



**APLIKASI *METHOD OF MOMENT* UNTUK PENYELESAIAN
HAMBURAN GELOMBANG MIKRO OLEH SILINDER
KONDUKTIF PADA MODE TE_z**

SKRIPSI

digunakan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Ilmu Fisika (S-1)
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh
Yusrina Saharini
NIM 121810201070

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Syukur alhamdulillah dengan izin Allah SWT yang Maha Kuasa sebuah karya kecil ini kupersembahkan untuk Abah dan Umi tercinta, yang selama ini tiada hentinya memberiku semangat, nasehat, do'a, kasih sayang dan pengorbanan yang telah engkau berikan kepadaku sehingga aku dapat menghadapi semua rintangan yang ada. Abah Umi, terimalah hadiah kecil ini sebagai wujud keseriusanku untuk membalas semua perjuanganmu dan pengorbananmu. Tak lupa pula untuk kakakku tercinta yang selalu memberikan kasih sayangnya kepada adik satu-satunya ini. Guruku, dosenku dan semua orang yang mengajarkanku ilmu.

Kuucapkan beribu terimakasih atas semua pengorbananmu. Hanya sebuah karya kecil ini yang dapat kupersembahkan kepada kalian semua. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian dengan hal-hal yang jauh lebih baik. Atas kekurangan dan kesalahanku, kurendahkan hati serta mohon maaf kuucapkan. Skripsi Kupersembahkan.

MOTO

“Sesungguhnya urusan-Nya apabila Dia menghendaki sesuatu Dia hanya berkata kepadanya, “Jadilah!” Maka jadilah sesuatu itu. Maka Mahasuci (Allah) yang ditangan-Nya kekuasaan atas segala sesuatu dan kepada-Nya kamu dikembalikan” (Terjemah Surat Yasin ayat 82-83)^{*)}

“Dan pada pergantian malam dan siang dan hujan yang diturunkan Allah dari langit, lalu dengan air hujan itu dihidupkan-Nya bumi setelah mati (kering); dan pada kisaran angin terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi kaum yang berakal” (Terjemah Surat Al-Jatsiyah ayat 5)^{**)}

Try not to become a man of success, rather than becoming a man of value
(Kutipan Asli Albert Einstein)^{***)}

*) Umairah, Abdurrahman. 2001. Tokoh-tokoh yang Diabadikan Al-Qur'an. Jakarta: Gema Insani Press.

***) Mulyono, Agus dan Abtokhi, Ahmad. 2006. Fisika dan Al-Qur'an. Malang: UIN Press

***) Isaacson, Walter. 2012. Einstein, Kehidupan dan Pengaruhnya bagi Dunia. Yogyakarta: Bentang Pustaka.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Yusrina Saharini

NIM : 121810201070

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Aplikasi *Method of Moment* untuk Penyelesaian Hamburan Gelombang Mikro oleh Silinder Konduktif pada Mode TE_z ” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 28 Juli 2017

Yang menyatakan,

Yusrina Saharini

NIM 121810201070

SKRIPSI

**APLIKASI *METHOD OF MOMENT* UNTUK PENYELESAIAN
HAMBURAN GELOMBANG MIKRO OLEH SILINDER
KONDUKTIF PADA MODE TE_z**

Oleh

Yusrina Saharini
NIM.121810201070

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D.

Dosen Pembimbing Anggota : Supriyadi, S.Si., M.Si

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Aplikasi *Method of Moment* untuk Penyelesaian Hamburan Gelombang Mikro oleh Silinder Konduktif pada Mode TE_z ” karya Yusrina Saharini telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal :

Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D

Supriyadi, S. Si., M.Si.

NIP. 196812191994021001

NIP. 198204242006041003

Anggota II,

Anggota III,

Drs. Sujito, Ph.D.

Drs. Yuda C. Hariadi, M.Sc., Ph.D

NIP. 196102041987111001

NIP.196203111987021001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Aplikasi *Method of Moment* untuk Penyelesaian Hamburan Gelombang Mikro oleh Silinder Konduktif pada Mode TE_z ; Yusrina Saharini, 121810201070; 2017: 102 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Hamburan (*scattering*) gelombang elektromagnetik sudah diaplikasikan di berbagai bidang seperti bidang kedokteran dalam bentuk sistem tomografi, bidang navigasi dalam sistem terahertz imaging dan masih banyak lagi. Seiring dengan berkembangnya teknologi, pemanfaatan hamburan gelombang elektromagnetik semakin luas karena aman dan lebih murah disbanding dengan *x ray* atau eglombang yang menionisasi lainnya. Karena prospek perkembangan yang masih luas di berbagai bidang maka hamburan gelombang elektromagnetik pada daerah gelombang mikro menjadi topik dalam skripsi ini dengan permasalahan spesifik solusi numerik hamburan gelombang mikro oleh silinder konduktif p.e.c pada mode TE_z .

Tujuan penelitian ini adalah mengaplikasikan metode MoM untuk menyelesaikan medan magnet terhambur oleh silinder konduktif. Akurasi solusi MoM dievaluasi pada berbagai variasi frekuensi dan posisi observer. Selain itu pengaruh perubahan frekuensi sumber dan ukuran silinder yang dinyatakan dengan variasi jari-jari silinder terhadap *magnitude* dan fase gelombang akan dianalisa.

Penelitian ini menggunakan metode MoM untuk aproksimasi numerik yang didasari oleh persamaan Maxwell dalam bentuk differensial dan menggunakan Helmholtz dua dimensi berupa vektor potensial magnetik bentuk integral. Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis kuantitatif dan analisis kualitatif. Mencari nilai *magnitude*, fase gelombang dan *error* relatif pada titik observasi yang melingkar di sekitar silinder adalah analisis secara kuantitatif, sedangkan analisis kualitatif yaitu dengan cara memvisualisasikan nilai *magnitude* dan fase gelombang dalam citra 2 dimensi.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa perbandingan antara solusi numerik terhadap solusi analitik memiliki nilai *error* kurang dari 1% pada frekuensi 3 GHz dan jari-jari silinder $0.15\lambda_0$. Untuk setiap parameter input yang lain nilai *error* relatif yang dihasilkan berbeda. Perubahan frekuensi berpengaruh terhadap *magnitude* dan fase gelombang medan terhambur yang dihasilkan. Semakin besar frekuensi yang diberikan maka nilai *magnitude* pada sudut observasi 0 rad dan 6.28 rad semakin tinggi yaitu sebesar $0.35 A/\lambda_0$, sedangkan grafik *magnitude* medan magnet terhambur yang dihasilkan memiliki banyak pola naik turun yang kontinu. Untuk citra 2D *magnitude* medan magnet terhambur pola warna yang ditunjukkan merupakan tahapan nilai *magnitude* dari tingkat tertinggi sampai terendah. Hal ini juga berlaku pada grafik dan citra 2D fase dengan variasi frekuensi, semakin rendah frekuensi maka pola patahan yang dihasilkan lebih sedikit dan grafik yang terbentuk semakin sederhana dengan nilai

fase yang bernilai positif dan negatif. Begitu juga dengan jari-jari silinder, semakin besar jari-jari silinder yang digunakan *magnitude* medan magnet terhambur menghasilkan kurva naik turun semakin banyak dengan nilai *magnitude* $1.2 A/\lambda_0$, sedangkan pola warna yang dihasilkan sama dengan ukuran silinder yang berbeda. Sedangkan pola yang terbentuk pada citra 2D medan magnet terhambur adalah lebar patahan yang dihasilkan semakin luas seiring dengan perubahan ukuran silinder.

Perubahan keliling permukaan silinder disebabkan karena perubahan jari-jari silinder dan secara otomatis lebar sel juga mengalami perubahan. Penggunaan lebar sel yang sesuai dapat mempengaruhi tingkat akurasi solusi metode MoM terhadap solusi analitik. Dalam penelitian ini hasil solusi numerik sangat mendekati hasil solusi analitik pada lebar sel $0.0004\lambda_0$ yang ditandai dengan kedua grafik yang saling berhimpit dan pada lebar sel tersebut untuk titik observasi dengan sudut observasi 0 rad (di sekitar sudut observasi 6.28 rad) memiliki nilai *magnitude* tertinggi sehingga pada sudut observasi ini dapat dikatakan distribusi medan magnet terhambur yang dihasilkan adalah yang tertinggi.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Aplikasi *Method of Moment* untuk Penyelesaian Hamburan Gelombang Mikro oleh Silinder Konduktif pada Mode TE_z ”. Shalawat dan salam teruntuk baginda tercinta Nabi Muhammad Saw sebagai teladan dan inspirator setiap langkah dalam hidup kita. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penulis mendapatkan bantuan, motivasi serta bimbingan dari berbagai pihak dalam penyusunan skripsi ini. Untuk itu penulis ingin mengucapkan banyak-banyak terima kasih kepada:

1. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.phil., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Utama dan juga Bapak Supriyadi, S.Si., M. Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu waktu, pikiran, tenaga dan perhatiannya dalam membantu penulisan skripsi ini.
2. Drs. Sujito, Ph.D., selaku Dosen Penguji I dan Drs. Yuda C. Hariadi, M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan evaluasi dalam menyempurnakan skripsi ini.
3. Kedua orangtua serta keluarga tercinta yang tiada henti memberikan dukungan serta motivasi kepada penulis.
4. Sahabat-sahabat saya Anik Umi Arifah, Ahmad Alfian Sururi, Siti Fatimatun Nazah, Rizky Ayu Dhiyaztari, Ernik Dwi Safitri
5. Teman-teman Lorentz yang telah memberikan bantuan dan motivasi kepada penulis.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Penulis sadar bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk kesempurnaan skripsi ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR NOTASI	xx
DAFTAR SINGKATAN	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Gelombang Elektromagnetik	6
2.2 Persamaan Gelombang elektromagnetik	8
2.3 Hamburan Gelombang Elektromagnetik	9
2.4 Gelombang Bidang dalam Bentuk Fungsi Gelombang Silinder	10
2.5 Teorema Fungsi Bessel dan Fungsi Hankel	13

2.6	Solusi Analitik Hamburan Gelombang Bidang.....	14
2.7	Fungsi Gelombang Helmholtz Medan Magnet.....	16
2.8	<i>Method of Moment</i>	17
2.9	<i>Pulse Basic Function</i>	19
2.10	Hipotesis	20
BAB 3.	METODE PENELITIAN	23
3.1	Rancangan Penelitian	23
3.2	Jenis dan Sumber Data	24
3.3	Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran.....	24
3.3.1	Variabel Bebas.....	24
3.3.2	Variabel Terikat.....	25
3.3.3	Variabel Kontrol.....	26
3.4	Kerangka Pemecahan Masalah.....	26
3.5	Prosedur Penelitian	28
3.5.1	Aproksimasi Solusi Numerik (Metode MoM)	28
3.5.2	Perbandingan Solusi Numerik MoM terhadap Solusi Analitik.....	30
3.5.3	Pengaruh Perubahan Frekuensi, Pengaruh Ukuran p.e.c dan Pengaruh Lebar Sel pada berbagai Letak Titik Observasi terhadap <i>Magnitude</i> dan Fase Gelombang	31
3.6	Analisis Data	33
3.6.1	Perbandingan Solusi Numerik MoM terhadap Solusi Analitik.....	33
3.6.2	Pengaruh Perubahan Frekuensi, Pengaruh Ukuran p.e.c dan Pengaruh Lebar sel pada berbagai Titik Observasi terhadap <i>Magnitude</i> dan Fase gelombang	36
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1	Metode MoM pada Solusi Numerik untuk Hamburan Gelombang Bidang pada Mode <i>TE_z</i>	38
4.2	Akurasi Solusi MoM Relatif Terhadap Solusi Analitik.....	43
4.3	Pengaruh Perubahan Frekuensi dan Ukuran Silinder terhadap <i>Magnitude</i> dan Fase Gelombang.....	49

4.3.1	Pengaruh Perubahan Frekuensi Sumber terhadap <i>Magnitude</i> dan Fase Gelombang.....	49
4.3.2	Pengaruh Ukuran Silinder terhadap <i>Magnitude</i> dan Fase Gelombang.....	59
4.4	Pengaruh Lebar Sel untuk Akurasi Solusi MoM Relatif terhadap Solusi Analitik.....	66
BAB 5. PENUTUP.....		74
5.1	Kesimpulan	74
5.2	Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA.....		76
LAMPIRAN.....		78

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 4.1a	Grafik <i>magnitude</i> medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz	78
Lampiran 4.1b	Grafik <i>magnitude</i> medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz	79
Lampiran 4.2a	Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz	80
Lampiran 4.2b	Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz	81
Lampiran 4.3a	Grafik <i>magnitude</i> medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$	82
Lampiran 4.3b	Grafik <i>magnitude</i> medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$	83
Lampiran 4.4a	Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$	84
Lampiran 4.4b	Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$	85
Lampiran 4.5a	Citra 2D <i>magnitude</i> medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz	86

Lampiran 4.5b	Citra 2D <i>magnitude</i> medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz.....	87
Lampiran 4.6a	Citra 2D fase gelombang medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz.....	88
Lampiran 4.6b	Citra 2D fase gelombang medan magne terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz.....	89
Lampiran 4.7a	Citra 2D <i>magnitude</i> medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$	90
Lampiran 4.7b	Citra 2D <i>magnitude</i> medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$	91
Lampiran 4.8a	Citra 2D fase gelombang medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$	92
Lampiran 4.8b	Citra 2D fase gelombang medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah <i>mesh</i> dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$	93
Lampiran 4.9a	<i>Error</i> relatif <i>magnitude</i> hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz.....	94
Lampiran 4.9b	<i>Error</i> relatif <i>magnitude</i> hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz.....	95

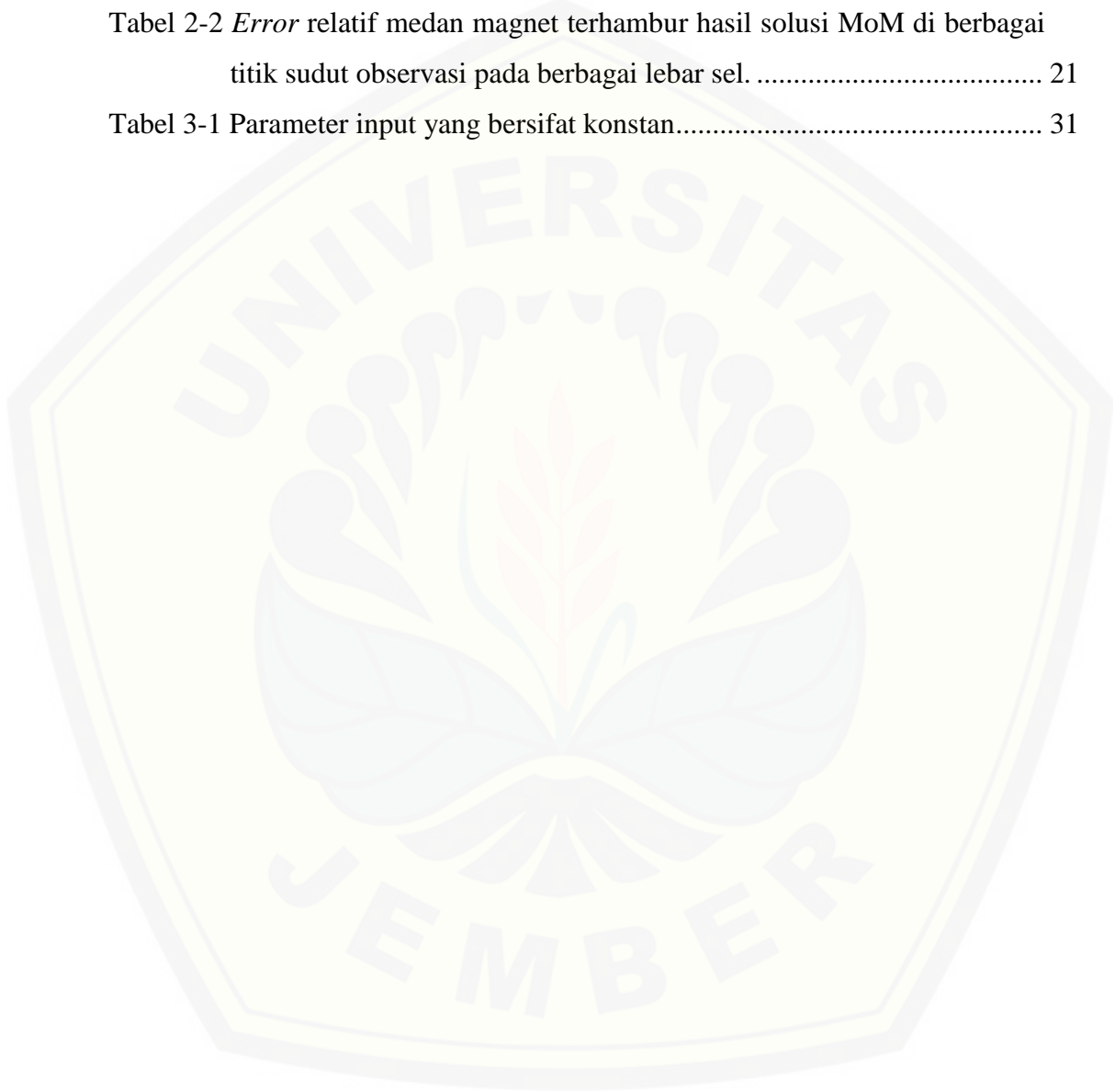
Lampiran 4.10a <i>Error</i> relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-50 GHz.....	96
Lampiran 4.10b <i>Error</i> relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz.....	97
Lampiran 4.11a <i>Error</i> relatif <i>magnitude</i> hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$	98
Lampiran 4.11b <i>Error</i> relatif <i>magnitude</i> hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$	99
Lampiran 4.12a <i>Error</i> relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$	100
Lampiran 4.12b <i>Error</i> relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$	101

DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Hasil komputasi medan magnet terhambur *Bistatic RSC* dengan MoM dan solusi analitik pada sudut 0 rad, $\pi/2$ rad dan π rad 21

Tabel 2-2 *Error* relatif medan magnet terhambur hasil solusi MoM di berbagai titik sudut observasi pada berbagai lebar sel. 21

Tabel 3-1 Parameter input yang bersifat konstan..... 31



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Perambatan gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet 6

Gambar 2-2 Panjang gelombang dan frekuensi dalam spektrum elektromagnetik..... 7

Gambar 2-3 Gelombang elektromagnetik polarisasi-bidang dengan atung medan listrik E_x dan medan magnet H_y yang saling tegak lurus dalam medium konduktif yang sefase yang menunjukkan arah aliran energy..... 8

Gambar 2-4 Plot 2D dari modulus (a) medan H dan (b) medan E, untuk polarisasi TE dengan $ka = \pi$; $kh = 3\pi$; $n = 1.1, 2, 50$ 10

Gambar 2-5 Gelombang bidang seragam yang merambat dalam arah $+x$ 11

Gambar 2-6 Gelombang datang *plane wave* TE_z yang seragam pada silinder konduktif..... 14

Gambar 2-7 Pulse Basis Function..... 19

Gambar 2-8 Aproksimasi tangga dari fungsi menggunakan *pulse basis function* 20

Gambar 3-1 Skema rancangan penelitian 23

Gambar 3-2 Kerangka Pemecahan Masalah 27

Gambar 3-3 Kontur silinder dibagi ke dalam beberapa sel..... 29

Gambar 3-4 Penampang lintang silinder konduktif sempurna 30

Gambar 3-5 Konfigurasi titik observasi pada sudut tertentu 32

Gambar 3-6 Bidang evaluasi 2D di sekitar silinder p.e.c..... 33

Gambar 3-7 Contoh bentuk grafik hubungan antara *magnitude* dan sudut observasi dengan jari jari titik observasi konstan 34

Gambar 3-8 Contoh bentuk grafik hubungan antara fase dan sudut observasi dengan jari-jari titik observasi konstan 34

Gambar 3-9 Contoh grafik hubungan antara *error* relatif solusi numerik terhadap solusi analitik dengan sudut observasi 35

