(\omega)$$
$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \nabla \boldsymbol{x} \boldsymbol{E}$$

 Dalam simulasi dipilih mode gelombang TM sehingga persamaan pada point 1 menjadi :

$$\frac{\partial \widetilde{\boldsymbol{D}}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial x} \right)$$
$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

3. Bentuk diskrit persamaan pada point 1 :

$$\frac{D_z^{n+1/2}(i,j) - D_z^{n-1/2}(i,j)}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}} \left(\frac{H_y^n(i+1/2,j) - H_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x} \right) \\ -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}} \left(\frac{H_x^n(i,j+1/2) - H_x^n(i,j-1/2)}{\Delta y} \right) \\ \frac{H_x^{n+1}(i,j+1/2) - H_x^n(i,j+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0.\,\mu_0}} \frac{\tilde{E}_z^{n+1/2}(i,j+1) - \tilde{E}_z^{n+1/2}(i,j)}{\Delta x}$$

$$\frac{H_{y}^{n+1}(i+1/2,j) - H_{y}^{n}(i+1/2,j)}{\Delta t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{0}.\mu_{0}}} \frac{\tilde{E}_{z}^{n+1/2}(i+1,j) - \tilde{E}_{z}^{n+1/2}(i,j)}{\Delta z}$$

b. Perambatan kalor

Perambatan kalor terdiri atas :

1. Menentukan kalor lokal dengan persamaan :

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

Dimana :

- ▶ f (frekuensi gelombang)= $2,45 \times 10^9$ Hz
- $> \pi = 3,14$
- \succ ε₀ = 8,85x10⁻¹² F/m
- $\succ \varepsilon''$ (konstanta dielektrik *crude oil*) = 0.28
- E(medan listrik) diperoleh dari hasil running gelombang mikro yaitu : (ez(i,j))
- 2. Mensubtitusi nilai Q pada persamaan transfer kalor berikut :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T + \frac{Q}{\rho C_p}$$

Karena tinjauan dua dimensi maka :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p}$$

Dimana :

- \succ T = suhu
- \succ t = waktu
- \triangleright Q = heat generation
- \triangleright ρ = massa jenis *crude oil* (nilainya = 900 kg/m³)

▶
$$k =$$
konduktivitas termal (nilainya 0,38 W/m.°C)

3. Bentuk diskrit dari persamaan heat transfer

Sisi kiri

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_z^{n+1/2}(i,j) - T_z^{n+1/2}(i,j)}{\Delta t}$$

Sisi kanan

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_y^n(i+1/2,j) - 2T_y^n(i,j) + T_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x^2}$$
$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_x^n(i,j+1/2) - 2T_x^n(i,j) + T_x^n(i,j-1/2)}{\Delta y^2}$$

Maka :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p} \\ \frac{T_z^{n+1/2}(i,j) - T_z^{n+1/2}(i,j)}{\Delta t} \\ &= \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{T_y^n(i+1/2,j) - 2T_y^n(i,j) + T_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x^2} \right) \\ &+ \frac{T_x^n(i,j+1/2) - 2T_x^n(i,j) + T_x^n(i,j-1/2)}{\Delta y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p} \end{aligned}$$

Atau :

$$\begin{split} T_z^{n+1/2}(i,j) &= T_z^{n+1/2}(i,j) \\ &+ \frac{k\Delta t}{\rho C_p} \bigg(\frac{T_y^n(i+1/2,j) - 2T_y^n(i,j) + T_y^n(i-1/2,j)}{\Delta x^2} \\ &+ \frac{T_x^n(i,j+1/2) - 2T_x^n(i,j) + T_x^n(i,j-1/2)}{\Delta y^2} \bigg) + \frac{Q\Delta t}{\rho C_p} \end{split}$$

3.7 Pembuatan Simulasi

Pembuatan simulasi merupakan tahapan dalam memperoleh pemodelan pemanasan *crude oil* secara komputasi. Hasil simulasi berupa perambatan gelombang mikro dan bentuk perambatan kalor pada reservoir. Distribusi suhu pada reservoir digambarkan dalam titik kooordinat (i,j). i dan j merupakan vektor satuan dari koordinat kartesian pada bidang x dan y. Distribusi suhu ini posisi dari suhu dalam domain waktu. Adapun Tahapan pembuatan simulasi untuk perambatan gelombang mikro dan tranfer kalor digambarkan dalam diagram berikut :



Gambar 3.5. Diagram Alir simulasi.

3.8 Pengujian Model dan Analisis Error

Pada tahap pengujian model, melakukan variasi terhadap parameter fisik berupa variabel bebas yang terukur diantaranya posisi dan waktu yang berdasarkan konstanta-konstanta yang sesuai. Tujuan dilakukan variasi adalah untuk memperoleh nilai distribusi suhu dalam koordinat x dan y. Model distribusi diperoleh dari grafik pengaruh waktu dan koordinat posisi terhadap suhu. Pengujian ini sekaligus sebagai validasi model untuk data-data lain di luar data penelitian.