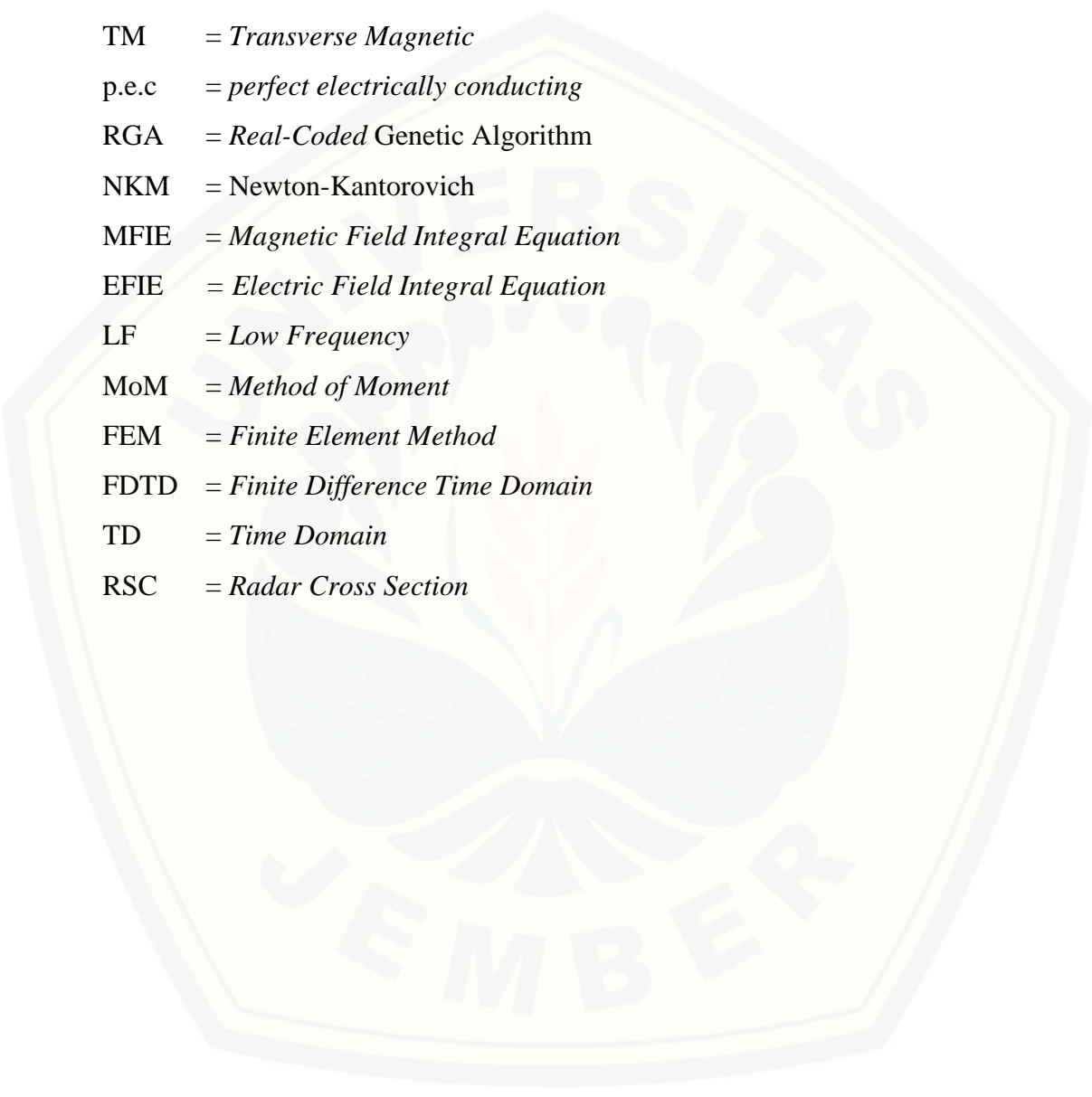
Gambar 3-10 Contoh grafik hubungan antara lebar sel terhadap <i>magnitude</i> atau <i>phase</i>	36
Gambar 3-11 Contoh citra dua dimensi medan magnet terhambur <i>magnitude</i> atau <i>phase</i>	36
Gambar 4-1 Kontur permukaan silinder dibagi ke dalam beberapa sel.....	39
Gambar 4-2 Gambaran parameter sebuah sel p.e.c untuk polarisasi TE	42
Gambar 4-3 Penampang melintang silinder dengan titik observasi di luar silinder.....	43
Gambar 4-4 Perbandingan nilai <i>magnitude</i> hamburan medan magnet dari p.e.c dengan jari jari $0.15\lambda_0$ pada frekuensi 3GHz antara solusi analitik dan solusi numerik pada titik observasi dengan jari jari 1 m dan sudut observasi 0 sampai dengan 6,28 radian.....	45
Gambar 4-5 Nilai <i>error</i> relatif <i>magnitude</i> hasil numerik terhadap hasil analitik frekuensi 3 GHz, jari-jari silinder $0.15\lambda_0$ dan jarak titik observasi dari pusat silinder 1 m.....	46
Gambar 4-6 Perbandingan nilai fase gelombang antara solusi analitik dan solusi numerik untuk frekuensi frekuensi 3 GHz, jari-jari silinder $0.15\lambda_0$ dan jarak titik observasi dari pusat silinder 1 m.....	47
Gambar 4-7 Nilai <i>error</i> relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik frekuensi 3 GHz, jari-jari silinder $0.15\lambda_0$ dan jarak titik observasi dari pusat silinder 1 m.....	48
Gambar 4-8 <i>Magnitude</i> medan magnet terhambur pada beberapa variasi frekuensi oleh p.e.c dengan jari jari silinder $0.07\lambda_0$ di titik observasi dengan jari jari 1 m dan sudut 0 sampai dengan 6.28 radian.....	51
Gambar 4-9 Citra dua dimensi <i>magnitude</i> medan magnet terhambur pada beberapa variasi frekuensi oleh p.e.c dengan jari jari silinder $0.07\lambda_0$	52
Gambar 4-10 Fase medan magnet terhambur pada beberapa variasi frekuensi oleh p.e.c dengan jari jari silinder $0.07\lambda_0$ di titik observasi dengan jari jari 1 m dan sudut 0 sampai dengan 6.28 radian.....	56

Gambar 4-11 Citra dua dimensi fase medan magnet terhambur pada beberapa variasi frekuensi oleh p.e.c dengan jari jari silinder $0.07\lambda_0$	57
Gambar 4-12 <i>Magnitude</i> medan magnet terhambur oleh p.e.c dengan berbagai variasi jari jari penghambur, ketika diiluminasi dengan gelombang mikro 3GHz.....	60
Gambar 4-13 Citra dua dimensi sebaran <i>magnitude</i> medan magnet terhambur oleh p.e.c dengan berbagai variasi jari jari penghambur, ketika diiluminasi dengan gelombang mikro 3GHz.	61
Gambar 4-14 Fase medan magnet terhambur oleh p.e.c dengan berbagai variasi jari jari penghambur, ketika diiluminasi dengan gelombang mikro 3GHz dan diukur pada titik observasi dengan jari jari 1 m.....	64
Gambar 4-15Citra dua dimensi fase medan magnet terhambur oleh p.e.c dengan berbagai variasi jari jari penghambur, ketika diiluminasi dengan gelombang mikro 3GHz	65
Gambar 4-16 Medan magnet terhambur di titik observasi (0.5m, 0 rad) ketika silinder p.e.c dengan diameter $0.09\lambda_0$ ketika disinari dengan gelombang mikro dengan mode TE_z dengan frekuensi 5 GHz.....	68
Gambar 4-17Medan magnet terhambur di titik observasi (0.5m, 1.57 rad) ketika silinder p.e.c dengan diameter $0.09\lambda_0$ ketika disinari dengan gelombang mikro dengan mode TE_z dengan frekuensi 5 GHz.	70
Gambar 4-18Medan magnet terhambur di titik observasi (0.5m, 3.14 rad) ketika silinder p.e.c dengan diameter $0.09\lambda_0$ ketika disinari dengan gelombang mikro dengan mode TE_z dengan frekuensi 5 GHz.....	72

DAFTAR NOTASI

μ_0	= Permeabilitas udara
ϵ_0	= Permittivitas udara
σ	= Konduktivitas
ω	= Frekuensi sudut
a_n	= Koefisien amplitudo
k	= Bilangan gelombang
ρ	= Posisi titik observasi (antenna) dari pusat koordinat
ρ'	= Posisi titik pusat sel dari pusat koordinat
ϕ	= Sudut periodik
J_n	= Fungsi Bessel bentuk pertama
Y_n	= Fungsi Bessel bentuk kedua
$H_0^{(1,2)}$	= Fungsi Hankel bentuk pertama dan kedua
H_z^{inc}	= Medan magnet datang (<i>incident field</i>)
H_z^s	= Medan magnet terhambur
H_z^t	= Medan magnet total
J_z	= Rapat arus
Z	= Elemen matrik
Ω_n	= Sudut orientasi
w_n	= Lebar sel hasil cacahan
\vec{A}	= Potensial vector magnetik
\vec{G}	= Fungsi Green's
ΔC_n	= Lebar sel
λ_0	= Panjang Gelombang di udara
a	= Jari-jari lingkaran
N	= Jumlah sel
N_{Ant}	= Jumlah titik observasi (antena)

DAFTAR SINGKATAN



CEM	= <i>Computational Electromagnetic</i>
TE	= <i>Transverse Electric</i>
TM	= <i>Transverse Magnetic</i>
p.e.c	= <i>perfect electrically conducting</i>
RGAs	= <i>Real-Coded Genetic Algorithm</i>
NKM	= <i>Newton-Kantorovich</i>
MFIE	= <i>Magnetic Field Integral Equation</i>
EFIE	= <i>Electric Field Integral Equation</i>
LF	= <i>Low Frequency</i>
MoM	= <i>Method of Moment</i>
FEM	= <i>Finite Element Method</i>
FDTD	= <i>Finite Difference Time Domain</i>
TD	= <i>Time Domain</i>
RSC	= <i>Radar Cross Section</i>

BAB 1. PENDAHULUAN

Bagian pendahuluan merupakan bagian pemaparan hal yang melatar belakangi dilakukakannya penelitian ini. Berdasarkan latar belakang tersebut didapatkan beberapa rumusan permasalahan yang akan dipecahkan serta menentukan batasan masalah untuk membatasi rumusan masalah agar tidak menyimpang. Kemudian pada bagian ini terdapat tujuan penelitian yang ingin dicapai dan terakhir pemaparan manfaat dari hasil penelitian yang dilakukan.

1.1 Latar Belakang

Teknologi *microwave* telah menjadi unsur penting dari ilmu pengetahuan saat ini. Selain relatif murah, handal, dapat diimplementasikan dan instalasi serta tidak berbahaya bagi makhluk hidup juga bebas dari ionisasi dibandingkan dengan sinar gamma dan sinar x (Semenov and Corfield, 2008). Gelombang mikro merupakan gelombang elektromagnetik dengan struktur medan listrik dan medan magnet yang merambat secara tegak lurus dan mempunyai panjang gelombang relatif kecil yaitu 10^{-1} m sampai dengan 10^{-4} m dan nilai frekuensi yang berkisar sekitar 10^9 Hz sampai 10^{12} Hz. Pemanfaatan frekuensi gelombang mikro digunakan secara luas untuk bahan penelitian dasar untuk aplikasi elektronik dan masalah hamburan misalnya sistem tomografi pada bidang kedokteran sebagai rontgen yang aman dan prediksi radar target yang beroperasi memakai sifat pantulan. Meskipun masing-masing aplikasi memerlukan pendekatan yang berbeda, dengan titik umum bahwa semua tergantung pada pemecahan persamaan Maxwell (Pozar, 1998).

Gelombang mikro disebut gelombang transversal karena medan listrik dan medan magnet bergeser tegak lurus terhadap arah perambatannya dan gelombang transversal terjadi dalam dua keadaan bebas dari polarisasi yaitu polarisasi vertikal dan horizontal. Pada dasarnya, silinder konduktif p.e.c merupakan bahan yang memiliki sifat konduktor listrik sempurna dengan konduktivitas tak terhingga sehingga ketika gelombang mikro ditembakkan pada silinder konduktif dalam ruang dengan permitivitas udara maka komponen medan listrik dan medan

magnet akan terhambur di sekitar silinder dan medan yang terdapat di dalam silinder dilemahkan atau dinolkan. Jika $E_z = 0$ dinamakan gelombang TE, sedangkan apabila $B_z = 0$ disebut dengan gelombang TM (Griffiths, 1999). Gelombang TE dalam konduktor menyebabkan rapat arus tidak bernilai nol. Untuk polarisasi TE rapat arus bebas dalam konduktor sebanding dengan medan listrik, medan dimaksimalkan jika ditinjau dalam arah tegak lurus terhadap segmen sel pusat dan medan nol jika ditinjau dalam bidang sel. Dengan demikian, orientasi sel adalah parameter kritis sedangkan aliran arus TM mengalir dalam arah \hat{z} menyebabkan orientasi sel dalam bidang lintang tidak kritis (Collin, 2001).

Beberapa ilmuwan melakukan penelitian tentang hamburan gelombang mikro menggunakan berbagai metode penyelesaian algoritma CEM. Roy *et al* (Roy *et al.*, 1998) menyebutkan bahwa MoM dapat diterapkan untuk merubah domain frekuensi menjadi domain waktu pada hamburan TM dari solusi persamaan gelombang yang direpresentasikan oleh metode *hybrid* untuk memperoleh grafik arus induksi pada konduktor sebagai hubungan antara *magnitude* dan *phase*. Borghi *et al* (Borghi *et al.*, 1996) menunjukkan penggunaan metode impedansi efektif untuk menganalisis difraksi gelombang bidang dengan menentukan modulus plot 2D dari medan pada masing-masing polarisasi TE dan TM. Plot semilogaritma hamburan *cross section* σ_s ditunjukkan sebagai fungsi dari sudut hamburan $\bar{\vartheta}$ diberikan untuk membandingkan keduanya (TE dan TM). Aplikasi TD-MoM pernah dilakukan oleh Azari (Azari *et al.*, 2014) yaitu untuk mendapatkan pulsa Gaussian *magnitude* medan magnet H^{inc} terhadap waktu dan frekuensi untuk membandingkan tanggapan arus peralihan dari efek variasi temporal *basis function*.

Berdasarkan penelitian tersebut peneliti ingin mengetahui keakuratan dari MoM untuk menyelesaikan MFIE masalah hamburan gelombang mikro dengan menganalisis *magnitude* dan *phase* dari medan terhambur pada kasus TE. Pengaruh difraksi menyebabkan persamaan integral medan terhambur non linear/*ill posed* sehingga solusi yang dihasilkan menjadi tidak valid, ada kala solusi ditemukan tetapi tidak akurat sehingga digunakan metode yang dapat

memberikan hasil maksimal dan akurat jika metode numerik mendekati hasil eksak (Joachimowicz et al., 1998).

Di dalam penelitian ini dilakukan simulasi hamburan gelombang mikro dengan cara mengiluminasi silinder p.e.c oleh sumber gelombang bidang TE dengan variasi jari-jari permukaan silinder. Jari-jari mempengaruhi lebar sel pada silinder. Selain itu, variabel yang berpengaruh pada hamburan gelombang yaitu frekuensi sumber. Hasil simulasi hamburan gelombang mikro oleh silinder konduktif akibat variasi jari-jari dan lebar sel merupakan perbandingan medan magnet total dari metode analitik dan numerik yang berupa grafik hubungan antara *magnitude* dan fase gelombang. Penyelesaian secara numerik dibagi menjadi 3 yaitu FDTD, FEM dan MoM. Akan tetapi metode numerik yang berguna untuk menyelesaikan masalah radiasi dan hamburan adalah MoM. Aplikasi MoM merupakan teknik umum untuk menyelesaikan persamaan integral dari medan magnet menggunakan pendekatan dengan membagi struktur silinder menjadi beberapa segmen sel yang diperluas menggunakan *basis function* untuk memperoleh hasil yang mendekati solusi analitik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan sebelumnya, rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana aplikasi MoM untuk menyelesaikan hamburan gelombang mikro oleh silinder konduktif yang ditinjau pada mode TE_z dibandingkan dengan metode analitik?
2. Bagaimana pengaruh variasi frekuensi sumber dan ukuran silinder terhadap *magnitude* dan fase gelombang dari medan magnet terhambur?
3. Bagaimana pengaruh lebar sel untuk akurasi solusi MoM relatif terhadap solusi analitik?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari adanya penyimpangan maupun pelebaran pokok masalah dalam penyusunan penelitian ini maka peneliti memberikan batasan masalah

1. Metode yang digunakan untuk aproksimasi numerik pada penelitian ini adalah metode MoM yang diterapkan dalam permasalahan hamburan gelombang mikro TE_z oleh silinder konduktif. Medan yang akan dicari adalah medan magnet terhambur di sekitar silinder akibat dari silinder konduktif yang disinari oleh gelombang mikro TE_z .
2. Sumber pemancar berupa gelombang bidang dalam bentuk fungsi gelombang silinder menggunakan teorema fungsi Bessel jenis pertama dan fungsi Hankel jenis kedua untuk solusi analitiknya.
3. Bahan yang digunakan adalah silinder dengan konduktor listrik sempurna (p.e.c) $\sigma = \infty$ untuk variasi frekuensi dan jari-jari silinder dengan kontur silinder dibagi ke dalam beberapa bagian sel.
4. Tingkat keakuratan antara aproksimasi numerik dan aproksimasi analitik ditentukan oleh *error* relatif dari nilai *magnitude* dan fase gelombang dan Perubahan *magnitude* dan fase gelombang akan dianalisis dalam bentuk grafik dan citra 2D medan magnet terhambur.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah mengaplikasikan MoM untuk menentukan medan magnet terhambur oleh silinder konduktif ketika disinari gelombang mikro dengan mode TE_z . Solusi MoM akan dipelajari berdasar error relative solusi relative terhadap solusi eksak. Studi akan dilakukan pada berbagai variasi frekuensi, ukuran silinder penghambur dan titik observasi. Perubahan *magnitude* dan fase gelombang akan diamati dari *plotting* citra 2D medan magnet terhambur. Aplikasi dari penelitian ini seperti pada divais pendeteksi adanya celah tersembunyi yang terhalang bahan konduktif dan pendeteksi keretakan pipa di dalam tanah.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui seberapa akurat MoM untuk menyelesaikan hamburan gelombang elektromagnetik. Beberapa manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

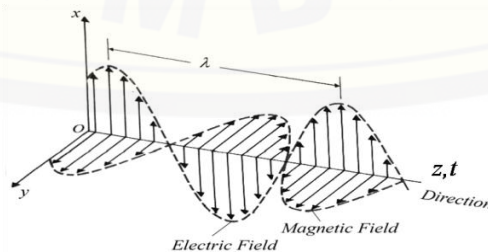
1. Hasil penelitian dapat dijadikan penunjang alternatif dan acuan bagi peneliti selanjutnya untuk mendapatkan informasi yang lebih akurat tentang pengaplikasian metode MoM dalam menyelesaikan masalah hamburan gelombang mikro TE_z .
2. Memberikan sumbangan penelitian di bidang fisika komputasi.
3. Memberikan informasi-informasi fisis yang berkaitan dengan hamburan gelombang mikro khususnya pada silinder konduktif.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka memaparkan tinjauan teori yang berkaitan dengan permasalahan yang diangkat dalam penelitian. Bagian ini diawali oleh penjelasan gelombang elektromagnetik dilanjutkan dengan memaparkan hasil-hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan masalah hamburan gelombang elektromagnetik. Pemaparan penyelesaian solusi analitik masalah hamburan gelombang mikro TE_z oleh silinder konduktif dan pemaparan sebagian dari penyelesaian numeriknya mengenai metode MoM, kemudian diakhiri dengan hipotesis penelitian.

2.1 Gelombang Elektromagnetik

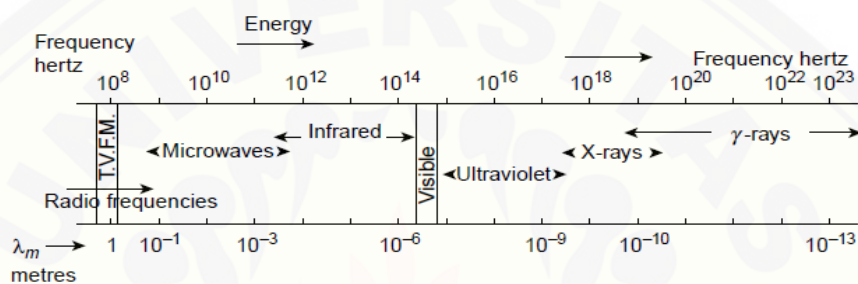
Pembahasan tentang gelombang elektromagnetik diawali oleh teori Maxwell yang dikemukakan sekitar abad ke 19. Teori gelombang elektromagnetik merupakan salah satu dari fenomena yang tidak dapat dijelaskan dengan fisika klasik. Gelombang diartikan sebagai gejala suatu perambatan getaran atau gangguan yang membawa energi, sedangkan elektromagnetik merupakan sifat kelistrikan dan kemagnetan yang ditimbulkan. Maka gelombang yang dapat merambat tanpa adanya medium (zat perantara) artinya gelombang ini dapat merambat dalam keadaan bagaimanapun tanpa memerlukan medium dan terdiri dari komponen listrik dan magnet disebut gelombang elektromagnetik. Dalam gelombang elektromagnetik, gangguan (osilasi) terjadi pada medan \vec{E} dan medan \vec{B} . Gambar 2-1 menunjukkan perambatan gelombang dengan komponen medan listrik dan medan magnet (Harrington, 2001).



Gambar 2-1 Perambatan gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet (Cheng, 2013)

Dari gambar dijelaskan arah medan magnet saling tegak lurus terhadap arah medan listrik, sedangkan arah rambat gelombang elektromagnetik juga tegak lurus terhadap dua medan tersebut sehingga gelombang elektromagnetik termasuk dalam gelombang transversal (Cheng, 2013).

Gelombang elektromagnetik ditimbulkan ketika terjadinya perubahan medan listrik yang berupa kecepatan. Elektron bergerak dari level energi tinggi ke rendah dalam sebuah atom yang akan meradiasikan sebuah gelombang dengan panjang gelombang dan frekuensi tertentu (Pain, 2005).



Gambar 2-2 Panjang gelombang dan frekuensi dalam spektrum elektromagnetik (Pain, 2005)

Gambar 2-2 menunjukkan spektrum frekuensi dari gelombang elektromagnetik. Semua gelombang ini mempunyai eksposisi karakteristik fisika yang sama. *Microwave* termasuk kedalam spektrum gelombang elektromagnetik dengan frekuensi antara 10^9 sampai dengan 10^{10} dan rentang panjang gelombang dari 10^{-1} sampai 10^{-3} (Pain, 2005).

Energi elektromagnetik merambat dalam gelombang dengan beberapa parameter yang bisa diukur yakni: panjang gelombang, frekuensi, amplitudo dan kecepatan. Melalui persamaan gelombang elektromagnetik, Maxwell dapat memprediksi kecepatan gelombang elektromagnetik sebesar :

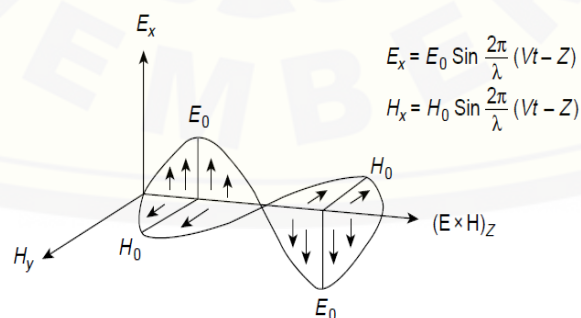
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.1)$$

yang secara eksperimental nilainya sama dengan kecepatan cahaya yang konstan ($c = 3 \times 10^8 m/s$). Terbentuknya gelombang elektromagnetik didasarkan pada penemuan Faraday yang menyatakan “perubahan fluks magnetik dapat

menimbulkan medan listrik” dan arus pergeseran yang sudah dihipotesiskan Maxwell sebelumnya, dengan hipotesa baru Maxwell “jika perubahan fluks magnetik dapat menimbulkan medan listrik maka perubahan fluks listrik juga harus dapat menimbulkan medan magnet”. Hipotesa Maxwell mengenai gelombang elektromagnetik ini kemudian dibuktikan secara eksperimen oleh Heinrich Hertz (Balanis, 2012).

2.2 Persamaan Gelombang elektromagnetik

Teori gelombang elektromagnetik pertama kali dikemukakan oleh *James Clerk Maxwell* (1831-1879). Ini berawal dari beberapa hukum dasar yang telah dipelajari, yakni hukum Coulomb, hukum Biot-Savart atau hukum Ampere dan hukum Faraday. Hukum Coulomb menjelaskan bagaimana muatan listrik dapat menghasilkan medan listrik, hukum Biot-Savart atau hukum Ampere memberikan penjelasan bagaimana arus listrik dapat menghasilkan medan magnet, dan hukum Faraday menyatakan bahwa perubahan medan listrik dapat menghasilkan GGL induksi. Dari Pernyataan diatas, Maxwell berpendapat bahwa ketika terdapat perubahan medan listrik (\vec{E}), maka akan terjadi perubahan medan magnetik (\vec{B}) dan Maxwell berasumsi perubahan medan listrik dan perubahan medan magnetik ini menghasilkan gelombang medan yang dapat merambat di ruang hampa. Berbeda dengan gelombang mekanik, gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium untuk merambat (Harrington, 2001). Gambar 2-3 menunjukkan perambatan medan gelombang elektromagnetik.



Gambar 2-3 Gelombang elektromagnetik polarisasi-bidang dengan medan listrik E_x dan medan magnet H_y yang saling tegak lurus dalam medium konduktif yang sefase yang menunjukkan arah aliran energi (Pain, 2005)

Koreksi Maxwell tentang hukum Ampere yang menyatakan bahwa medan magnet ditimbulkan dengan dua cara karena adanya arus listrik dan dengan adanya perubahan medan listrik. Berdasarkan paparan tersebut persamaan Maxwell menjadi

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (\text{Hukum Gauss}) \quad (2.2a)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2b)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Faraday}) \quad (2.2c)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Hukum ampere}) \quad (2.2d)$$

Pernyataan ini dalam persamaan maxwell menjadi hal yang mendasari untuk memprediksi adanya gelombang elektromagnetik yang dapat dipropagasi melalui ruang hampa pada kecepatan cahaya yang konstan c (Kraus, 1991).

2.3 Hamburan Gelombang Elektromagnetik

Hamburan gelombang elektromagnetik ditinjau dari sudut pandang elektromagnetik klasik. Landasan alami ditentukan oleh persamaan Maxwell (Muinonen, 2012)

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

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3b)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3c)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3d)$$

dimana \vec{E} adalah medan listrik, \vec{B} rapat fluks magnetik, \vec{D} pergeseran listrik dan \vec{H} adalah medan magnet. ρ dan \vec{j} , berturut-turut, rapat muatan bebas dan rapat arus. Rapat muatan dan arus untuk menentukan medan yang jelas, hubungan konstitutif menggambarkan interaksi bahan dan medan yang digunakan

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.4a)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.4c)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.4c)$$

dimana σ konduktivitas listrik, ϵ permitivitas listrik dan μ permeabilitas magnetik. Diasumsikan bahwa tidak ada muatan bebas atau arus dan medan yang tergantung waktu merupakan jenis harmonik $\exp(-j\omega t)$, kemudian persamaan Maxwell disederhanakan dalam bentuk

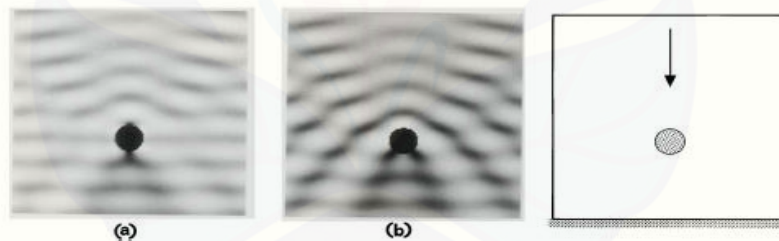
$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.5a)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.5b)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.5c)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J} \quad (2.5d)$$

Hamburan gelombang bidang oleh silinder lingkaran dengan konduktif sempurna ditinjau saat medan dekat untuk polarisasi TM dan saat medan jauh untuk polarisasi TE pernah dilakukan oleh Borghi *et al* tahun 1995 menggunakan metode impedansi efektif untuk mendapatkan plot dua dimensi medan terhambur TM dan TE. Untuk hasil medan terhambur polarisasi TE seperti pada gambar 2-4

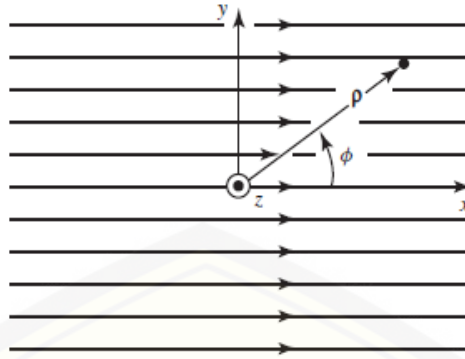


Gambar 2-4 Plot 2D dari modulus (a) medan H dan (b) medan E, untuk polarisasi TE dengan $ka = \pi$; $kh = 3\pi$; $n = 1.1, 2, 50$ (Borghi et al., 1996)

Disisi kanan merupakan gambar skematik dari susunan sketsa geometris dan panah menunjukkan arah gelombang bidang datang (Borghi et al., 1996).

2.4 Gelombang Bidang dalam Bentuk Fungsi Gelombang Silinder

Hamburan gelombang bidang dengan struktur silinder dapat diselesaikan menggunakan ekspresi fungsi gelombang silinder. Diasumsikan bahwa sebuah gelombang bidang yang seragam dinormalisasi merambat dalam arah $+x$ seperti ditunjukkan pada Gambar 2-5.



Gambar 2-5 Gelombang bidang seragam yang merambat dalam arah +x (Balanis, 2012)

Persamaannya dapat dituliskan (Balanis, 2012)

$$\vec{H} = \hat{a}_z H_z^+ = \hat{a}_z H_0 e^{-jkx} = \hat{a}_z e^{-jkx} \quad (2.6)$$

gelombang bidang dapat diwakili jumlah tak hingga dari fungsi gelombang silinder dalam bentuk

$$H_z^+ = e^{-jkx} = e^{-jk\rho \cos \phi} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n J_n(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.7)$$

karena harus periodik dalam ϕ dan terhingga pada $\rho = 0$. Untuk menentukan koefisien amplitudo a_n dengan mengalikan kedua sisi pada persamaan (2.7) dengan $e^{-jm\phi}$, dimana m bilangan bulat dan diintegrasikan dari 0 sampai 2π

$$\int_0^{2\pi} e^{-j(k\rho \cos \phi + m\phi)} d\phi = \int_0^{2\pi} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n J_n(k\rho) e^{j(n-m)\phi} \right] d\phi \quad (2.8)$$

antara integral dan penjumlahan dipisahkan maka

$$\int_0^{2\pi} e^{-j(k\rho \cos \phi + m\phi)} d\phi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n J_n(k\rho) \int_0^{2\pi} e^{j(n-m)\phi} d\phi \quad (2.9)$$

menggunakan kondisi ortogonal

$$\int_0^{2\pi} e^{j(n-m)\phi} d\phi = \begin{cases} 2\pi & n = m \\ 0 & n \neq m \end{cases} \quad (2.10)$$

jika $n = m$ maka sisi kanan persamaan (2.9) disederhanakan menjadi

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n J_n(k\rho) \int_0^{2\pi} e^{j(n-m)\phi} d\phi = 2\pi a_m J_m(k\rho) \quad (2.11)$$

menggunakan integral pada persamaan (2.11)

$$\int_0^{2\pi} e^{+j(Z \cos \phi + n\phi)} d\phi = 2\pi j^n J_n(Z) \quad (2.12)$$

sisi kiri persamaan (2.9) dapat ditulis

$$\int_0^{2\pi} e^{-j(Z \cos \phi + m\phi)} d\phi = 2\pi j^{-m} J_{-m}(-k\rho) \quad (2.13)$$

karena

$$J_{-m}(x) = (-1)^m J_m(x) \quad (2.14a)$$

$$J_m(-x) = (-1)^m J_m(x) \quad (2.14b)$$

persamaan (2.13) dapat dituliskan

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} e^{-j(k\rho \cos \phi + m\phi)} d\phi &= 2\pi j^{-m} J_{-m}(-k\rho) \\ &= 2\pi j^{-m} (-1)^m J_m(-k\rho) \\ &= 2\pi j^{-m} (-1)^m (-1)^m J_m(k\rho) \\ &= 2\pi j^{-m} (-1)^{2m} J_m(k\rho) \\ &= 2\pi j^{-m} J_m(k\rho) \end{aligned} \quad (2.15)$$

menggunakan persamaan (2.11) dan (2.15), menyederhanakan (2.9) menjadi

$$2\pi j^{-m} J_m(k\rho) = 2\pi a_m J_m(k\rho) \quad (2.16)$$

maka

$$a_m = j^{-m} \quad (2.17)$$

maka persamaan (2.7)

$$H_z^+ = e^{-jkx} = e^{-jk\rho \cos \phi} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n J_n(k\rho) e^{jn\phi} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^{-n} J_n(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.18)$$

dengan cara yang sama dapat ditunjukkan

$$H_z^- = e^{+jkx} = e^{+jk\rho \cos \phi} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^{+n} J_n(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.19)$$

2.5 Teorema Fungsi Bessel dan Fungsi Hankel

Fungsi Bessel pertama kali didefinisikan oleh seorang ahli matematik Daniel Bernoulli dan diperluas oleh Friedrich Bessel. Persamaan (2.20) (Febrinawati, 2007) adalah fungsi Bessel dibangun sebagai penyelesaian persamaan diferensial

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - n^2)y = 0 \quad (2.20)$$

Penyelesaian umum persamaan (2.20) (Manik dan Gazali, 2000) diberikan oleh

$$y = c_1 J_n(x) + c_2 Y_n(x) \quad (2.21)$$

Penyelesaian $J_n(x)$, yang mempunyai limit berhingga untuk x mendekati nol dinamakan *fungsi Bessel jenis pertama* dan berorde n . Sedangkan penyelesaian $Y_n(x)$ yang tidak mempunyai limit berhingga (tidak terbatas) untuk x mendekati nol dinamakan *fungsi Bessel jenis kedua* dan berorde n atau disebut dengan *fungsi Neumann*. Sebuah transformasi yang sering digunakan dalam masalah hamburan adalah fungsi Bessel. Diasumsikan bahwa medan dari sumber silinder diletakkan pada jarak sejauh ρ yang diwakili oleh fungsi gelombang silinder pada saat $\rho = 0$, maka fungsi Bessel jenis pertama J_0 dan fungsi Bessel jenis kedua Y_0 pada persamaan (2.22a) dan (2.23b) (Balanis, 1989) menjadi

$$J_0(k|\rho - \rho'|) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(k\rho') J_n(k\rho) e^{jn(\phi - \phi')} \quad \rho \leq \rho' \text{ dan } \rho \geq \rho' \quad (2.22a)$$

$$Y_0(k|\rho - \rho'|) = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Y_n(k\rho') J_n(k\rho) e^{jn(\phi - \phi')} & \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Y_n(k\rho) J_n(k\rho') e^{jn(\phi - \phi')} & \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.22b)$$

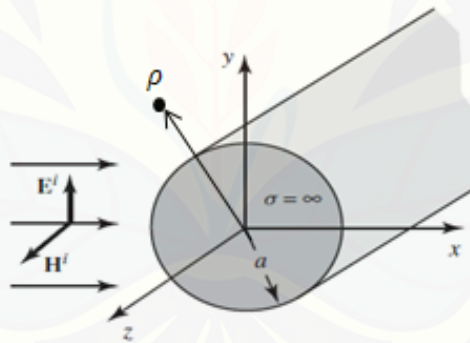
Dari bentuk fungsi Bessel J_n didapatkan fungsi Bessel jenis ketiga yang disebut dengan fungsi Hankel. Persamaan (2.23) merupakan persamaan fungsi Hankel jenis pertama dan kedua

$$H_0^{(1,2)}(\beta|\rho - \rho'|) = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(k\rho') H_0^{(1,2)}(k\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(k\rho) H_0^{(1,2)}(k\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.23)$$

Fungsi Hankel jenis pertama $H_0^{(1)}$ digunakan untuk memodelkan perambatan gelombang dari ruang tak hingga (*infinite*) menuju permukaan asal (*origin*) dan fungsi Hankel jenis kedua $H_0^{(2)}$ digunakan untuk menganalisis pergerakan gelombang dari pusat kawasan (*center region*) menuju ke medan yang jauh (*far field*).

2.6 Solusi Analitik Hamburan Gelombang Bidang

Diasumsikan bahwa gelombang bidang TE_z mengenai sebuah silinder konduktif sempurna dengan jari-jari a seperti ditunjukkan pada Gambar 2-6 dibawah ini



Gambar 2-6 Gelombang datang *plane wave* TE_z yang seragam pada silinder konduktif (Sumber: Balanis, 1989).

Jika sebuah titik observasi yang berada di luar permukaan silinder sejauh ρ dari pusat silinder, maka medan magnet dapat diekspresikan sebagai berikut (persamaan 2.24 sampai persamaan 2.31 diambil dari (Balanis, 1989).

$$\bar{H}^{inc} = \hat{a}_z H_z^i = \hat{a}_z H_0 e^{-jkx} = \hat{a}_z H_0 e^{-jk\rho \cos\phi} \quad (2.24)$$

berdasarkan persamaan (2.18), maka persamaan (2.24) dapat juga dinyatakan sebagai berikut

$$\bar{H}^{inc} = \hat{a}_z H_z^i = \hat{a}_z H_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} J_n(k\rho) \cos n\phi \quad (2.25)$$

dimana H_0 adalah konstanta dan notasi n merupakan orde dari fungsi Bessel J_n . Hubungan medan listrik gelombang datang diperoleh menggunakan persamaan Ampere Maxwell,

$$E^{inc} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times H^{inc} = + \frac{1}{j\omega\epsilon} \left[\hat{a}_\rho \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^{inc}}{\partial \phi} - \hat{a}_\phi \frac{\partial H_z^{inc}}{\partial \rho} \right] \quad (2.26)$$

Karena medan magnet terhambur menyebar ke arah luar silinder sehingga medan magnet terhambur yang dihasilkan harus diwakili oleh fungsi gelombang berjalan silinder, maka persamaan medan magnet terhambur H^{scat} ini dapat diekspresikan sebagai

$$H_z^{scat} = H_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n H_n^{(2)}(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.27)$$

d_n merepresentasikan sebagai koefisien amplitudo yang tidak diketahui dan $H_n^{(2)}$ merupakan fungsi Hankel jenis kedua dengan orde n adalah. Menggunakan persamaan (2.27) dan persamaan (2.25) untuk menentukan medan listrik total. Karena silinder yang dikenai berupa konduktif sempurna, komponen tangensial dari medan magnet total bernilai nol pada permukaan ($\rho = a$). Maka koefisien yang tidak diketahui d_n dapat didapatkan dengan menerapkan kondisi batas yang tepat

$$\bar{E}^t = \hat{a}_z E_z^t(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) = 0 \quad (2.28)$$

berdasarkan persamaan (2.25), (2.27) dan (2.28) diatas dapat dinyatakan sebagai

$$E_z^t = -\frac{kH_0}{j\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[j^{-n} J_n'(ka) e^{jn\phi} + d_n H_n^{(2)'}(ka) \right] \quad (2.29)$$

Sehingga nilai d_n dapat diperoleh dari persamaan (2.29) tersebut

$$d_n = -j^{-n} \frac{J'_n(ka)}{H_n^{(2)'}(ka)} \quad (2.30)$$

Sehingga medan magnet terhambur dapat dituliskan menggunakan persamaan (2.27), menjadi persamaan (2.31).

$$H_z^{scat} = -H_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j^{-n} \frac{J'_n(ka)}{H_n^{(2)'}(ka)} H_n^{(2)}(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.31)$$

2.7 Fungsi Gelombang Helmholtz Medan Magnet

Persamaan Maxwell merupakan dasar dari penggunaan metode MoM. Dalam suatu medium konduktor persamaan Maxwell untuk medan magnet dapat diekspresikan sebagaimana pada persamaan (2.5d) yaitu

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J} \quad (2.32)$$

dimana \vec{J} adalah distribusi volume pada arus listrik dan ω merupakan frekuensi sudut. Sekarang digunakan operasi *curl* pada persamaan (2.32) maka akan didapatkan (persamaan 2.33 sampai persamaan 2.37 diambil dari Jin, 1962)

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \times (j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J}) = j\omega\epsilon(\nabla \times \vec{E}) + \nabla \times \vec{J} \quad (2.33)$$

substitusikan persamaan (2.5b) ke dalam persamaan (2.33)

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = j\omega\epsilon(-j\omega\mu\vec{H}) + \nabla \times \vec{J} \quad (2.34)$$

menggunakan identitas vektor $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$, maka persamaan (2.34) akan menjadi seperti

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = j\omega\epsilon(-j\omega\mu\vec{H}) + \nabla \times \vec{J} \quad (2.35a)$$

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = \omega^2 \epsilon\mu\vec{H} + \nabla \times \vec{J} \quad (2.35b)$$

karena $\nabla \cdot \vec{H} = 0$ maka komponen $\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) = 0$ sehingga

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \varepsilon \mu \vec{H} = -\nabla \times \vec{J} \quad (2.36)$$

$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ merupakan bilangan gelombang dan $\varepsilon\mu$ berturut turut adalah permitivitas dan permeabilitas udara sehingga persamaan (2.36) menjadi

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = -\nabla \times \vec{J} \quad (2.37)$$

persamaan (2.37) dalam kasus ini adalah bentuk vektor medan magnet yang memenuhi persamaan Helmholtz. Sesuai dengan pernyataan umum untuk medan magnet dalam bentuk vektor potensial diberikan (persamaan 2.38 sampai persamaan 2.40 diambil dari (Harrington, 1993)

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.38)$$

dimana \vec{A} adalah potensial vektor magnetik. Substitusikan persamaan (2.38) ke dalam persamaan (2.37) maka akan diperoleh

$$\nabla^2 \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + k^2 \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = -\nabla \times \vec{J} \quad (2.39)$$

Jika diterapkan perkalian vektor seperti pada persamaan (2.39) maka akan diperoleh persamaan kontinuitas,

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (2.40)$$

persamaan (2.40) merupakan persamaan helmholtz dua dimensi dalam bentuk vektor dengan \vec{J} merupakan rapat arus permukaan. Sedangkan k adalah bilangan gelombang $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = 2\pi/\lambda$.