Untuk analisis Error dilakukan dengan menggunakan error numerik yang didasarkan pada nilai konvergensi numerik. Pada metode FDTD, konvergensi numerik memenuhi stabilitas numerik yang ditentukan dengan menggunakan parameter langkah waktu maksimum yang didasarkan pada persamaan berikut (Chen, Hao dkk, 2007):

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2}}$$
:

Dimana μ adalah permeabilitas reservoir sebesar 1000 mD dan ε merupakan konstanta dielektrik sebesar 4,09 maka dengan nilai Δx yang sama dengan Δy yaitu maka nilai Δt dapat ditentukan. Nilai Δt dinyatakan valid jika $\Delta t < 10^{-4}$

3.9 Final Model

Final model merupakan tahap akhir penentuan model distribusi suhu *crude oil* dalam pemanasan menggunakan gelombang mikro pada reservoir. Penentuan final model didasarkan pada error numerik. Jika nilai langkah waktu maksimum dinyatakan valid maka model yang diperoleh merupakan final model. Final model dinyatakan dalam bentuk persamaan yang diperoleh dari grafik model pemanasan gelombang mikro. Grafik ini merupakan distribusi suhu sebagai fungsi posisi dan waktu. Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini 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 dengan menggunakan metode FDTD. Pemilihan bentuk dua dimensi ini didasarkan pada asumsi bahwa *crude oil* terdistribusi homogen pada seluruh permukaan reservoir. Dalam metode FDTD pada penelitian ini, terdapat dua paremeter yang divariasikan untuk meninjau distrubusi suhu akibat pemanasan gelombang mikro pada *crude oil*. Parameter tersebut adalah waktu dan posisi. Dengan variasi parameter waktu dan posisi diperoleh hasil simulasi gelombang mikro dan kalor sebagai berikut.

4.1 Perbandingan hasil simulasi gelombang mikro dan kalor

Pada metode FDTD parameter waktu dikenal dengan istilah "nstep" yaitu banyaknya jumlah waktu yang diperlukan untuk melakukan proses pada sistem. Dengan memilih nstep 250 pada koordinat posisi (90,90) maka perbedaan tampilan hasil simulasi antara perambatan panas dan gelombang mikro ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 4.1 Simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor

Dari gambar 4.1 menunjukkan bahwa parameter input dari crude oil terdiri atas sigma merupakan konduktivitas listik, dielektrik adalah konstanta dielektrik, nstep adalah parameter waktu, spread adalah lebar pulsa, T0 adalah langkah waktu awal. Sementara parameter output yang dihasilkan berupa Te yaitu suhu *crude oil* pada koordinat posisi (i,j). Gambar warna hijau merupakan perambatan gelombang mikro sedangkan gambar warna merah menunjukkan perambatan kalor. Pada perambatan gelombang mikro dengan pewaktuan nstep 250 terjadi pemantulan pada dinding reservoir. Dalam hal ini reservoir diasumsikan sebagai pemantul yang sempurna. Dengan menggunakan bentuk pulsa *gaussian*, maka perambatan kalor terjadi secara radial dari pusat radiasi gelombang mikro. Dalam hal ini, perambatan gelombang mikro memiliki bentuk radial.

Pada dasarnya ketika *crude oil* berinteraksi dengan gelombang mikro maka energi gelombang mikro akan diserap oleh *crude oil*. Energi ini menyebabkan terjadinya perputaran dipol-dipol *crude oil*. Gerakan perputaran dari dipol-dipol *crude oil* mengikuti gerak osilasi yang menghasilkan gesekan antara dipol-dipol. Gesekan 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. Akibatnya, energi gelombang mikro semakin banyak yang hilang. Energi yang hilang ini tentunya 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 gambar 4.1 mencakup luasan wilayah reservoir dari pusat radiasi lebih besar dibandingkan perambatan kalor. Secara matematis hal ini aktualisasikan dalam bentuk persamaan kalor.

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

Dimana E merupakan medan listrik yang diperoleh dari hasil simulasi perambatan gelombang mikro. Persamaan (2.8) ini menunjukkan bahwa kalor bergantung pada medan listrik dari gelombang mikro. Kalor dari persamaan di atas merupakan kalor dari sumber gelombang mikro (magnetron). Setelah kalor merambat pada *crude oil* persaman kalor menjadi

$$Q = hA(T_f - T_i)$$

Dengan h merupakan koefisien transfer kalor. Dalam penelitian nilai h yang digunakan untuk crude oil sebesar 300 Wm⁻²k⁻¹. Persamaan (2.9) ini menggambarkan besarnya kalor pada crude oil dalam suatu luasan wilayah dari reservoir pada selisih suhu tertentu. $(T_f - T_i)$ menyatakan selisih suhu pada setiap langkah waktu pemanasan. (Chen, Hao dkk, 2007)