2.8 Method of Moment

Masalah hamburan gelombang telah mengalami perkembangan dari banyak penggunaan algoritma CEM yang berbeda dengan masing-masing manfaat dan keterbatasan sendiri. Algoritma ini diklasifikasikan sebagai metode ‘tepat’ atau ‘frekuensi rendah’ dan ‘perkiraan’ atau ‘frekuensi tinggi’ dan selanjutnya sub diklasifikasikan ke dalam metode domain waktu dan domain frekuensi. Metode

frekuensi rendah (LF) ini dapat menyelesaikan persamaan Maxwell tanpa perkiraan implisit. Metode ini dibagi menjadi *Finite Difference Time Domain* (FDTD), *Finite Element Method* (FEM) dan *Moment of Method* (MoM) (Gibson, 2007).

Dalam elektromagnetik, persamaan operator linear hampir selalu merupakan persamaan integral untuk kasus radiasi dan benda terhambur. Dalam hal ini digunakannya metode numerik MoM untuk menyelesaikan persamaan operator linear dengan mengubahnya kedalam sistem persamaan aljabar yang simultan yaitu sebuah persamaan matrik. Diasumsikan persamaan (2.41) yang merupakan pembahasan umum dari MoM berupa persamaan tak homogen (Harrington, 2001)

$$L(f) = g \quad (2.41)$$

dengan L adalah operator linear, g merupakan fungsi yang diketahui, dan f adalah variabel yang akan dicari. Menentukan koefisien amplitudo a_n yang tidak diketahui sehingga persamaan integral (2.41) diperluas menjadi sebuah deret yang dimisalkan dengan fungsi f_1, f_2, f_3, \dots

$$f = \sum_{n=1}^N a_n f_n \quad (2.42)$$

f_n disebut sebagai fungsi ekspansi (*basis function*). Persamaan diatas adalah versi yang sederhana dan merupakan solusi pendekatan dari MoM dengan membagi struktur objek menjadi lebih kecil pada permukaan silinder yang berbentuk subsegmen/pulsa. Untuk solusi diatas biasanya penjumlahan tak hingga. Substitusikan persamaan diatas ke persamaan (2.41)

$$\sum_{n=1}^N a_n L(f_n) = g \quad (2.43)$$

solusi untuk f diberikan oleh persamaan (2.42). Untuk ekspresi yang lebih sederhana, menetapkan matrik dari fungsi

$$[\tilde{f}_n] = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots] \quad (2.44)$$

Fungsi asli f dapat direkonstruksi menggunakan persamaan (2.42). Fungsi yang tidak diketahui didekati dengan menggunakan *pulse basis function* dalam menentukan kompleksitas yang ditemukan untuk mengevaluasi elemen matrik

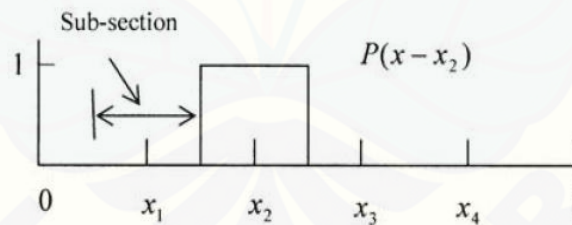
MoM. *Pulse basis function* didefinisikan ke dalam persamaan (2.45) (Harrington, 1993)

$$\text{Pulse Basis Functions: } f_n = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \text{ termasuk interval } n \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases} \quad (2.45)$$

2.9 Pulse Basic Function

Teknis matematis yang menurunkan persamaan fungsional menjadi persamaan matriks disebut dengan MoM. Salah satu cara yang digunakan dalam MoM adalah *pulse basis function*. Karakteristik yang paling penting dari *pulse basis function* adalah kemampuan untuk merepresentasikan dan menirukan suatu fungsi yang tidak diketahui. Pemilihan cara tersebut menentukan kompleksitas yang ditemukan dalam mengevaluasi elemen matrik MoM, yang biasanya sangat sulit dalam beberapa kasus (Gibson, 2007).

Sekarang untuk memahami cara tersebut, asumsikan beberapa fungsi dasar satu dimensi yang umum digunakan pada MoM. Dimisalkan suatu daerah x dengan interval $0 \leq x \leq 1$ dan membaginya ke dalam sub-bagian $N + 1$ dengan ukuran yang sama besar. Biasanya *pulse basis function* digambarkan sebagai berikut



Gambar 2-7 *Pulse Basis Function*

lebar dari masing-masing sub-bagian sebesar

$$\alpha_x = \frac{1}{N + 1} \quad (2.46)$$

pada Gambar 2-7 pembagian daerah x dicacah ke dalam $N = 4$, sehingga terdapat lima buah sub-bagian. Titik x_m merupakan titik tengah dari setiap sub-bagian dan nilai x_m dapat diperoleh dengan persamaan:

$$x_m = \frac{m}{N+1}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.47)$$

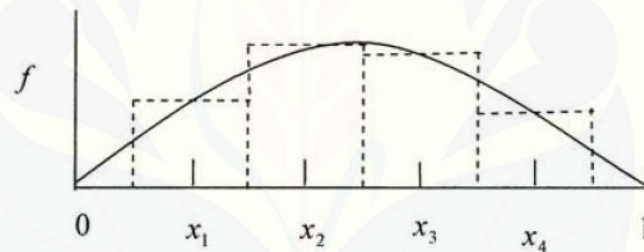
pulse basis function tidak bernilai nol yang hanya memiliki satu sub-bagian dan berpusat pada x_m didefinisikan sebagai

$$P(x - x_m) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } \left(x_m - \frac{\alpha_x}{2} \leq x \leq x_m + \frac{\alpha_x}{2}\right) \\ 0 & \text{ditempat lain} \end{cases} \quad (2.48)$$

fungsi $P(x - x_m)$ ditunjukkan pada Gambar 2.7. Kombinasi linear dari *pulse basis function* sesuai dengan persamaan

$$f(x) = \sum_{n=1}^N \beta_n P(x - x_n) \quad (2.49)$$

memberikan sebuah pendekatan tangga seperti pada Gambar 2-8 di bawah ini:



Gambar 2-8 Aproksimasi tangga dari fungsi menggunakan *pulse basis function*

Diketahui bahwa *pulse basis function* bersifat orthogonal karena tidak saling tumpang tindih antara yang satu dengan yang lain. Dalam penelitian ini persamaan (pas diats) digunakan dalam masalah hamburan gelombang TE_z oleh silinder konduktif dengan $f(x)$ sebagai fungsi dari rapat arus permukaan dan β_m mewakili besarnya rapat arus permukaan pada sub-bagian ke- m (Garg, 2008).

2.10 Hipotesis

Perumusan hipotesis didasarkan pada teori dan beberapa hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan masalah yang muncul. Hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini :

Peterson (Peterson *et al*, 1998) membandingkan solusi analitik dan solusi numerik (MoM) hamburan gelombang mikro dari sebuah medium konduktif. Medan magnet terhambur *Bistatic RSC (Radar Cross Section)* dikomputasi pada beberapa sudut observasi Dimana medan terhambur dikomputasi dengan berbagai variasi cacahan. Hasil komputasi pada tiga sudut diantaranya adalah 0 rad, $\pi/2$ rad dan π rad dinyatakan sebagai berikut:

Tabel 2-1 Hasil komputasi medan magnet terhambur *Bistatic RSC* dengan MoM dan solusi analitik pada sudut 0 rad, $\pi/2$ rad dan π rad

Sudut	Jumlah cacahan			
	N=26	N=72	N=100	Eksak
0	10.93	10.82	10.79	10.70
$\pi/2$	0.92	0.72	0.68	0.53
π	3.31	3.40	3.43	3.47

Terlihat dari Tabel 2.1, terdapat perubahan *error* relatif solusi MoM ketika cacahan atau lebar sel diubah. Data tersebut dibangun dengan sistem yang sama yaitu medan magnet terhambur dari silinder p.e.c dengan keliling $5 \lambda_0$. Dimana λ_0 adalah panjang gelombang di udara maka lebar sel hanya tergantung dari jumlah cacahan. Oleh sebab itu error relatif hasil komputasi dengan MoM dapat ditabelkan sebagai fungsi dari lebar sel seperti dinyatakan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2-2 *Error* relatif medan magnet terhambur hasil solusi MoM di berbagai titik sudut observasi pada berbagai lebar sel.

Sudut	Jumlah cacahan			Eksak
	$r=0.13 \lambda_0$	$r=0.06 \lambda_0$	$r=0.05 \lambda_0$	
0	2.1%	1.1%	0.8%	10.70
$\pi/2$	73.5%	35.8%	28%	0.53
π	3.31	2%	1.1%	3.47

Selanjutnya Peterson menyatakan batasan akurasi MoM untuk mengkomputasi medan magnet terhambur pada daerah *far field* yang dinyatakan dalam *Bistatic RSC (Radar Cross Section)* yang dapat diterima untuk aplikasi berada pada cacahan yang tidak lebih dari $0.1 \lambda_0$.

Berdasar uraian diatas maka hipotesa dalam skripsi ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

- a. “Akurasi solusi MoM relatif terhadap solusi eksak tergantung pada lebar sel dimana semakin kecil lebar sel semakin akurat solusi tersebut.
- b. Akurasi solusi MoM juga tergantung pada letak titik observasi. Semakin besar nilai BST medan terkomputasi maka *error* yang dihasilkan semakin kecil.

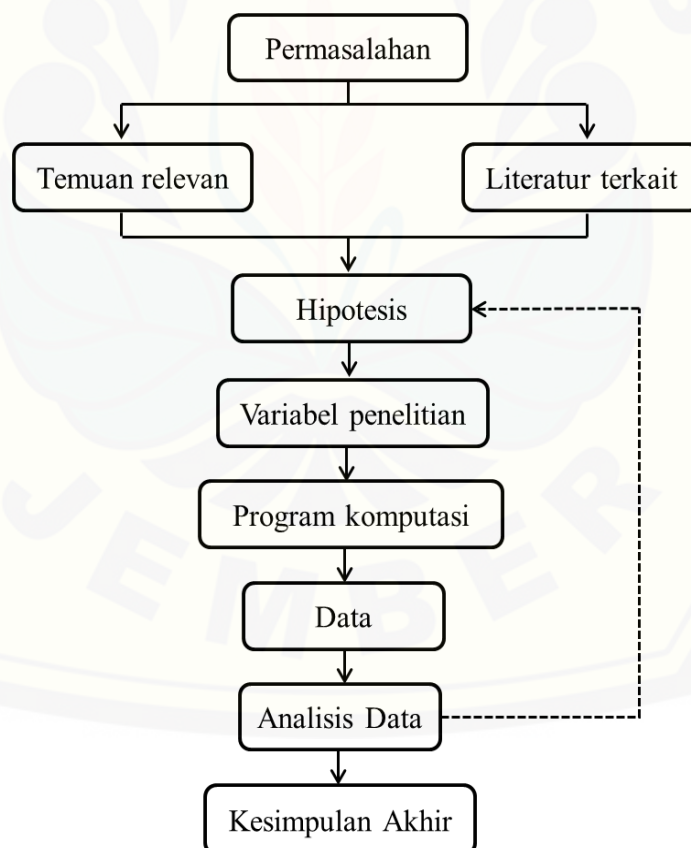


BAB 3. METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dipaparkan metode yang digunakan. Rancangan penelitian, jenis dan sumber data, definisi operasional variabel beserta skala pengukurannya, dan kerangka pemecahan masalah akan dijelaskan secara berurutan. Langkah kerja penelitian dan teknik pengambilan data dijelaskan di bagian procedure penelitian sedangkan metode untuk menganalisis hasil dan data yang diperoleh terdapat pada bagian terakhir metode penelitian.

3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dipresentasikan dalam Gambar 3-1:



Gambar 3-1 Skema rancangan penelitian

Dalam penelitian ini yang akan dilakukan pertama kali adalah mengidentifikasi masalah yang akan diteliti terkait dengan hamburan gelombang elektromagnetik oleh silinder konduktif. Langkah selanjutnya adalah menyusun hipotesis yang didasarkan pada studi literatur serta hasil penelitian terdahulu. Melalui hipotesis tersebut nantinya akan didapatkan beberapa variabel penelitian dengan melakukan operasional untuk setiap variabel yang digunakan. Hal ini dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dari solusi analitik maupun solusi numerik dengan menggunakan program komputasi yang berbasis bahasa pemrograman untuk memperoleh data dengan cara *di-running*. Kemudian dilakukan pengolahan dan analisis data. Hasil analisis tersebut dibahas dan dikaji untuk menguji hipotesis yang dijadikan acuan. Setelah analisis selesai maka dapat ditarik kesimpulan mengenai permasalahan yang sudah dirumuskan. Tahapan rancangan penelitian tersebut kemudian dikemas secara sistematis dalam bentuk karya tulis ilmiah yang berupa laporan tugas akhir.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data kuantitatif, yang mana jenis data tersebut dapat dihitung atau diukur secara langsung dan dapat dinyatakan dalam bentuk angka. Nilai medan magnet terhambur di sekitar silinder yang diperoleh merupakan data kuantitatif yang dihasilkan pada penelitian ini. Data tersebut didapat dari sumber data primer berupa data yang dihitung oleh peneliti sendiri.

3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran

Faktor yang mempengaruhi penelitian ini adalah variabel, karena variabel memiliki nilai yang dapat berubah-ubah. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dikelompokkan menjadi tiga bagian yaitu sebagai berikut:

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang menjadi sebab munculnya variabel terikat. Variabel bebas yang terdapat dalam penelitian ini antara lain:

1. Frekuensi (f) merupakan banyaknya gelombang yang dihasilkan tiap satuan waktu. Skala frekuensi yang digunakan dalam penelitian adalah 1 GHz sampai 100 GHz sedangkan frekuensi yang dianalisis sebesar 3 GHz, 10 GHz, 20 GHz, 30 GHz, 40 GHz, dan 50 GHz
2. Jari-jari silinder (a) merupakan jarak antara keliling permukaan silinder dan pusat silinder. Bentuk kontur silinder berupa silinder utuh dengan menganggap permukaan silinder sebagai sel yang datar. Skala jari-jari silinder yang digunakan adalah $0.01\lambda_0$, $0.03\lambda_0$, $0.05\lambda_0$, $0.07\lambda_0$, $0.09\lambda_0$, dan $0.11\lambda_0$, dengan λ_0 adalah panjang gelombang mikro yang digunakan di udara.
3. Jarak titik observasi dari pusat silinder (ρ) merupakan besar jarak sensor yang digunakan dari pusat silinder. Skala jarak titik observasi seluruhnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 m dan 0.5 m.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dapat mengalami perubahan akibat perlakuan dari variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu :

1. *Magnitude* ($|H_z^{scat}|$) adalah besaran dari medan magnet terhambur. Nilai medan magnet terhambur yang dihasilkan dari aproksimasi solusi analitik dan aproksimasi solusi numerik berupa bilangan kompleks, dan nilai *magnitude* berupa harga mutlak dari bilangan kompleks. Nilai *magnitude* ditentukan menggunakan fungsi $abs(x)$ dari MATLAB karena medan hasil komputasi berbentuk nilai kompleks. Satuan dari besaran medan magnet terhambur adalah A/λ_0 .
2. Fase (ϕ) adalah sudut getaran gelombang elektromagnetik. Fase dihitung dengan fungsi $atan(x)$ dari MATLAB yang merupakan fungsi $\arctan(x)$. Dimana sudut fase merupakan sudut yang dibentuk antara komponen real dan imajiner dari nilai medan terhambur yang terkomputasi.
3. *Error* relatif adalah persentase kesalahan mutlak atau kesalahan mutlak yang menunjukkan seberapa besar selisih yang dihasilkan dari solusi

numerik relatif terhadap solusi analitik. Solusi analitik digunakan sebagai dasar untuk menentukan akurasi dari solusi MoM.

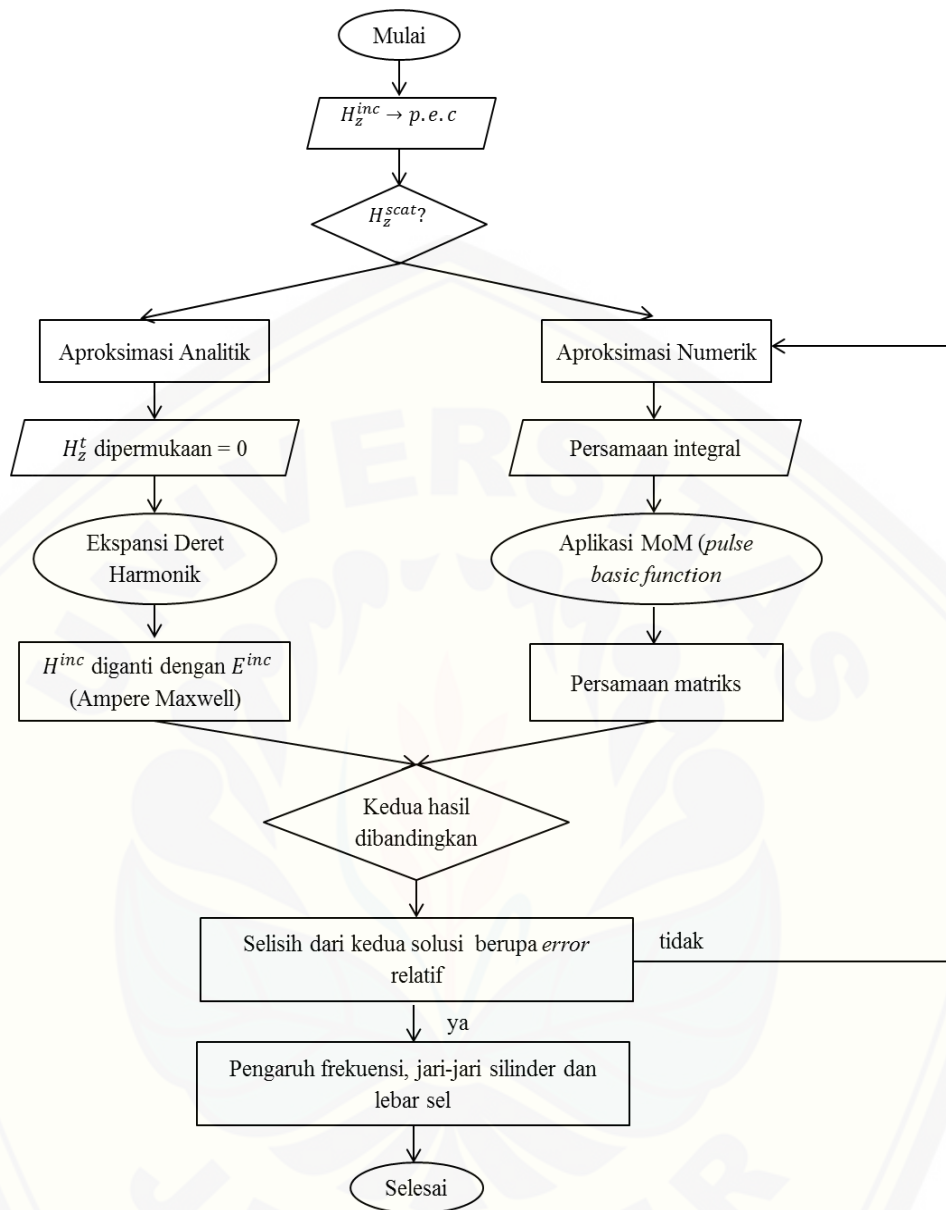
3.3.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel selain perlakuan yang berkaitan dengan objek penelitian.