Dalam penelitian ini magnetron sebagai sumber gelombang mikro bekerja pada frekuensi 2,45 GHz. Dengan menggunakan pandu gelombang rectangular, yang tidak lain didasarkan pada bentuk dua dimensi dari salah satu reservoir maka besar frekuensi *cut-off* pada medium udara adalah 0,21 GHz sedangkan dalam medium *crude oil* adalah 0,003 GHz. Berdasarkan syarat propagansi gelombang bahwa jika $f_{kerja} > f_{cut-off}$ maka gelombang akan dipropagansikan. Dengan meninjau nilai dari frekuensi kerja dan frekuensi *cut-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 imaginear. Bagian real dari konstanta propagansi adalah konstanta atenuasi α sedangkan bagian imaginear adalah konstanta fase β . Secara matematis, konstanta propagansi γ dinyatakan dalam persamaan :

$\gamma = \alpha + j\beta$

Berdasarkan bentuk dari dimensi pandu gelombang rectangular (10x10), frekuensi kerja gelombang mikro sebsar 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 0,04m⁻¹ dan konstanta fasa sebesar 50,33m⁻¹. Dengan demikian, nilai dari konstanta progansi sebesar :

$$\gamma = 0,04 + j 50,33$$

4.2 Variasi Parameter Waktu

Metode FDTD merupakan metode yang berdasarkan pada metode beda hingga dalam domain waktu sehingga sangat penting untuk mengatur parameter waktu. Dalam metode FDTD parameter waktu bersifat implisit. Pada simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor, variasi parameter waktu yang digunakan adalah dari nstep 100 sampai dengan nstep 800. Dengan menggunakan koordinat posisi (90,90) maka setiap kenaikan nstep sebesar 50 maka diperoleh nilai suhu *crude oil* yang berbeda. Hasil simulasi dari variasi parameter waktu pada perambatan gelombang mikrop dan kalor dicantumkan dalam tabel 4.2 berikut :

No.	Waktu (nstep)	Suhu <i>Crude oil</i> (°C)
1	100	0,72
2	150	1,25
3	200	2,06
4	250	3,04
5	300	5,61
6	350	9,26
7	400	15,28
8	450	25,47
9	500	42,28
10	550	69,75
11	600	115,16
12	650	190,15
13	700	313,65
14	750	517,38
15	800	853,45

Tabel 4.2 Pengaruh waktu terhadap suhu crude oil

Hasil ini dinyatakan dalam bentuk grafik sebagai berikut



Gambar 4.2.1 Pengaruh waktu pemanasan terhadap suhu crude oil

Berdasarkan tabel 4.2 diketahui bahwa semakin lama waktu pemanasan maka suhu crude oil semakin meningkat. Bentuk dari pemodelan pemanasan dari *crude oil* ditunjukkan dari grafik pada gambar 4.2.1. Dari grafik diperoleh persamaan garis berbentuk eksponensial sebesar y = 0,2262 *exp* (0,0101x). Hal ini berarti bahwa secara matematis bentuk model pemanasan dari *crude oil* menggunakan gelombang mikro dengan tinjuan parameter waktu adalah $T(t) = 0,2262 e^{(0,0101t)}$.

Adapun contoh bentuk tampilan hasil simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor pada beberapa nstep ditunjukkan pada gambar berikut, diantaranya ; nstep 100, nstep 150, nstep 200, nstep 300. Untuk nstep 250 sudah ditampilkan pada bagian 4.1 sedangkan untuk nstep 350 – 800 disajikan pada bagian lampiran.



1. Untuk nstep = 100

Gambar 4.2.2 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = 100

2. Untuk nstep = 150



Gambar 4.2.3 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = 150



3. Untuk nstep = 200

Gambar 4.2.4 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = 200

4. Untuk nstep = 300





- PARAMETER INPUT CRUDE OL SIGMA DELEKTRIK 28 NSTEPS 350 T0 20 SPREAD 6 START KELUAR Posisi Te (µ) 90 Te 90-9,25597017963634
- 5. Untuk nstep = 350

Gambar 4.2.6 Simulasi gelombang mikro dan kalor dengan nstep = 350

Berdasarkan gambar hasil simulasi gelombang mikro dan kalor dari beberapa nstep menunjukkan bahwa semakin besar nstep yang diberikan maka bentuk perambatan gelombang mikro secara radial semakin meluas hingga mencapai dinding reservoir. Setelah mengenai dinding reservoir maka gelombang mikro akan dipantulkan. Selanjutnya pantulan gelombang mikro kembali dimanfaatkan untuk memanaskan crude oil. Sedangkan untuk perambatan kalor, semakin besar nstep maka semakin tinggi titik puncak dari tampilan kalor dengan bentuk tampilan warna merah yang semakin jelas. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin lama *crude oil* dipanasi maka semakin tinggi suhu dari *crude oil*.

4.3 Variasi Koordinat Posisi

Dalam simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor dengan menggunakan metode FDTD, posisi yang dimaksud adalah letak titik tinjauan sistem untuk menggambarkan distribusi suhu dalam pemanasan *crude oil*. Posisi dinyatakan dalam koordinat x dan y dengan vektor satuan i dan j. Untuk menentukan jarak tinjauan titik sistem maka dapat dilakukan dengan teorema *Phytagoras* yaitu $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Dalam penelitian ini dipilih nilai vektor posisi x dan y yang sama sehingga besar posisi adalah $r = x\sqrt{2}$. Variasi koordinat posisi yang dipilih adalah dari 110-180. Dengan menggunakan parameter waktu yang sama yaitu nstep 350 maka pada setiap selisih kenaikan posisi sebesar 10 maka diperoleh nilai suhu *crude oil* yang berbeda. Hasil simulasi dari variasi koordinat posisi pada perambatan gelombang mikrop dan kalor dicantumkan dalam tabel 4.3 berikut :

No.	Koordinat Posisi	Jarak dari Pusat	Suhu Crude oil (°C)
1	(110,110)	155,56	9,28
2	(120,120)	169,71	3,6
3	(130,130)	183,85	1,82
4	(140,140)	197,99	1,03
5	(150,150)	212,13	0,69
6	(160,160)	226,27	0,57
7	(170,170)	240,42	0,48
8	(180,180)	254,56	0,45

Tabel. 4.3 Pengaruh jarak dari pusat terhadap suhu crude oil

Hasil dari simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor dengan variasi koordinat posisi dinyatakan dalam bentuk grafik sebagai berikut :





Berdasarkan tabel 4.3 diketahui bahwa semakin besar jarak titik tinjuan sistem dari pusat radiasi maka semakin kecil nilai suhu crude oil semakin meningkat. Bentuk dari pemodelan pemanasan dari *crude oil* dengan tinjauan jarak titik sistem dari pusat radiasi gelombang mikro ditunjukkan pada grafik dari gambar 4.3.1. Dari grafik diperoleh persamaan garis berbentuk eksponensial sebesar y = 531,24 *exp* (-0,03x). Hal ini berarti bahwa berdasarkan tinjuan parameter posisi secara matematis bentuk model pemanasan dari *crude oil* menggunakan gelombang mikro dengan adalah $T(r) = 531,24 e^{(-0,03r)}$.

Adapun contoh bentuk tampilan hasil simulasi perambatan gelombang mikro dan kalor pada beberapa koordinat posisi ditunjukkan pada gambar berikut, diantaranya ; posisi (110,110), posisi (120,120), posisi (130,130), posisi (140,140). Untuk koordinat posisi (150,150), (160,160), (170,170), (180,180) disajikan pada bagian lampiran.



1. Untuk koordinat posisi (110,110)

Gambar 4.3.2 Simulasi dengan koordinat posisi (110,110)



2. Untuk koordinat posisi (120,120)

Gambar 4.3.3 Simulasi dengan koordinat posisi (120,120)



3. Untuk koordinat posisi (130,130)

Gambar 4.3.4 Simulasi Simulasi dengan koordinat posisi (130,130)

4. Untuk koordinat posisi (140,140)



Gambar 4.3.5 Gambar 4.3.3 Simulasi dengan koordinat posisi (140,140)

Dalam suatu studi pemodelan yang menggunakan bentuk grid tertentu maka akan menyebabkan terjadinya *error* numerik. Dalam kasus pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro, bentuk grid yang digunakan adalah persegi. Secara signifikan jika error numerik yang dihasilkan besar maka akan berpengaruh terhadap hasil akhir dari pemodelan. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu studi untuk meyakinkan bahwa pemodelan yang dilakukan konvergen pada suatu nilai tertentu.

Untuk pemodelan dengan metode FDTD, error numerik ditentukan dari nilai konvergensi. Dalam memenuhi kestabilan numerik dari pemodelan FDTD maka dapat ditentukan dari parameter langkah waktu maksimum yang didasarkan pada persamaan berikut (Chen, Hao dkk, 2007):

$$\Delta t \le \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2}}$$

Dimana nilai Δx sama dengan Δy yaitu 0,05. Berdasarkan karakteristik reservoir dengan nilai permeabilitas μ sebesar 1000 mD dan konstanta dielektrik sebesar 4,09 maka diperoleh nilai Δt sebesar 7,53x10⁻⁹. Syarat error untuk suatu program simulasi adalah $\Delta t \leq 10^{-4}$. Oleh karena, nilai Δt yang diperoleh lebih kecil dari 10⁻⁴ maka hal ini berarti bahwa model perambatan panas (*heat transfer*) dan perambatan gelombang mikro dinyatakan valid.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan pembahasan dapat disimpulkan :

- 1. Pemodelan perambatan panas dan perambatan gelombang mikro pada reservoir *crude oil* secara komputasi dapat disimulasikan dengan baik menggunakan metode FDTD dua dimensi.
- 2. Hasil simulasi perambatan panas dan gelombang mikro menunjukkan model distribusi suhu dengan bentuk matematis $T(t) = 0,2262 \ e^{(0,0101t)}$ untuk variasi waktu dan $T(r) = 531,24 \ e^{(-0,03r)}$ untuk variasi koordinat posisi.