1. Permeabilitas (μ) adalah ukuran kemampuan sebuah material untuk menunjang terbentuknya medan magnet dalam material tersebut (Kraus, 1991). Konstanta permeabilitas yang digunakan dalam penelitian ini adalah konstanta magnetik di udara karena objek penelitian berada pada medium udara yang nilainya sebesar 1 H/m.
2. Jumlah sel (N) merupakan aproksimasi yang berupa banyaknya sel yang digunakan dalam penyelesaian solusi numerik. Sel didefinisikan sebagai satuan dari kontur permukaan silinder yang dibagi menjadi beberapa bagian.
3. Jumlah titik observasi (N_{Ant}) merupakan banyaknya titik observasi yang digunakan sebagai penerima untuk mendapatkan data. Jumlah titik observasi yang digunakan untuk penelitian ini sebesar 256 atau 2^8 . Jumlah titik observasi digunakan dalam menyelesaikan solusi analitik maupun solusi numerik.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Proses pemecahan masalah yang dilakukan dalam penelitian ini ditayangkan dalam Gambar 3.2 Sumber medan magnet datang H_z^{inc} ditembakkan pada sebuah objek silinder p.e.c sehingga akan diperoleh medan magnet terhambur. Untuk mendapatkan medan magnet terhambur digunakan dua aproksimasi yaitu aproksimasi analitik dan aproksimasi numerik. Aproksimasi analitik menerapkan syarat batas dengan kondisi tangensial $H_z^t = 0$ sehingga persamaan medan TE_z menjadi $H_z^{scat} = H_z^{inc}$ dan akan diperoleh persamaan medan magnet terhambur dalam bentuk ekspansi deret harmonik.



Gambar 3-2 Kerangka Pemecahan Masalah

Selanjutnya persamaan medan magnet datang diganti persamaan medan listrik datang E^{inc} menggunakan persamaan Ampere Maxwell sebagai konsekuensi dari aplikasi syarat batas, sehingga didapatkan persamaan medan magnet terhambur sama dengan negatif dari medan magnet datang seperti pada persamaan (2.31). Sedangkan aproksimasi numerik menggunakan persamaan integral vector potensial magnetik dalam medan magnet datang dengan menerapkan aplikasi MoM *pulse basic function* dalam menentukan rapat arus

permukaan pada silinder, sehingga akan diperoleh medan magnet terhambur dalam bentuk persamaan matriks. Kemudian membandingkan hasil dari kedua aproksimasi tersebut dengan menentukan *error* relatif sebagai perbedaan selisih dari solusi numerik terhadap solusi analitik. Apabila selisih antara kedua solusi sangat kecil, maka aplikasi MoM akurat untuk menyelesaikan persamaan hamburan gelombang elektromagnetik. Sehingga dapat dilakukan untuk analisis pengaruh frekuensi sumber, jari-jari silinder dan lebar sel pada titik observasi tertentu.

3.5 Prosedur Penelitian

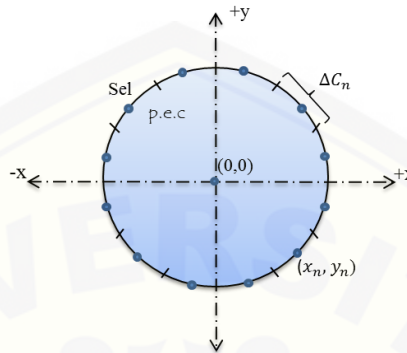
Prosedur yang dilakukan untuk penelitian hamburan gelombang mikro TE_z oleh silinder konduktif sempurna adalah sebagai berikut:

3.5.1 Aproksimasi Solusi Numerik (Metode MoM)

Aproksimasi solusi numerik pada permasalahan hamburan gelombang mikro TE_z oleh silinder konduktif sempurna dapat diselesaikan dengan menggunakan metode MoM. Langkah pertama yang dilakukan adalah menerapkan polarisasi TE_z pada fungsi gelombang Helmholtz dalam bentuk vektor medan magnet (persamaan Helmholtz) yang digunakan untuk mendapatkan persamaan Helmholtz dua dimensi potensial vektor magnetik dan memperoleh rapat arus permukaan dalam bentuk skalar. Kemudian menentukan solusi integral dari persamaan tersebut dengan menerapkan fungsi Green's yang diekspresikan dalam bentuk dua dimensi. Selanjutnya integrasi persamaan ini digunakan pada kondisi syarat batas permukaan yaitu medan magnet pada permukaan silinder bernilai nol, sehingga akan diperoleh persamaan medan datang dalam bentuk integral (Nugroho, 2016).

Adapun pendekatan solusi numerik adalah meninjau sebuah penampang lintang silinder sebagai lingkaran dan kontur permukaan silinder dibagi ke dalam beberapa sel (N) seperti yang terlihat pada Gambar 3-3. Dimana ΔC_n merupakan lebar sel ke- n dan (x_n, y_n) adalah titik koordinat tengah sel ke- n . Setelah itu menentukan persamaan rapat arus permukaan dengan menerapkan *pulse basic function* dan *point matching*. Kemudian persamaan rapat arus permukaan yang diperoleh disubstitusikan ke dalam persamaan potensial vektor magnetik dalam

bentuk integral. Persamaan potensial vektor magnetik akan disubstitusikan ke dalam persamaan medan magnet datang.



Gambar 3-3 Kontur silinder dibagi ke dalam beberapa sel

Kontur silinder dibagi ke dalam beberapa sel (N) dan rapat arus ekuivalennya didekati dengan *pulse basic function*, sehingga persamaan medan datang yang diperoleh dapat dirubah ke dalam bentuk matriks seperti pada persamaan (3.1)

$$[H_z^{inc}] = [Z][j] \quad (3.1)$$

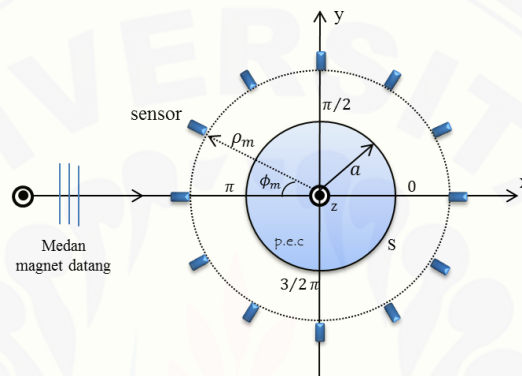
dimana H_z^{inc} merupakan matriks medan magnet datang berordo $N \times 1$, $[Z]$ adalah matriks impedansi intrinsik yang berorde $N \times N$, dan $[j]$ adalah matriks rapat arus permukaan berorde $N \times 1$. Penentuan medan datang dan impedansi intrinsik disini ditinjau berdasarkan titik acuan dan titik observasi yang berada pada permukaan silinder. Sehingga melalui operasi matriks pada persamaan (3.1) dapat diperoleh persamaan rapat arus permukaan.

$$[j] = [Z]^{-1}[H_z^{inc}] \quad (3.2)$$

Persamaan rapat arus permukaan setiap sel tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan medan magnet terhambur yang telah diaproksimasi untuk memperoleh medan magnet terhambur di luar permukaan silinder dalam bentuk integral dan kemudian ditransformasi ke dalam persamaan sumasi rapat arus permukaan.

3.5.2 Perbandingan Solusi Numerik MoM terhadap Solusi Analitik

Penelitian tentang hamburan gelombang mikro ini menggunakan objek silinder konduktif sempurna (p.e.c). Silinder yang ditinjau adalah silinder dengan panjang tak hingga dan pemodelannya menggunakan penampang lintang silinder berbentuk lingkaran yang berada pada koordinat x dan y dengan jari-jari a . Titik koordinat pusat silinder terletak pada titik $(0,0)$ dengan gelombang bidang datang dari arah π rad.



Gambar 3-4 Penampang lintang silinder konduktif sempurna

Sensor diletakkan melingkar di sekitar silinder dan jarak sensor dari pusat silinder ρ_m dengan sudut observasi sebesar ϕ_m , sedangkan S mendefinisikan kontur dari permukaan silinder. Perbandingan solusi analitik dan solusi numerik dilakukan pada titik observasi (letak sensor) yang sama dengan jarak dari pusat silinder sebesar 1. Sudut observasi yang ditentukan dimulai dari 0 rad sampai 6,28 rad. Dalam penelitian ini menggunakan variasi parameter input frekuensi, jari-jari silinder dan jumlah sel. Variasi frekuensi yang digunakan adalah 3 GHz, 10 GHz, 20 GHz, 30 GHz, 40 GHz dan 50 GHz, sedangkan variasi jari-jari silindernya sebesar $0.01\lambda_0$, $0.03\lambda_0$, $0.05\lambda_0$, $0.07\lambda_0$, $0.09\lambda_0$ dan $0.11\lambda_0$. Variasi jari jari digunakan untuk mengetahui bagaimana pengaruh luas permukaan penghambur terhadap medan hasil komputasi, selain itu dikarenakan jumlah cacahan akan dibuat sama maka pengaruh lebar sel cacahan akan terlihat dalam pengujian ini. Sedangkan beberapa parameter input atau tetapan yang dibuat konstan dalam penyelesaian solusi analitik dan solusi numerik terdapat pada tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3-1 Parameter input yang bersifat konstan

Parameter Input	Nilai Satuan	Simbol
Permitivitas ruang vakum	$8.85 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$	ϵ_0
Permitivitas relatif udara	1.0006	ϵ_r
Permeabilitas ruang vakum	$4\pi \times 10^7 NA^{-2}$	μ_0
Permeabilitas relatif udara	1.00000037	μ_r
Amplitudo medan magnet	1	E_0

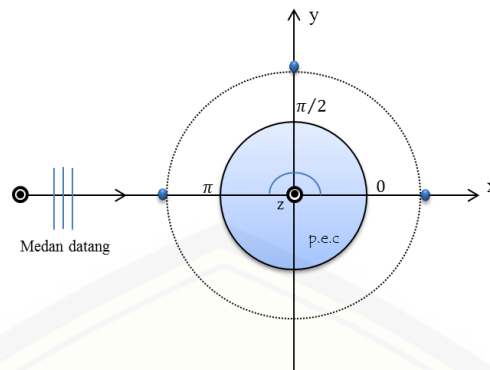
Untuk menentukan bilangan gelombang (k) kita menggunakan tetapan permitivitas ruang vakum, permivitas relatif udara, permeabilitas ruang vakum dan permeabilitas relatif udara dengan persamaan:

$$k = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r} \quad (3.3)$$

Pendekatan metode MoM menggunakan pembagian atau pencacahan kontur permukaan silinder ke dalam beberapa sel. Jumlah sel yang digunakan untuk perbandingan solusi analitik dan solusi numerik sebesar 1000 sel.

3.5.3 Pengaruh Perubahan Frekuensi, Pengaruh Ukuran p.e.c dan Pengaruh Lebar Sel pada berbagai Letak Titik Observasi terhadap *Magnitude* dan Fase Gelombang

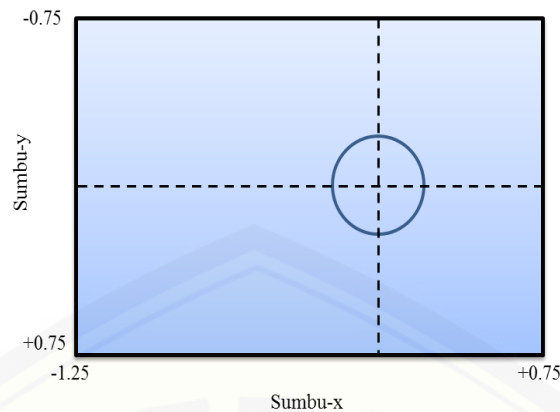
Pengamatan pengaruh perubahan frekuensi, jari-jari silinder terhadap *magnitude* dan fase menggunakan dua analisis, yaitu analisis nilai kuantitatif dalam bentuk grafik dan analisis dalam bentuk visual. Kedua analisis nilai kuantitatif ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *magnitude* dan nilai fase dengan letak titik observasi melingkar di sekitar silinder. Konfigurasi titik observasi melingkar di sekitar silinder tampak seperti gambar 3.4 diatas. Titik observasi diletakkan sejauh ρ_m dari pusat silinder konduktif dengan besar sudut observasi (ϕ_m) yang berada pada rentang 0 rad sampai 6,28 rad. Tujuan menggunakan konfigurasi titik observasi melingkar adalah untuk mengetahui perubahan nilai *magnitude* maupun nilai fase di semua bagian jarak titik observasi yang sama dari pusat silinder. Selain menggunakan konfigurasi titik observasi melingkar di sekitar silinder, juga digunakan konfigurasi titik observasi yang berada pada sudut 0 rad, 1.57 rad, dan 3.14 rad. Skema dari konfigurasi titik observasi pada sudut tersebut seperti pada Gambar 3-5.



Gambar 3-5 Konfigurasi titik observasi pada sudut tertentu

Konfigurasi titik observasi pada Gambar 3-5 diletakkan pada sudut tertentu. Pada kasus ini sudut yang digunakan adalah 0 rad (sekitar sudut 6.28 rad), 1.57 rad, dan 3.14 rad dengan masing-masing sudut memiliki satu titik observasi, sedangkan jarak titik observasi dari pusat silinder sebesar 1 m. Tujuan konfigurasi titik observasi pada sudut yang sudah ditentukan diatas adalah untuk mengetahui perubahan nilai *magnitude* atau fase dari medan magnet terhambur dan mengetahui distribusi medan magnet terhambur tertinggi hingga terendah, jika titik observasi diletakkan pada sudut tersebut. Hasil analisis kuantitatif yang diperoleh dapat didukung oleh gambar dalam bentuk visualisasi dari nilai *magnitude* dan fase.

Dalam proses analisis dengan citra 2D medan magnet terhambur dari *magnitude* dan fase gelombang seperti yang presentasikan oleh Nugroho (Nugroho, 2015). Untuk menggambarkan citra 2D titik observasi dinyatakan dalam bentuk *mesh*. Doncker (2000) menyatakan bahwa *mesh* merupakan sebuah kotak kecil yang terdapat pada suatu kotak persegi panjang yang mengandung nilai permitivitas tertentu. *Mesh* dalam penelitian ini berbentuk persegi dengan ketentuan sumbu x sebagai panjang dan sumbu y sebagai lebar persegi panjang. Mesh akan membentuk sebuah sel dimana dalam satu sel dianggap *magnitude* dan fase terukur sama sehingga tiap sel dapat diwakili oleh sebuah titik seperti yang diaplikasikan dalam (Nugroho, 2009). Selanjutnya Gambar 3-6 merupakan susunan *mesh* terbentuk dari sebuah silinder tunggal yang berada pada medium dengan permitivitas sama dengan udara.



Gambar 3-6 Bidang evaluasi 2D di sekitar silinder p.e.c

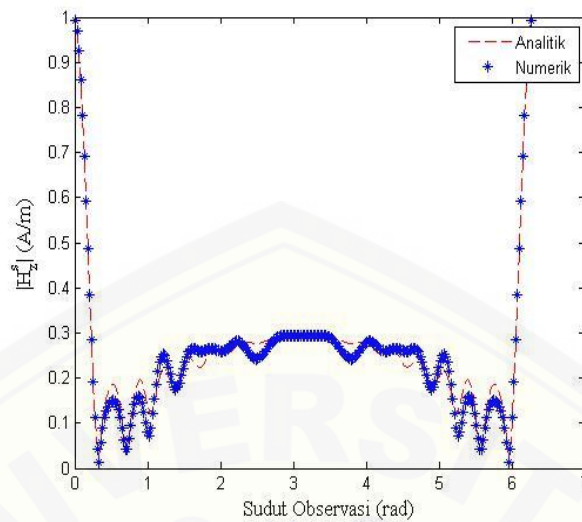
Silinder terdapat dalam *mesh* dengan pusat silinder berada pada titik koordinat (0.0). Batas koordinat *mesh* untuk sumbu x adalah -1.25 sampai +0.75, sedangkan untuk sumbu y -0.75 sampai +0.75. Jika ditinjau dari pusat titik koordinat (0.0) maka tanda positif dan negatif menunjukkan arahnya. Titik observasi diletakkan di semua titik dalam bidang evaluasi.

3.6 Analisis Data

Terdapat beberapa analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain:

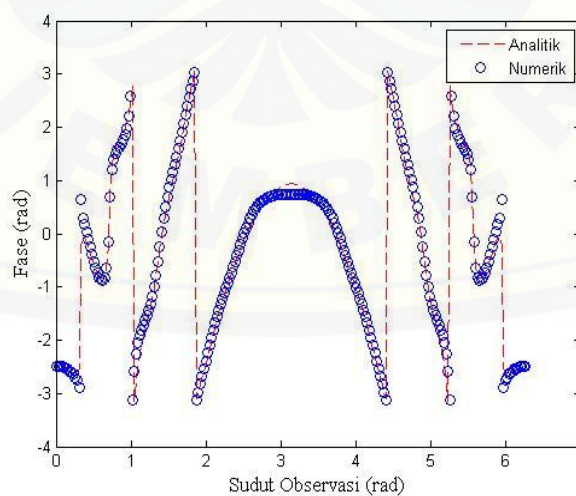
3.6.1 Perbandingan Solusi Numerik MoM terhadap Solusi Analitik

Penyelesaian masalah hamburan gelombang elektromagnetik menghasilkan *plotting* nilai *magnitude* dan fase gelombang dalam bentuk grafik hubungan antara sudut observasi dengan nilai *magnitude* maupun fase. *Plotting* tersebut akan digunakan untuk membandingkan antara solusi analitik dan solusi numerik pada letak titik observasi yang sama. Contoh dari bentuk grafik yang digunakan adalah seperti berikut:



Gambar 3-7 Contoh bentuk grafik hubungan antara *magnitude* dan sudut observasi dengan jari jari titik observasi konstan

Grafik kurva solusi numerik dalam Gambar 3-7 diharapkan bahwa kurva berimpit dengan kurva solusi analitik. Jika kurva yang dihasilkan semakin berimpit, maka hasil solusi numerik semakin mendekati solusi analitik. Tingkat kedekatan solusi numerik terhadap solusi analitik dinyatakan dengan tingkat akurasi. Hal yang sama juga diharapkan pada hasil grafik hubungan antara sudut observasi dan fase bahwa kurva solusi numerik berimpit dengan solusi analitik. Salah satu contoh grafik bentuk grafik yang digunakan seperti Gambar 3-8.