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut tentang pemodelan pemanasan *crude oil* menggunakan gelombang mikro dengan metode FDTD dapat dilakukan dengan variasi rentang parameter waktu dan posisi yang lebih kecil sehingga diperoleh bentuk model distribusi yang lebih signifikan. 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. dan Meribout, M., (2014), "Energy", Antenna array design for enhanced oil recovery reservoir constraints with experimental validation, Science Direct, Vol. 66, Hal. 868-880.
- Badan Pusat Statistik. Produksi Minyak Bumi dan Gas Alam. http://www.bps.go.id/tab_sub/view.php?tabel=1&daftar=1&id_subyek=10 #. Diakses tanggal 1 Desembar 2014.
- Basak, Tanmay., (2004). Role of Resonance on Microwave Heating of Oil-Water Emulsions, Journal America Institute of Chemical Engineers. Vol. 50. No. 11.
- Barillas, J.L.M., Dutra, T.V., Mata, W., (2008), "Petroleum and Gas", *Improved Oil Recovery Process For Heavy Oil : A Review*, Brazilian Journal of Petroleum and Ga. Vol. 2. Hal. 45-54.
- Bientinesi, M., Pertaca, L., Cerutti, A., Bandinelli, M., (2013), "Journal Petroleum Science and Engineering", A radiofrequency/ microwave heating method for termal heavy oil recovery based on novel tight-shell conceptual design, Science Direct, Vol. 107, Hal. 18-30.
- Chen, Hao., Tang, J., Fang, L., (2007), "Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy", *Coupled simulation of electromagnetic heating* process using the finite diffrence time domain method, , Vol. 41. Hal 50-68.
- Cherbański, R., Rudniak, L., (2013), "Internastional Journal of Thermal Science", Modelling of microwave heating of water in monomode applicator-Influence of heating operating conditions, Science Direct, Vol. 74. Hal 214-229.
- Cottingham dan Greenwood, 1991. Electrityand Magnetism. CambridgeUniversity Press.
- DEPKEU. 2001. UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA NOMOR 22 TAHUN 2001 TENTANG MINYAK DAN GAS BUMI. http://www.sjdih.depkeu.go.id/fullText/2001/22Tahun2001UU.HTM . Diakses tanggal 1 Desember 2014.
- Erdogan, Levent, (2011), "Dielectric Properties of Oil Sand at 2.45 GHz Determined With Rectangular Cavity Resonator. Universite' De' Montre'al.
- Erlan, Dewita., Priambodo, D., Ariayanto, S., (2013), "Pengembangan Nuklir", Penentuan Jarak PLTN dengan Sumur Minyak Untuknhanced Oil Recovery

Ditinjau Dari Aspek Kehilangan Panas dan Keselamatan, Pusat Pengembangan Enerhgi Nuklir (PPEN)-BATAN, Vol. 25. No.2.

- Farag, S., Sobhy, A., Akyel, C., Doucet, J., Chaouki, J (2012), "Applied Thermal Engineering", *Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45 GHz*, Science Direct, Vol. 36, Hal. 360-369
- Hill, J.M., Jenning M.J., (1993). "Application Mathematic Modelling", Formulation of model equation for heating by microwave radiation, Science Direct. Vol 17. Hal. 369-379.
- Hill, J.M., Marchant, T. (1996). *Modelling microwave heating*, Elsevier, Vol. 20, Hal. 3-15.
- Hund, Edgar. (1989), Microwave Communications components and circuit. Mc Graw-Hill.
- Hutagaol, N.I, (2009), Studi Pengaruh Kadar Hidrogen Sulfida Yang Terdapat Pada Minyak Bumi Dalam Proses Pengolahan Di PT. PERTAMINA EP Region Sumatra Field Pangkalan Susu, Tugas Akhir, Universitas Sumatra Utara.
- Inan, U. S., Marshall, R.A., (2011), Numerical Electromagnetic. The FDTD Method, New York : Cambridge University Press.
- Jackson, J.D, (1999), Classical Electrodynamic Third Edition, Unite State of America : Jhon Wiley and Sons, INC.
- Khasif, M., Nasir, N., Akhtar, M.N. (2011), *Experimental Study of Electromagnetic* Waves Affect on Enhanced Oil Recovery, IEEE, Vol. 11, hal 978-982.
- Mutyala, S., Fairbridge, C., Paré, J.R.J., Bélanget, J.M.R., Ng, S., Hawkins, R. (2010), "Fuel Processing Technology", *Microwave application to oil sand and petroleum : A review*, Science Direct, Vol. 91, hal. 127-135.
- Nour, Ab.H., Yunus, R.M., Nour, Az.H., 2010, *Demulsification of Water-in-OilEmulsion by Microwave Heating Technology*, World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 4.
- Ratanadecho, P., Aoki. K., Akahori., (2002). "Applied Mathematical Modelling", A numerical and experiment investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using rectangular wave guide (effects of natural convection and dielectric properties. Journal Science Direct, Vol. 26, Hal. 449-472.
- Sahni, A., Kumar, M., Knapp, R.B., (2000), *Electromagnetic heating Methods for Heavy Oil Reservoirs*, Society of Petroleum Engineers. Hal 19-23.