Gambar 3-8 Contoh bentuk grafik hubungan antara fase dan sudut observasi dengan jari-jari titik observasi konstan

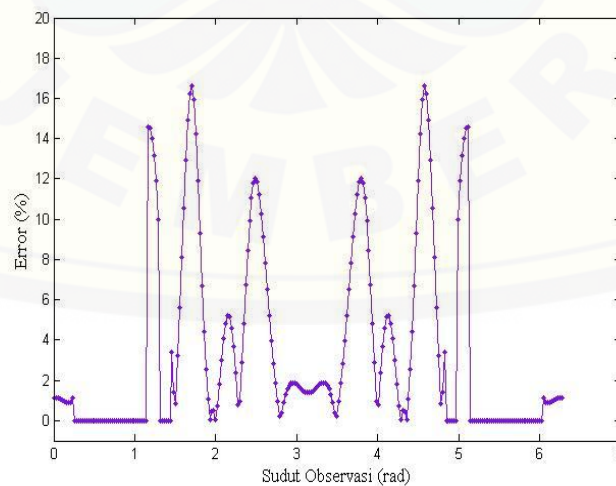
Kuantitas *error* relatif yang didapatkan akan menentukan tingkat akurasi antara hasil numerik terhadap hasil analitik. Merujuk pada (Peterson *et al*, 1998) seperti sudah digambarkan pada Sub Bab 2.4 dalam penelitian ini solusi dikatakan akurat jika error relatif dengan solusi analitik kurang dari 5%. Berbeda dengan Paterson, dalam penelitian ini medan yang dikomputasi dengan dengan objek penghambur sehingga error dinyatakan dalam besaran magnitude dan fase gelombang, seperti yang digunakan dalam (Nugroho, 2015). *Error* relatif dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Error\ magnitude(\%) = \left| \frac{|H_z^{scat}|_{analitik} - |H_z^{scat}|_{numerik}}{|H_z^s|_{analitik}} \right| \times 100 \quad (3.4)$$

sedangkan persamaan untuk *error* relatif nilai fase gelombang adalah

$$Error\ Fase(\%) = \left| \frac{\angle H_z^{scat}(analitik) - \angle H_z^{scat}(numerik)}{\angle H_z^{scat}(analitik)} \right| \times 100 \quad (3.5)$$

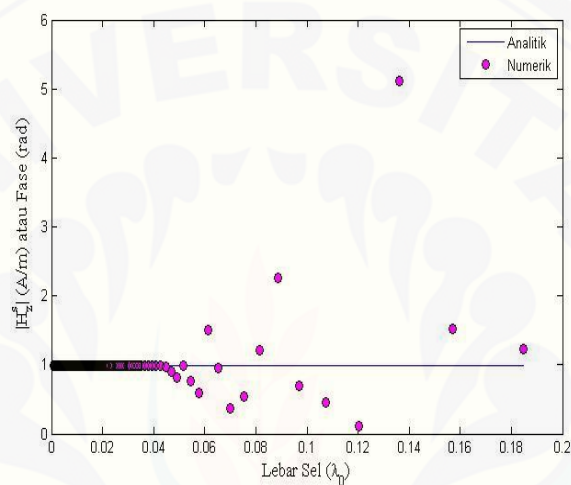
Error relatif merupakan perbedaan selisih yang diperoleh dari aproksimasi solusi numerik terhadap aproksimasi solusi analitik. Nilai *error* relatif dari nilai *magnitude* dan fase gelombang tersebut juga dapat digambarkan dalam sebuah grafik hubungan antara sudut observasi terhadap *error* relatif yang dapat ditunjukkan oleh Gambar 3-9 dibawah ini:



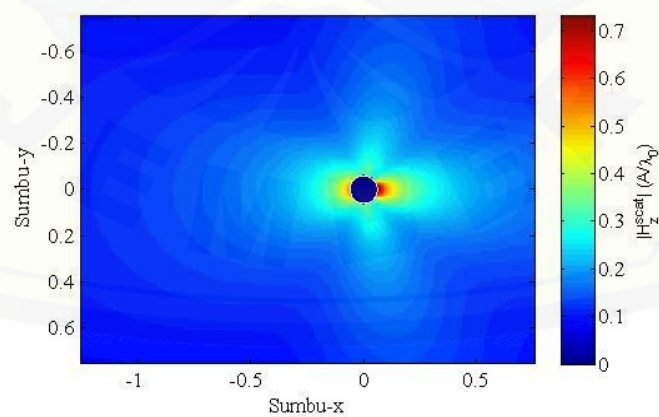
Gambar 3-9 Contoh grafik hubungan antara *error* relatif solusi numerik terhadap solusi analitik dengan sudut observasi

Grafik diatas bertujuan untuk mengetahui perubahan nilai *error* relatif di setiap sudut observasi dan juga untuk menunjukkan pada bagian sudut observasi mana saja yang memiliki tingkat akurasi paling tinggi. Kurva yang diharapkan pada gambar tersebut adalah bahwa nilai *error* relatif kurang dari 5%.

3.6.2 Pengaruh Perubahan Frekuensi, Pengaruh Ukuran p.e.c dan Pengaruh Lebar sel pada berbagai Titik Observasi terhadap *Magnitude* dan Fase gelombang



Gambar 3-10 Contoh grafik hubungan antara lebar sel terhadap *magnitude* atau *phase*



Gambar 3-11 Contoh citra dua dimensi medan magnet terhambur *magnitude* atau *phase*

Analisis pengaruh perubahan frekuensi, jari-jari dan letak titik observasi terhadap *magnitude* dan fase menggunakan dua analisis, yaitu analisis dalam bentuk grafik dan analisis citra dua dimensi. Analisis dalam bentuk grafik menggunakan konfigurasi titik observasi melingkar di sekitar silinder dan titik observasi pada sudut tertentu. Grafik dari analisis kuantitatif dengan konfigurasi titik observasi melingkar di sekitar silinder seperti pada Gambar 3-7 dan Gambar 3-8 di atas. Sedangkan contoh grafik nilai medan magnet terhambur pada sebuah titik observasi akibat perubahan lebar sel dinyatakan seperti pada Gambar 3-10.

Dalam penelitian ini konfigurasi titik observasi dengan sudut tertentu menggunakan 3 sudut observasi, yaitu sudut 0 rad, 1.58 rad, dan 6.28 rad. Seperti halnya pada Gambar 3.7, grafik yang diharapkan pada Gambar 3.11 adalah kurva solusi numerik berimpit atau mendekati kurva solusi analitik. Perubahan lebar sel terhadap akurasi solusi MoM diharapkan dapat terlihat dengan jelas dengan model ini sehingga hipotesa yang dinyatakan dalam Bab 2 dapat di jawab dengan baik.

Citra 2 dimensi (2D) medan magnet terukur akan dinyatakan dalam citra seperti dalam Gambar 3-11. Kuantitas *magnitude* dinyatakan dengan warna dalam citra tersebut, dimana warna merah menyatakan medan terkuat dan warna biru menyatakan medan terendah. Sebaran kuantitas medan akan dianalisis pada berbagai variasi frekuensi kerja pada benda dengan ukuran silinder konstan dan variasi ukuran silinder dengan frekuensi kerja yang konstan. Citra 2D akan dipresentasikan untuk *magnitude* dan fase medan terhambur.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Penyelesaian aproksimasi numerik (metode MoM) dalam permasalahan hamburan gelombang mikro TE_z oleh silinder konduktif dilakukan dengan membagi kontur silinder ke dalam beberapa sel dan menentukan rapat arus menggunakan teknik *pulse basic function*. Hasil akhir yang dihasilkan berupa medan magnet terhambur. Tingkat keakuratan antara aproksimasi numerik dan analitik dipengaruhi oleh faktor frekuensi, ukuran p.e.c dan lebar sel pada titik observasi tertentu. Semakin besar frekuensi, ukuran p.e.c dan lebar sel maka tingkat akurasi semakin menurun. Secara umum metode MoM memiliki tingkat keakuratan yang sangat baik terhadap aproksimasi analitik yang dibuktikan dengan nilai *error* relatif kurang dari 5%.
2. Perubahan frekuensi berpengaruh terhadap nilai *magnitude* dan fase di sekitar silinder. Semakin besar frekuensi maka pola naik turun nilai *magnitude* yang terbentuk semakin banyak dan semakin *smooth*. Perubahan ekstrim nilai fase yang terjadi juga semakin banyak dan bentuk kurva melengkung keatas yang dihasilkan semakin tidak teratur. Selain frekuensi, perubahan jari-jari silinder juga berpengaruh terhadap nilai *magnitude* dan fase. Setiap perubahan jari-jari silinder menghasilkan perubahan jumlah gelombang yang teratur dan *smooth*. Semakin besar jari-jari silinder nilai *magnitude* maksimum semakin tinggi dan nilai *magnitude* minimum semakin rendah. Jika fase gelombang dianalisis menggunakan citra 2D maka fase dapat dipengaruhi oleh jari-jari silinder yang ditandai dengan patahan-patahan warna di dalam *mesh*. Semakin besar jari-jari, jangkauan dari patahan warna yang terbentuk semakin luas dan semakin lebar.
3. Perbedaan *magnitude* dan fase gelombang dapat diketahui dengan melakukan pengujian menggunakan salah satu titik observasi dengan sudut observasi

tertentu. Nilai *magnitude* dan fase dihasilkan dalam bentuk perbandingan grafik solusi analitik dan solusi numerik. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada titik observasi dengan sudut observasi 0 rad (sekitar sudut observasi 6.28 rad) dengan lebar sel sekitar $0.0004\lambda_0$ sampai lebar sel $0.02\lambda_0$ dapat dikatakan distribusi medan magnet terhambur yang dihasilkan paling tinggi yang ditandai oleh kedua grafik yang saling berhimpit yang juga dibuktikan oleh *magnitude* tertinggi berada pada sudut observasi tersebut. Sedangkan fase gelombang yang dihasilkan adalah berbanding terbalik dengan nilai *magnitude*, pada sudut observasi 0 rad fase yang diperoleh lebih kecil dari kedua sudut observasi 1.57 rad dan 3.14 rad.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan penelitian, maka penulis merekomendasikan beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai penunjang penelitian-penelitian terkait selanjutnya, antara lain:

1. Penentuan sudut sel silinder perlu diperhatikan agar hasil numerik medan magnet terhambur yang diperoleh akurat dan penentuan fungsi Bessel dalam solusi analitik juga diperhatikan karena dapat berpengaruh pada jangkauan titik observasi.
2. model silinder yang mencakup efek kelengkungan sel dapat dikembangkan pada polarisasi TE_z .
3. Pengaplikasian metode MoM untuk objek dengan bentuk yang lebih kompleks seperti objek berbentuk balok p.e.c dan lain sebagainya.

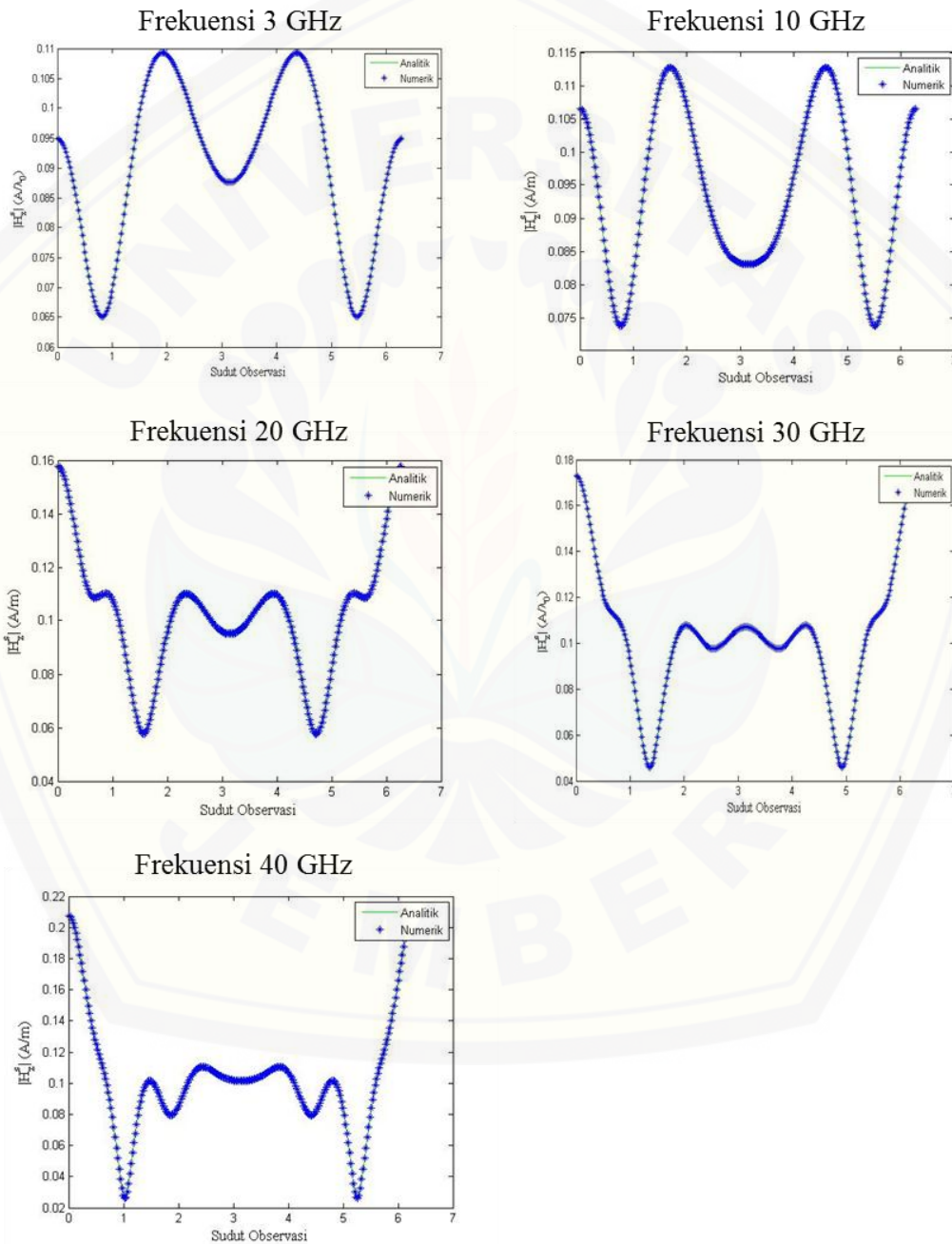
DAFTAR PUSTAKA

- Azari, A., Firouzeh, Z. H. & Zeidaabadi-Nezhad, 2014, A. Survey of temporal basis functions for transient scattering by conducting cylinders using TD-EFIE formulation-TM case. 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 20-22 May 2014 2014. 1411-1415.
- Balanis, C. A. 1989. *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York, Wiley.
- Borghini, R., Frezza, F., Schettini, G., Gori, F. & Santarsiero, M. 1996. Plane-wave scattering by a perfectly conducting circular cylinder near a plane surface: cylindrical-wave approach. *Journal of the Optical Society of America A*, 13, 483-493.
- Cheng, D. K. 2013. *Field and Wave Electromagnetics*, Harlow, United Kingdom, Pearson Education Limited.
- Collin, R. E. 2001. *Foundations for Microwave Engineering, 2nd Edition*, New York, Wiley-IEEE Press.
- Doncker, Ph. D. 2000. The Use of Tansfinite Element in The Method of Mment Applied to Electromagnetic Scattering by Dielectric Cylinder. *Jurnal Progress in Electromagnetic Research*, 25,77-94.
- Febrinawati, H. F. 2007. *Fungsi Bessel dan Sifat Orthogonalnya*, Sumatra Barat, Universitas Andalas.
- Garg, R. 2008. *Analytical and Computational Methods in Electromagnetics*, Boston, ARTECH HOUSE, INC.
- Gibson, W. C. 2007. *The Method of Moment in Electromagnetics*, Boca Raton, CRC Press.
- Griffiths, D. J. 1999. *Introduction to Electrodynamics, 3rd Edition*, New Jersey, Prntice Hall.
- Harrington, R. 1993. *Field Computation By Moment Methods* Wiley-IEEE Press.
- Harrington, R. F. 2001. *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, Boston, Wiley-IEEE Press.
- Jin, Jian-Ming. 1962. *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Joachimowicz, N., Mallorqui, J. J., Bolomey, J. C. & Broquets, A. 1998. Convergence and stability assessment of Newton-Kantorovich reconstruction algorithms for microwave tomography. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 17, 562-570.
- Kraus, J. D. 1991. *Electromagnetics.*, New York, McGraw-Hill.

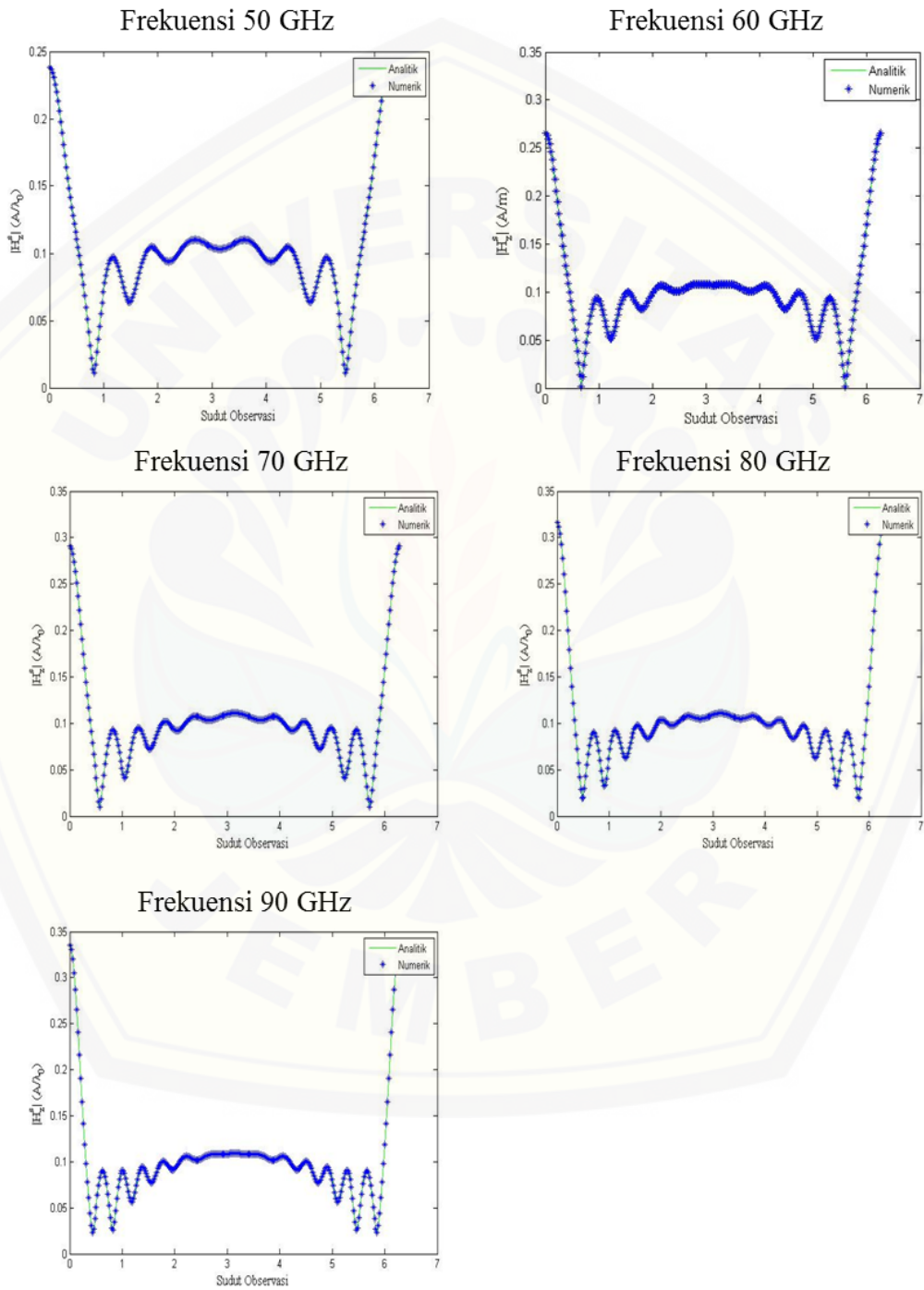
- Manik, Im & Gazali, Wikaria. 2000. Penyelesaian Fungsi Bessel Jenis Pertama dengan Bantuan Program Komputer. *Jurnal proceedings, komputer dan sistem intelijen*, 5, 3-7.
- Muinsonen, Karri. 2012. *Electromagnetic Scattering*. Finland:University of Helsinki
- Nugroho, A. T. 2009. Modified Newton Kantorovich Methods for Solving Microwave Inverse Scattering Problems. *Jurnal ILMU DASAR*, 10, 153-159.
- Nugroho, A. T. 2015. *Microwave Tomography*. Doctor of Phylosophy, The University of Manchester.
- Nugroho, A. T. Direct Scattering Problem for Microwave Tomography. The 1st IBSC 2016, 2016 Jember, Indonesia. Universitas Jember, 158.
- Pain, H. J. 2005. *The Physics of Vibrations and Waves, 6th Edition*, London, John Wiley & Sons.
- Peterson, A., Ray, S. & Mittra, R. 1998. *Computational Methods for Electromagnetics*, Wiley-IEEE Press
- Pozar, David M. 1998. *Microwave Engineering Fourth Edition*. United State: John Willey & Sons, Inc.
- Richmond, J. 1965. Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross section shape. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 13, 334-341.
- Roy, T., Sarkar, T. K., Djordjevic, A. R. & Salazar-Palma, M. 1998. Time-domain analysis of TM scattering from conducting cylinders using a hybrid method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46, 1471-1477.
- Semenov, S. Y. & Corfield, D. R. 2008. Microwave Tomography for Brain Imaging: Feasibility Assessment for Stroke Detection. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2008, 1-8.

LAMPIRAN

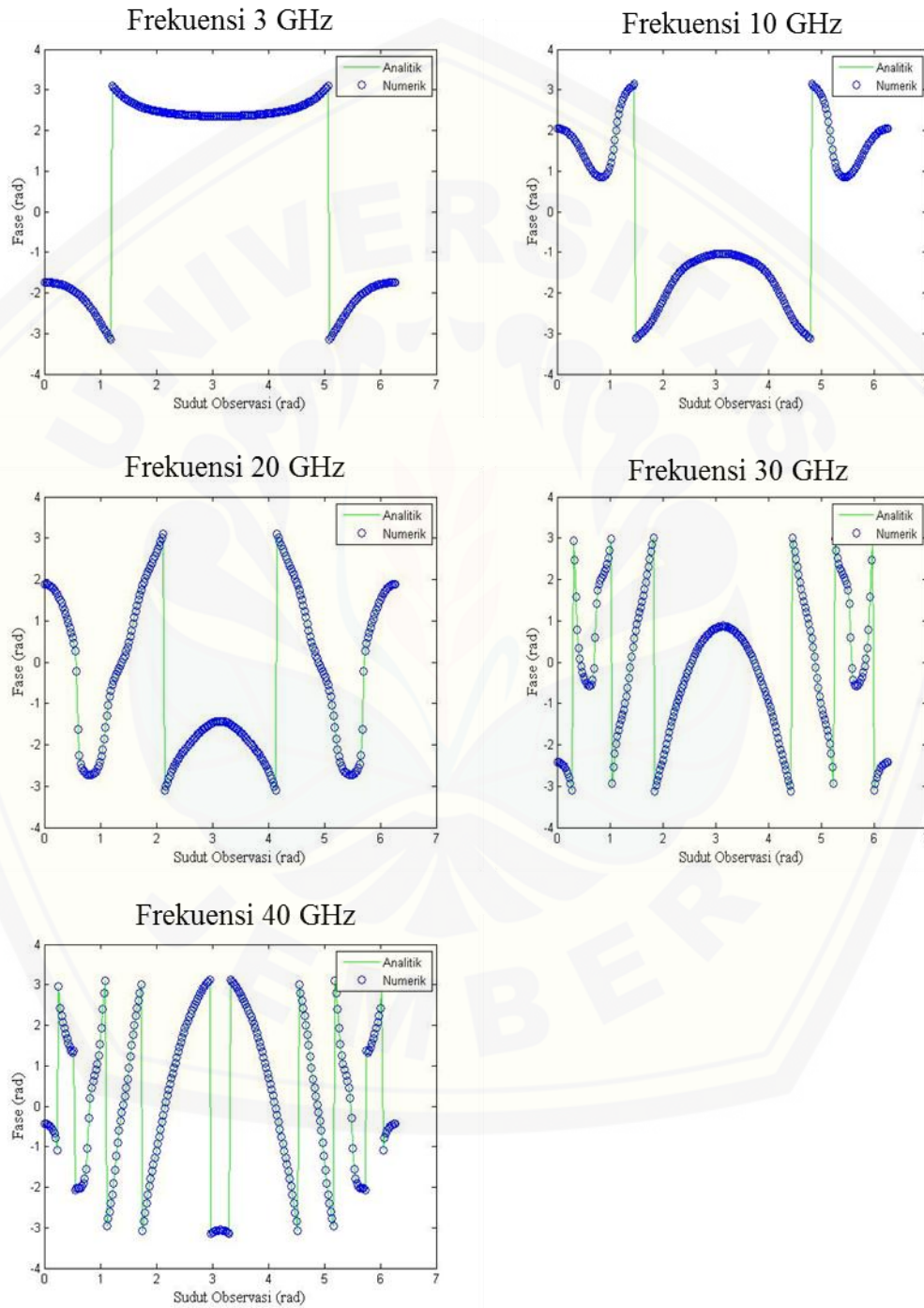
Lampiran 4.1a Grafik magnitude medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz



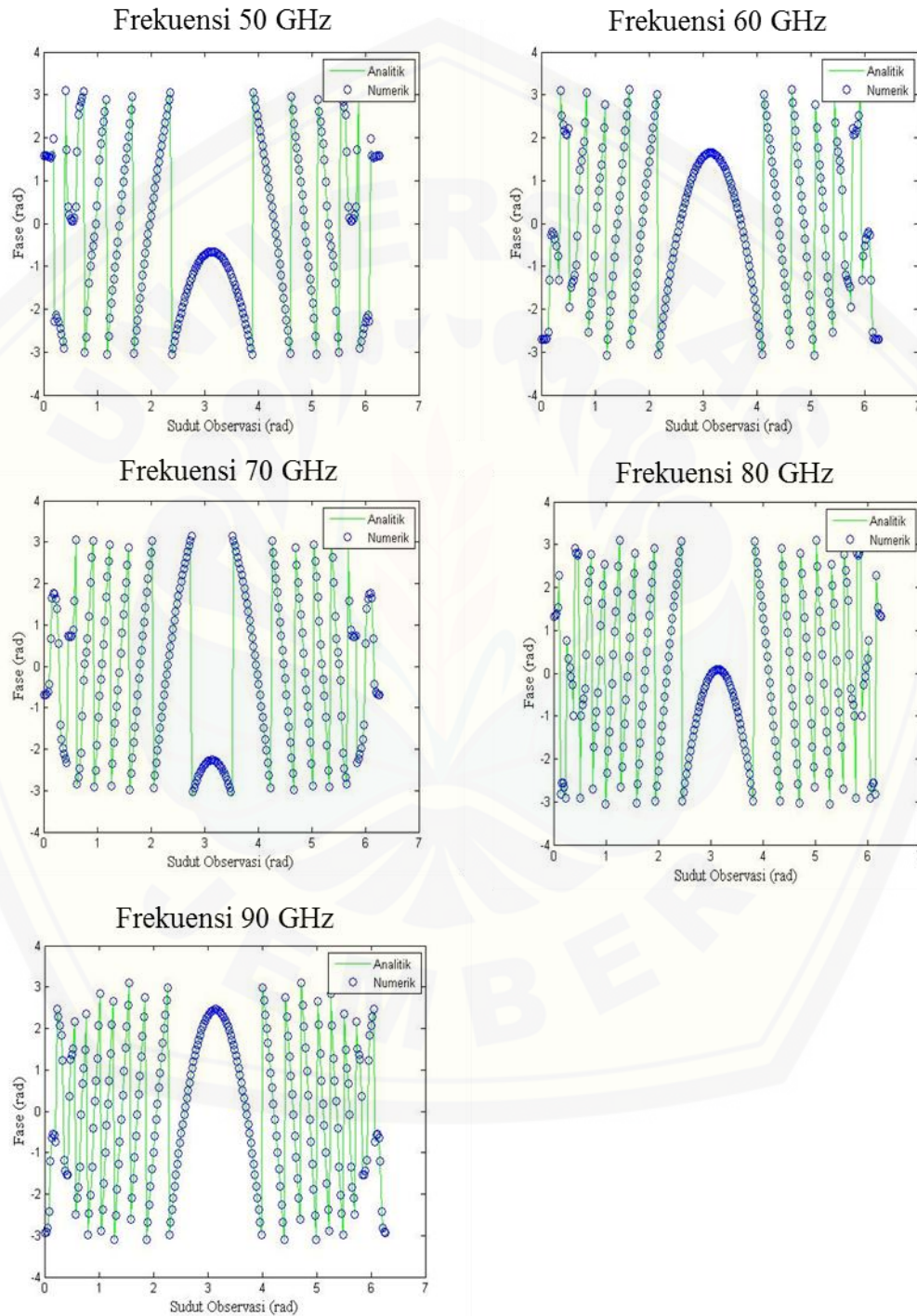
Lampiran 4.1b Grafik *magnitude* medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz



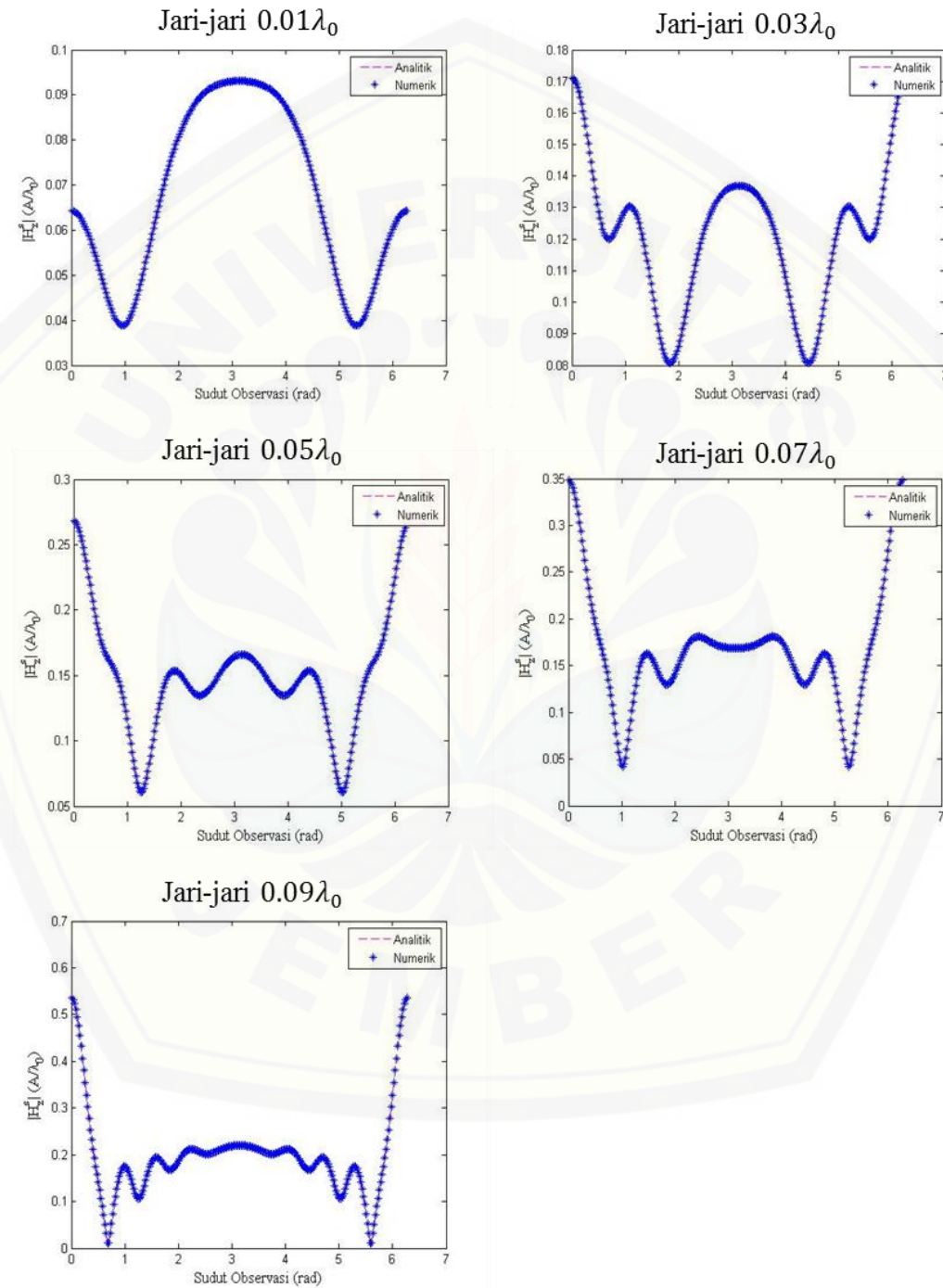
Lampiran 4.2a Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz



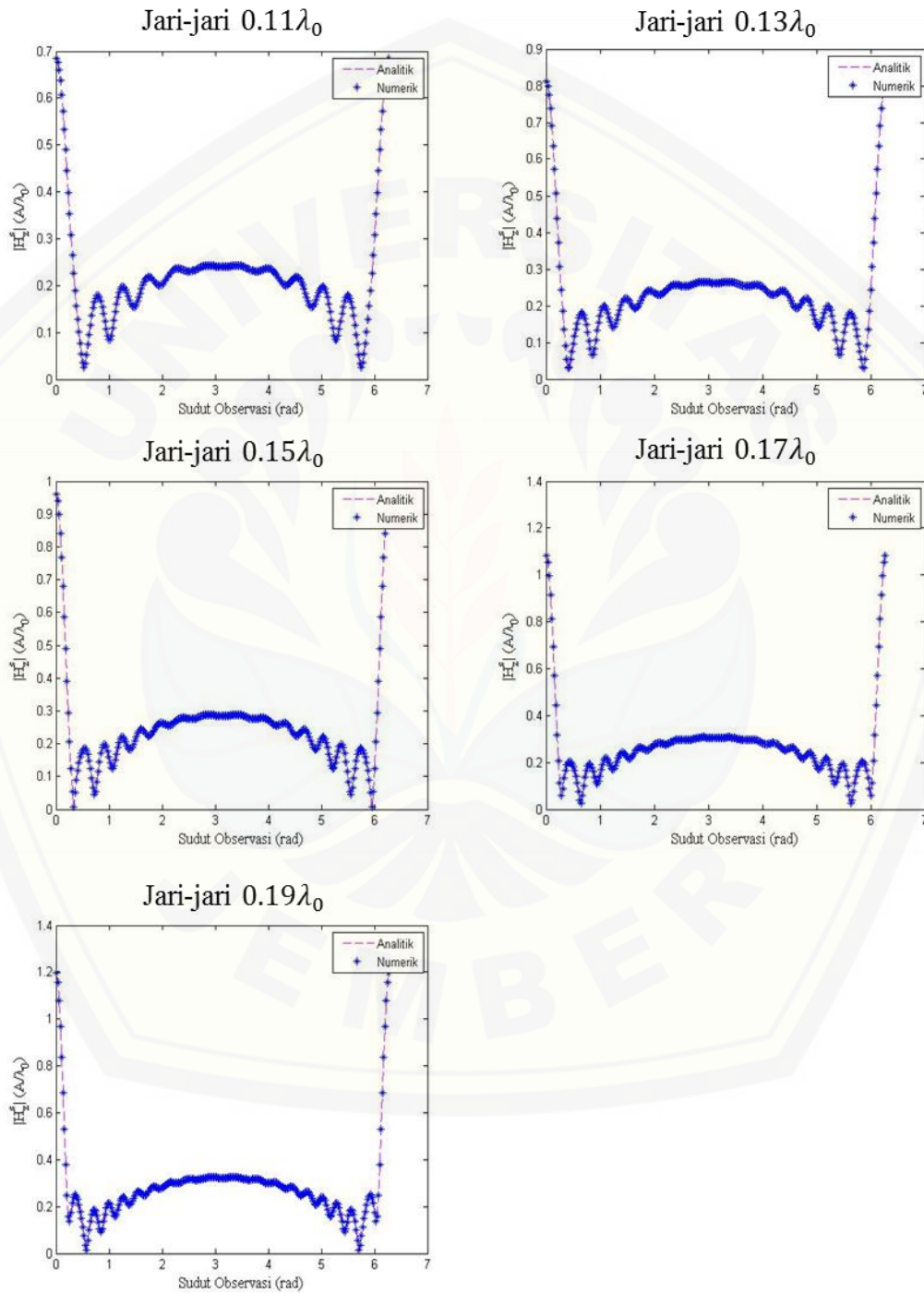
Lampiran 4.2b Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz



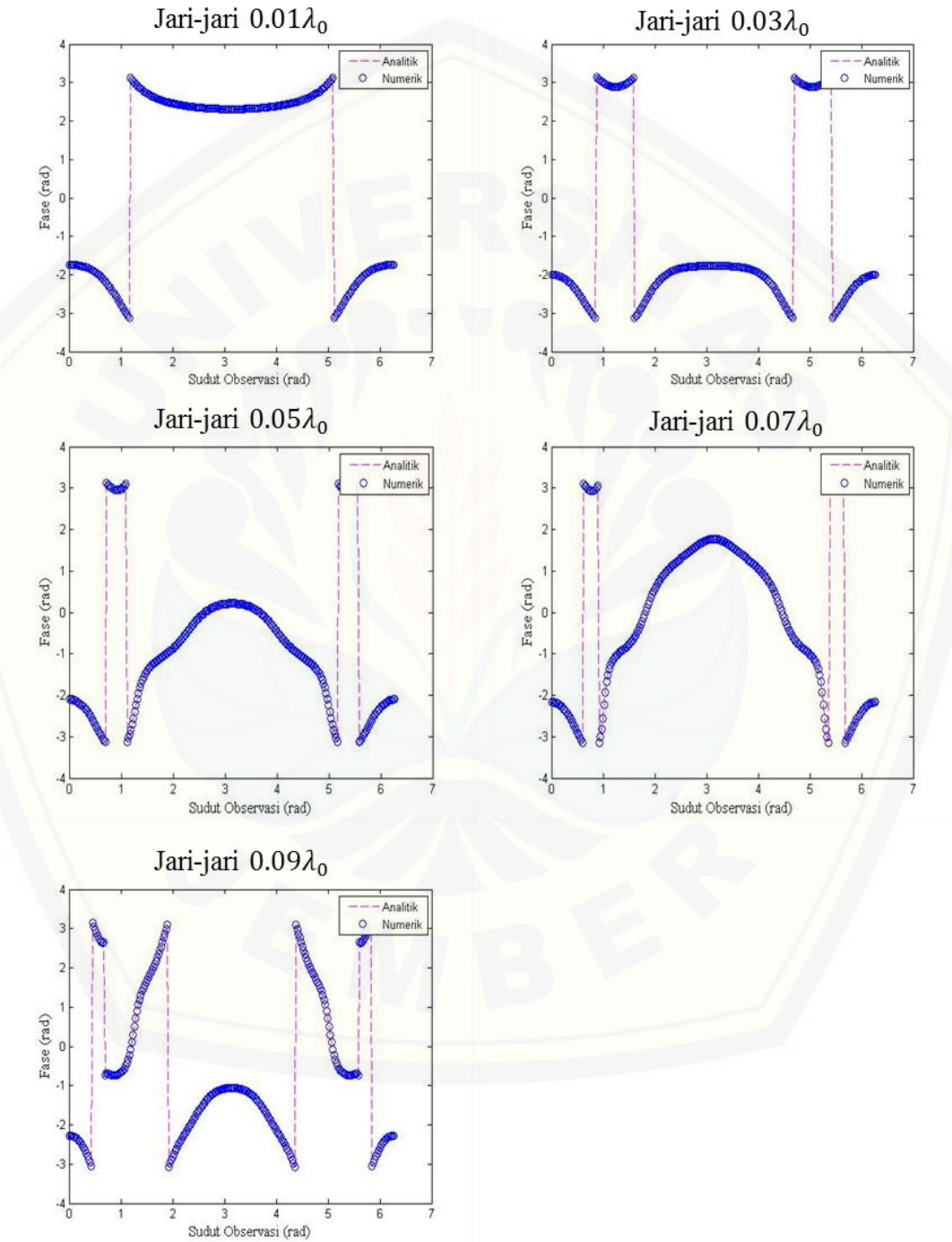
Lampiran 4.3a Grafik *magnitude* medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$



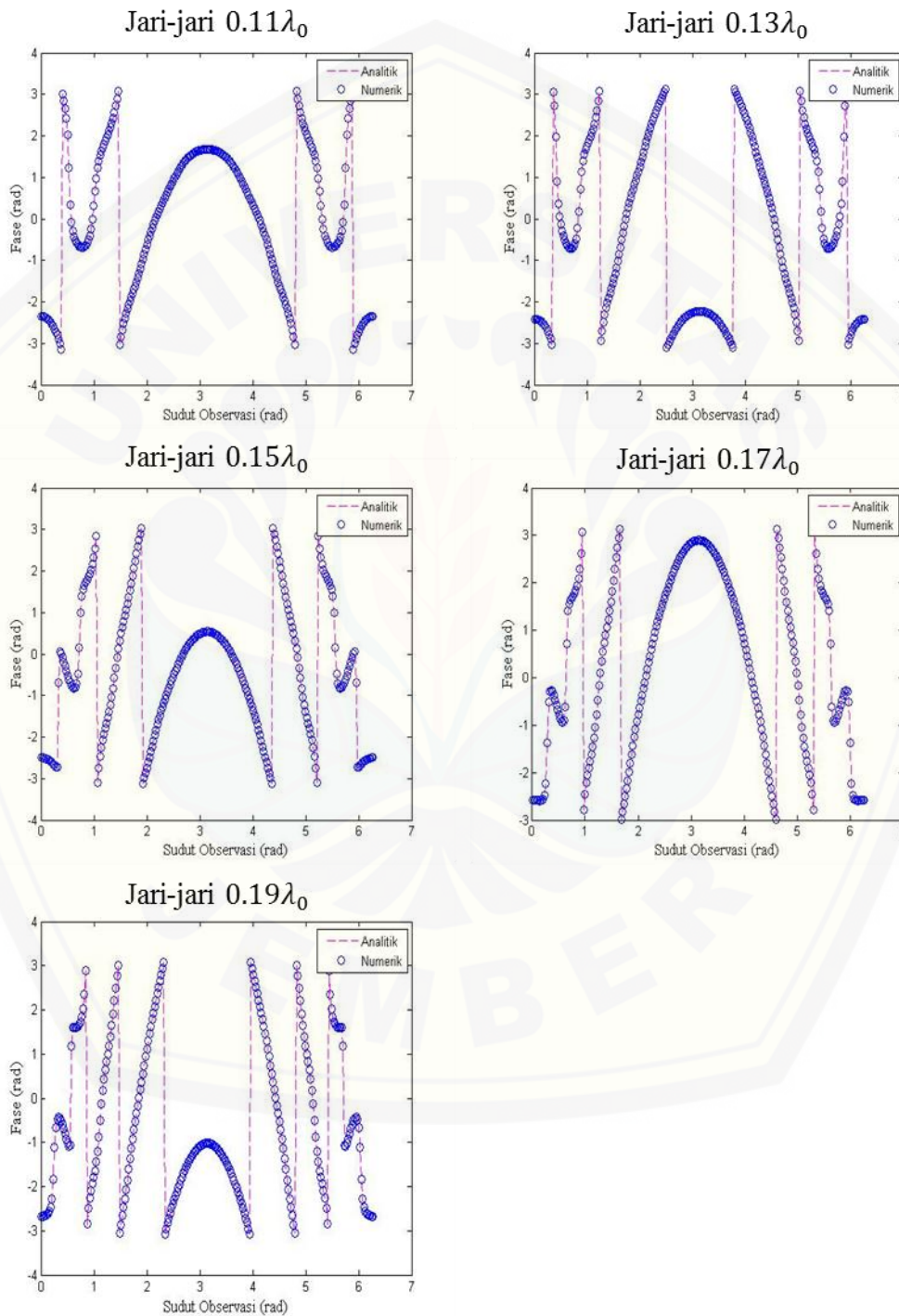
Lampiran 4.3b Grafik *magnitude* medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$