- Sajjadi, B., Aziz, A.R.A, Ibrahim, S., (2014), "Renewable and Sustainable Energy Reviews", *Investigation, modellingn and reviewing the effective parameters in microwave-assisted transesterification*, Science Direct. Vol. 37, Hal. 762-777.
- Santos, M.D., Neto, A.d., Mata, W., Silva, J.P., (2011), "Journal of Petroleum Science and Engineering", *New antenna modelling using wavelets for heavy oil thermal recovering methods*", Science Direct. Vol. 76, Hal. 63-75.
- Salvi, D., Boldor, D., Ortego, Aita, G.M, Sabliov, C.M, (2010), "Microwave Power Electromagnetic Energy", Numerical Modelling of Continuous Flow Microwave Heating : A crtical Comparison of COMSOL and ANSYS. International Microwave Power Institute. Vol. 44, Hal. 187-197.
- Spight, J.G., (2001), *Hamdbook of petroleum analysis*, Unites Stated of America : Jhon Wiley and Son, INC.
- Sullivan, Dennis, 2000, Electromagnetic Simulation Using The FDTD Method, IEEE Press Series On RF and Microwave Technology. New York.
- Tim Kerja. 1999. *Kamus Minyak dan Gas Bumi*. Jakarta : Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi.
- Young and Freedman, 2002, *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh*. Jakarta : Erlangga.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN 1

(Perhitungan Frekuensi Cut-off)

Dengan menggunakan pandu gelombang rectangular maka Frekuensi *cut-off* pada medium udara :

$$f_{cut-off} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$
$$f_{cut-off} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

Dimana :

 $m, n \pmod{\text{gelombang}} = 1 \operatorname{dan} 1$

a (panjang reservoir) = 10 m

b (lebar reservoir) = 10 m

Diperoleh :

$$f_{cut-off} = \frac{3x10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{10}\right)^2}$$
$$f_{cut-off} = \frac{3x10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{10}\right)^2}$$
$$f_{cut-off} = \frac{3x10^8}{2} \cdot 0.141$$
$$f_{cut-off} = 0.21 \text{ GHz}$$

Frekuensi *cut-off* pada medium *crude oil* :

$$f_{cut-off} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$
$$f_{cut-off} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu'\varepsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$
$$f_{cut-off} = \frac{3x10^8}{2\sqrt{\mu'\varepsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

Dimana :

 ε' (konstanta dielektrik reservoir) = 4,09

 μ' (permeabilitas reservoir) = 1000 mD

Diperoleh :

$$f_{cut-off} = \frac{3x10^8}{2x\sqrt{4,09 \times 1000}} \sqrt{\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{10}\right)^2}$$
$$f_{cut-off} = \frac{3x10^8}{127,91} \cdot 0,141$$
$$f_{cut-off} = 0,003, x10^9 Hz$$
$$f_{cut-off} = 0,003 GHz$$

Syarat propagansi jika $f_{kerja} > f_{cut-off}$. Dalam penelitian ini $f_{kerja} = 2,45$ GHz sedangkan $f_{cut-off} = 0,003$ GHz. Dengan demikian, gelombang mikro dapat dipropagansikan baik dalam medium *crude oil* maupun dalam medium udara.
LAMPIRAN 2

(Perhitungan Konstanta Propagansi)

Konstanta propagansi merupakan bilangan kompleks dengan terdiri atas bagian real dan imaginear. Bagian real dari konstanta propagansi adalah konstanta atenuasi α sedangkan bagian imaginear adalah konstanta fase β . Secara matematis, konstanta propagansi γ dinyatakan dalam persamaan :

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

Konstanta konstanta fase β dan atenuasi α dan ditentukan sebagai berikut :

1. Konstanta Fase

Konstanta Fase dinyatakan dengan :

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$$

Dimana :

>
$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}$$

 $k = \frac{2\pi f}{c}$
 $k = \frac{2x3,14x(2,45,10^9)}{3x10^8}$
 $k = 50,24 \ m^{-1}$

$$k_{c} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^{2} + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^{2}}$$

$$k_{c} = \sqrt{\left(\frac{1x3,14}{10}\right)^{2} + \left(\frac{1x3,14}{10}\right)^{2}}$$

$$k_{c} = \sqrt{0,197192}$$

$$k_{c} = 0,44 \ m^{-1}$$

Diperoleh :

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$$

$$\beta = \sqrt{(50,24)^2 - (0,44)^2}$$

$$\beta = \sqrt{2524,0576 - 0,1936}$$

$$\beta = \sqrt{2523,8064}$$

 $\beta = 50,33 \ m^{-1}$

2. Konstanta Atenuasi

Konstanta Atenuasi dinyatakan dengan persamaan :

$$\alpha = \frac{k^2 \cdot tan\delta}{2 \cdot \beta}$$
$$\alpha = \frac{k^2 \cdot (\varepsilon''/\varepsilon')}{2 \cdot \beta}$$

Dimana :

 ε'_2 (konstanta dielektrik reservoir) = 4,09

 ε''_2 (loss dielektrik reservoir) = 0,007

Diperoleh :

$$\alpha = \frac{(50,24)^2 x (0,007/4,09)}{2x50,33}$$
$$\alpha = \frac{4,3199}{100,66}$$
$$\alpha = 0,04 \ m^{-1}$$

Dengan demikian, berdasarkan perhitungan konstanta propagansi diperoleh :

$$\gamma = 0,04 + j \, 50,33$$

LAMPIRAN 3

(Hasil simulasi perambatan panas dan perambatan gelombang mikro)



A. Variasi parameter waktu

















B. Variasi parameter koordinat posisi



2. Koordinat posisi 160-160



3. Koordinat posisi 170-170





4. Koordinat posisi 180-180

LAMPIRAN 4

(Sintaks Program Visual Basic)

Adapun sintaks code yang digunakan dalam pembuatan simulasi gelombang mikro dan kalor sebagai beikut :

'Introduction Parameter Microwave Dim l, k, x, y, xx, yy, xxx, yyy, a, b, c Dim ga(400, 400) Dim dz(400, 400) Dim ez(400, 400) Dim hx(400, 400), hy(400, 400) Dim n, i, j, ic, jc, nsteps, IE, JE Dim ddx, dt, T, epsz, pi, epsilonr, sigma, eaf, f1 Dim t0, spread, pulse, p(400) 'Introduction Parameter Kalor Dim rho, cp, kt, tand, e2 Dim lossd Dim ddy, h, gain Dim Te(400, 400) Dim Tex(400, 400) Dim Tey(400, 400) Dim Tez(400, 400) Dim Q(400, 400) '=====Parameter microwave==== Private Sub Command1_Click() Picture1.Cls Picture1.Refresh Picture1.BackColor = RGB(255, 255, 255) Picture2.Cls Picture2.Refresh

Picture2.BackColor = RGB(255, 255, 255)

IE = 200JE = 200ic = IE / 2jc = JE / 2ddx = 0.05 $dt = ddx / (6 * (10 ^ 8))$ epsz = 8.85 * (10 ^ -12) lossd = 0.15pi = 3.14159 $f1 = 2.45 * (10 ^ 9)$ 'Parameter INPUT sigma = Val(Text1.Text) epsilon = Val(Text2.Text) nsteps = Val(Text3.Text) t0 = Val(Text4.Text)spread = Val(Text5.Text) ddy = 0.05loosd = 0.15cp = 2000rho = 900epsilonr = 2.8tand = (lossd / epsilonr) kt = 0.38h = 300 '=====Parameter microwave========== For j = 0 To 200 For i = 0 To 200 dz(i, j) = 0ez(i, j) = 0hx(i, j) = 0hy(i, j) = 0

```
ga(i, j) = 1 / (epsilon + (sigma * dt / epsz))

Te(i, j) = 0

Tex(i, j) = 0

Tey(i, j) = 0

Q(0, 0) = 0

Next i

p(j) = j * 2

Next j
```

```
For n = 0 To nsteps

'Picture1(1).Cls

T = T + 1

For i = 1 To IE

For j = 1 To JE

dz(i, j) = dz(i, j) + 0.5 * (hy(i, j) - hy(i - 1, j) - hx(i, j) + hx(i, j - 1))

ez(i, j) = (dz(i, j))

Q(i, j) = 2 * pi * epsz * f1 * epsilonr * (ez(i, j)) ^ 2
```

```
Next j
```

Next i

```
If Option1.Value = True Then

pulse = 200 * Exp(-0.5 * ((t0 - T / 2) / spread) ^ 2)

Else

pulse = 200 * Sin(2 * pi * f1 * dt * T)

End If

dz(ic, jc) = pulse

For i = 1 To JE

For j = 1 To JE

hx(i, j) = hx(i, j) + 0.5 * (ez(i, j) - ez(i, j + 1))

hy(i, j) = hy(i, j) + 0.5 * (ez(i + 1, j) - ez(i, j))

Q(i, j) = h * ddy * ddx * (Te(i + 1, j + 1) - Te(i, j))

Next j
```

```
Next i
'ploting------
If n = p(n / 2) Then
  For i = 1 To JE
     For j = 1 To JE
  l = 1 * j
  k = 1 * i
  xx = 1 * ez(j, i)
  yy = 1 * ez(j + 1, i)
  xxx = 1 * ez(j, i)
  yyy = 1 * ez(j, i + 1)
  a = 0 * ez(j, i): b = 20 * ez(j, i): c = 0 * ez(j, i)
  If (a > 255 Or b > 255 Or c > 255) And (a < 255 Or b < 255 Or c < 255) Then
On Error Resume Next
Picture1.Line (3000 + 12 * (l - k), 12 * ((k + l - xx) - 0))-(3000 + _
12 * (l - k + 1), 12 * ((k + l + 2 - yy) - 0)), RGB(a, b, c)
End If
     Next j
  Next i
End If
If n = p(n / 2) Then
  For i = 1 To JE
    For j = 1 To JE
  l = 1 * j
  k = 1 * i
  gain = 0.01 * 10 ^ 16
  xx = 1 * gain * Te(j, i)
  yy = 1 * gain * Te(j + 1, i)
  xxx = 1 * gain * Te(j, i)
  yyy = 1 * gain * Te(j, i + 1)
  a = 20 * gain * Te(j, i): b = 0 * gain * Te(j, i): c = 0 * gain * Te(j, i)
```

If (a $<\!\!>$ 255 Or b $<\!\!>$ 255 Or c $<\!\!>$ 255) And (a < 255 Or b < 255 Or c < 255) Then On Error Resume Next Picture2.Line (3000 + 12 * (l - k), 12 * ((k + l - xx) - 0))-(3000 + _ 12 * (l - k + 1), 12 * ((k + l + 2 - yy) - 0)), RGB(a, b, c) End If Next j Next i End If Next n Label8.Caption = "Te90=" & gain * Te(90, 90) Close #1 End Sub Private Sub Command2_Click() End End Sub Private Sub Command3_Click() 'PERHITUNGAN DAYA $Text10.Text = (Text7.Text) ^ 2$ Text11.Text = (Text8.Text) ^ 2 Text12.Text = (Text9.Text) ^ 2 End Sub Private Sub Command4_Click() $v = (3 * (10 ^ 8)) / epsilon$ Text6.Text = vEnd Sub Private Sub Form_Load() Picture1.BackColor = RGB(255, 255, 255)

Picture2.BackColor = RGB(255, 255, 255)

End Sub

TENTANG PENULIS



Riwayat Pendidikan Formal:

Ummu Kalsum, sebuah nama yang merupakan wujud doa dan harapan dari kedua orangtua penulis. Lahir pada tanggal 9 Januari 1987 di sebuah desa yang bernama Lampa, Polewali Mandar. Anak pertama dari delapan bersaudara merupakan buah kasih sayang pasangan Ansar (Ayah) dan Suhuria (Ibu). Alamat penulis : Jl. Sila-Sila no. 116 Lampa, Kec. Mapillli, Kab. Polewali Mandar - Sulawesi Barat.

Tahun	Program Pendidikan	Sekolah/ Perguruan Tinggi	Jurusan/Program Studi (Bidang Keahlian)
1992-1993	TK-TPA	TK-TPA DHI Guppi	-
1993-1999	Sekolah Dasar	SD INP. 051 Lampa, Kec. Mapilli, Polewali Mandar	-
1999-2002	Sekolah Menengah Pertama	SMP Negeri 1 Wonomulyo	-
2002-2005	Sekolah Menengah Atas	SMA Negeri 1 Wonomulyo	Ilmu Pengetahuan Alam
2005-2011	Sarjana	Universitas Negeri Makassar (UNM)	Pendidikan Fisika
2012-2013	Pra-Magister	Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya	Fisika
2013-2015	Magister	Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya	Fisika/Fisika Instrumentasi

Publikasi Ilmiah Selama Menempuh Pendidikan Program Pascasarjana:

- Ummu Kalsum, Isa Albanna, "Aplikasi Interdigital Capacitor Sensor Untuk Pengukuran Kadar Garam Berbasis Nondestructive", *Prosiding Seminar Nasional (SENTIA 2015)*, Universitas Politeknik Negeri Malang, Malang 4 Juni 2015, ISSN : 2085-2347.
- Ummu Kalsum, Melania S. Muntini, Yono Hadi Pramono, "Modelling And Simulation Of Microwave Using Two Dimensional FDTD Method", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, *Prosiding Seminar Internasional (ICSSSA 2015)*, Bali 5 Agustus 2015.

Waktu & Tempat	Jenis Kegiatan	Penyelenggara	Peserta/Pemakalah
Surabaya, 18 Juni 2013	Seminar Fisika dan Aplikasinya 2013	Jurusan Fisika FMIPA-ITS	Peserta
Surabaya, 5 Juni 2013	Kuliah Tamu "Eksplorasi Minyak dan Gas Bumi"	Pertamina & Fisika ITS	Peserta
Yogyakarta, 17-18 Mei 2013	Workshop "Softskill Peserta PraS2-S2 Saintek "	UGM-ITS	Peserta
Sidoarjo, 14-16 April 2014	Ujian Nasional SMA/MA, SMK dan Paket C	KEMENDIKBUD RI & PT	Pengawas SP
Surabaya, Feb-Mei 2015	Asistensi Mata Kuliah Fisika Dasar 2	UPMB ITS	Asisten Dosen
Malang, 4 Juni 2015	Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Aplikasinya	Politeknik Negeri Malang	Pemakalah
Bali, 5-6 Agustus 2015	International Conference on Sensor, System Sensor, and Actuator (ICSSSA 2015)	Institut Sepuluh Nopember Surabaya	Pemakalah

Penulis selama menempuh jenjang pendidikan Pra-S2 dan S2, mengikuti kegiatan internal dan eksternal kampus (Ilmiah, Pendidkan, Sosial dan Politik) diantaranya :

Saran dan kritik yang berhubungan dengan tesis ini dapat dikonfirmasi langsung ke alamat email penulis : kalsumtomalolo@gmail.com.