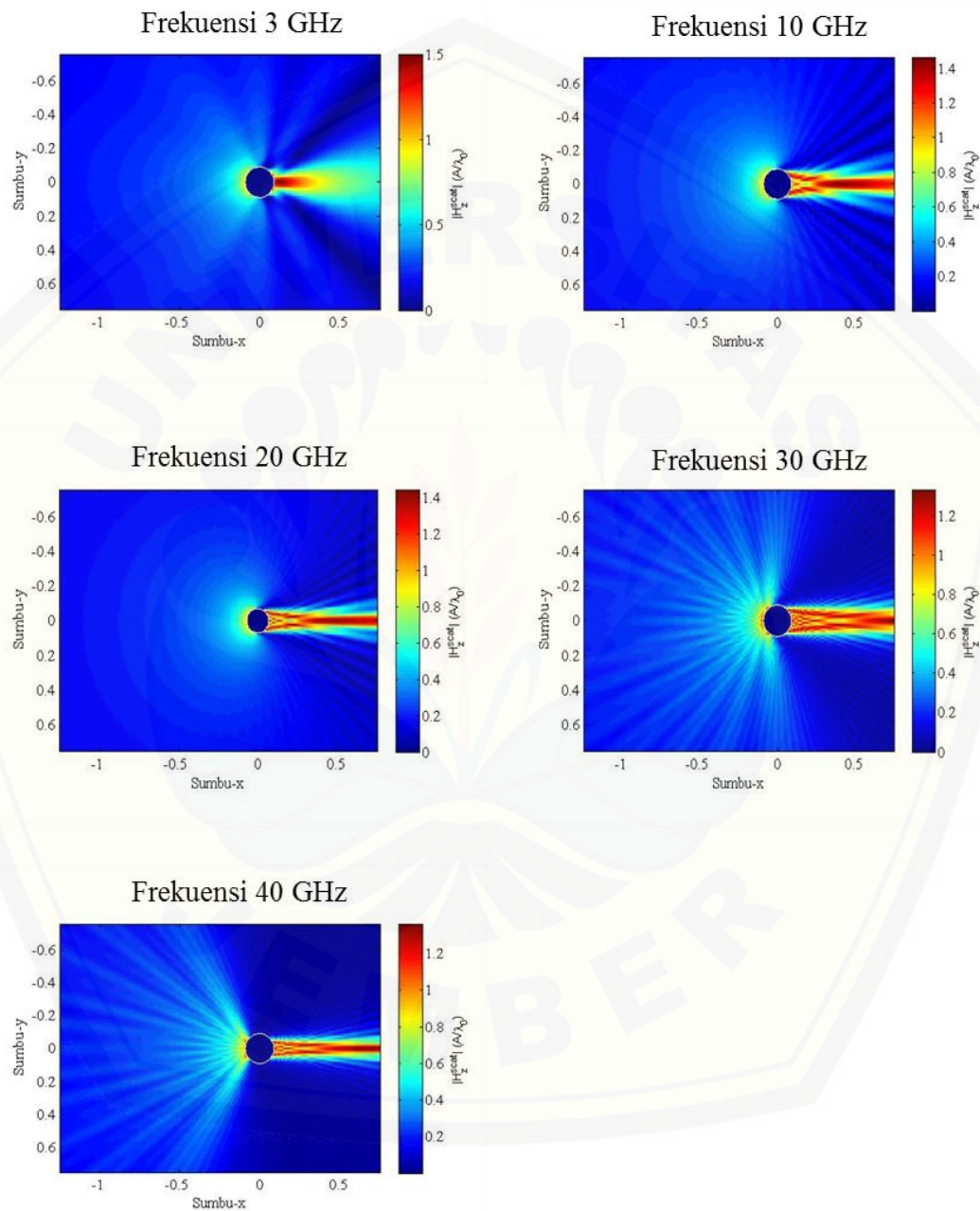
Lampiran 4.4a Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$



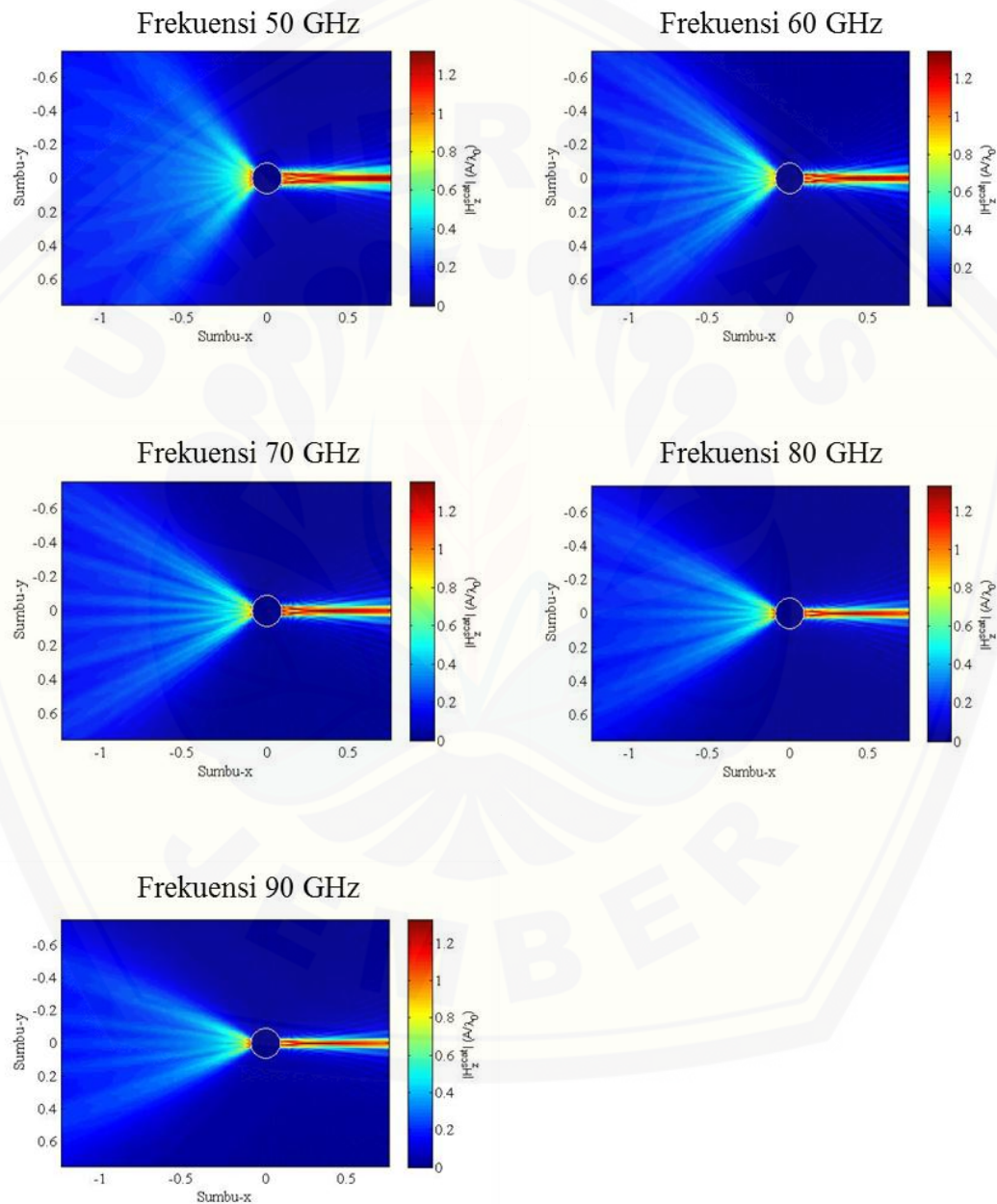
Lampiran 4.4b Grafik fase gelombang medan magnet terhambur pada konfigurasi titik observasi melingkar pada frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$



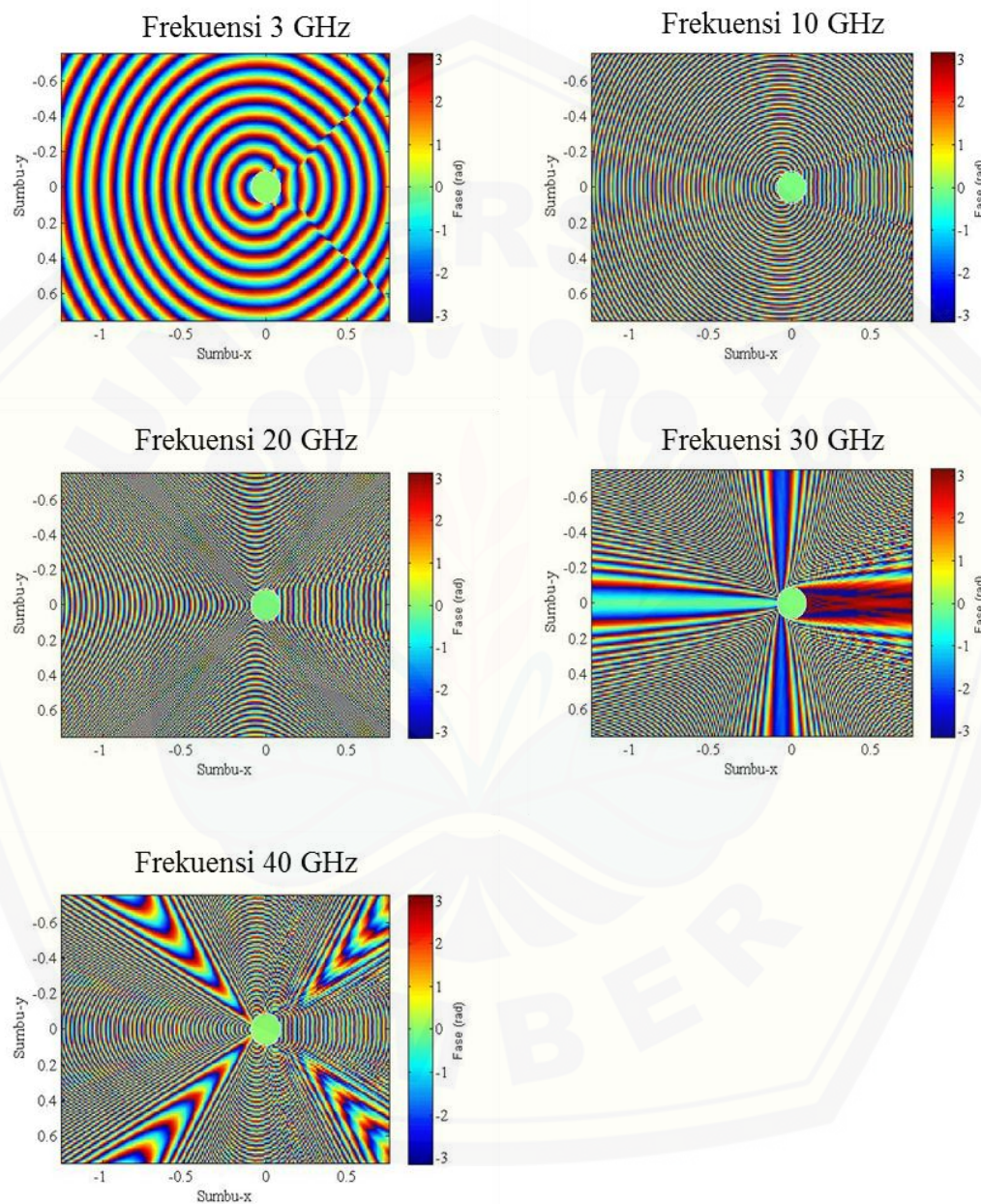
Lampiran 4.5a Citra 2D *magnitude* medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz



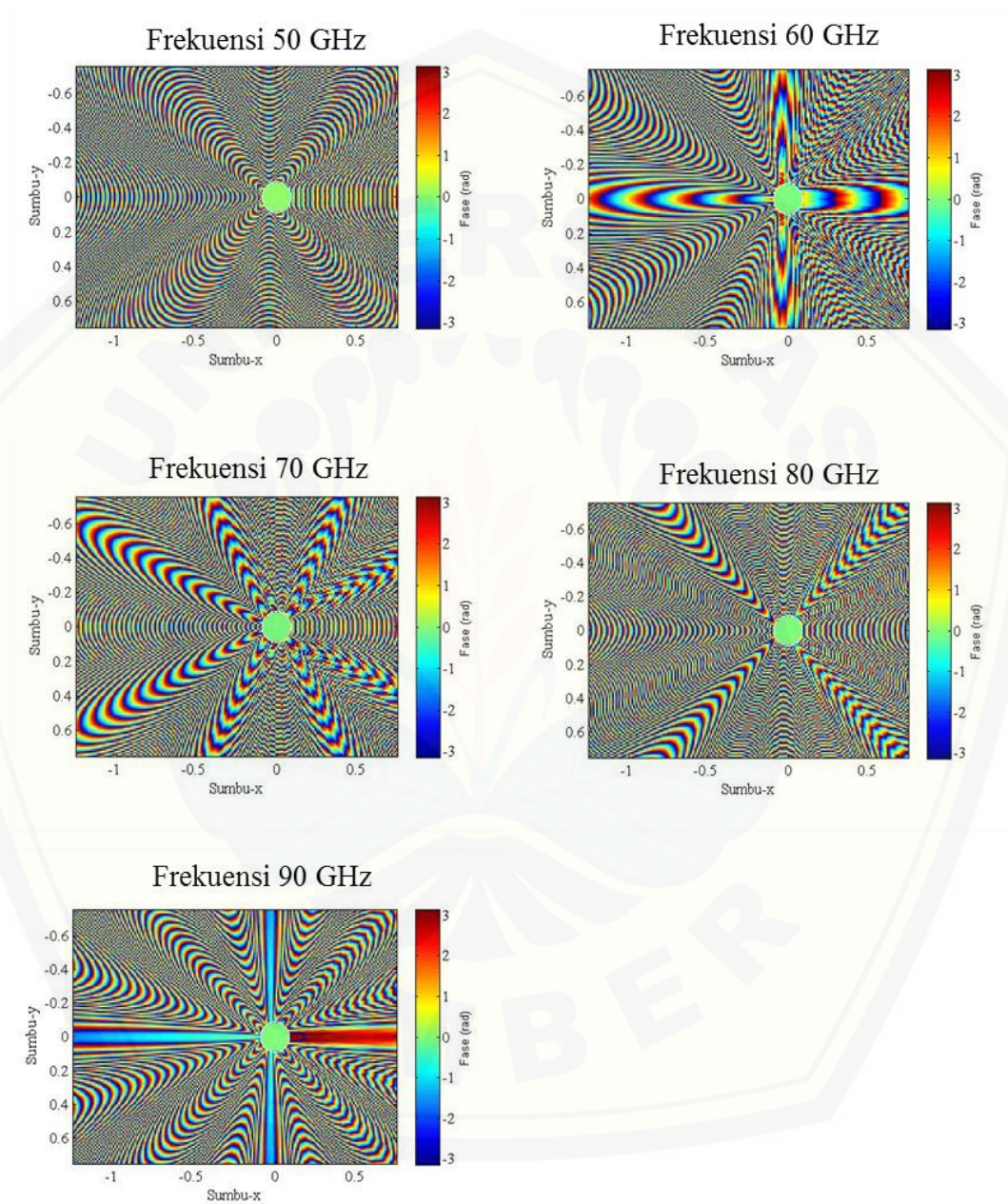
Lampiran 4.5b Citra 2D *magnitude* medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz



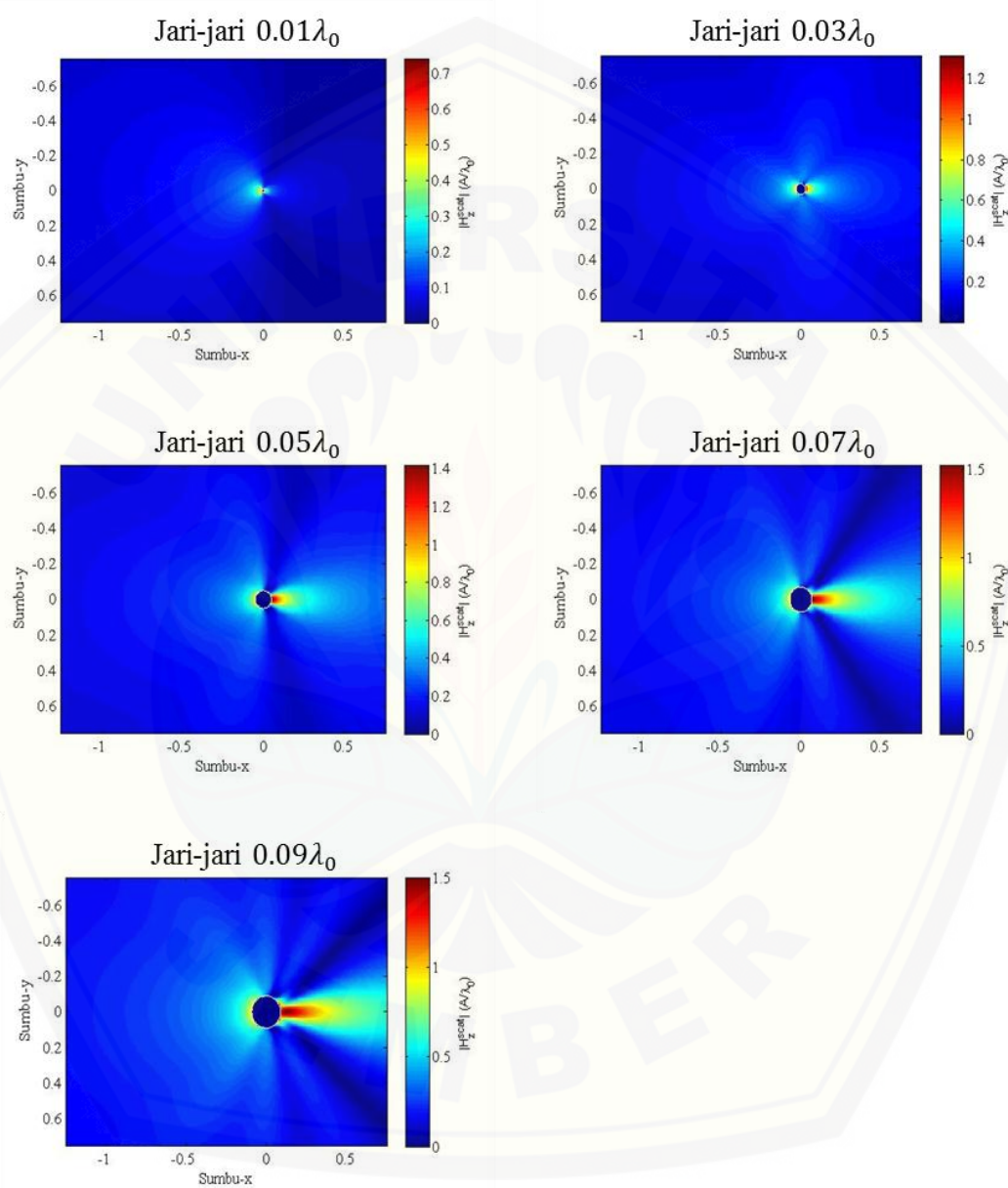
Lampiran 4.6a Citra 2D fase gelombang medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz



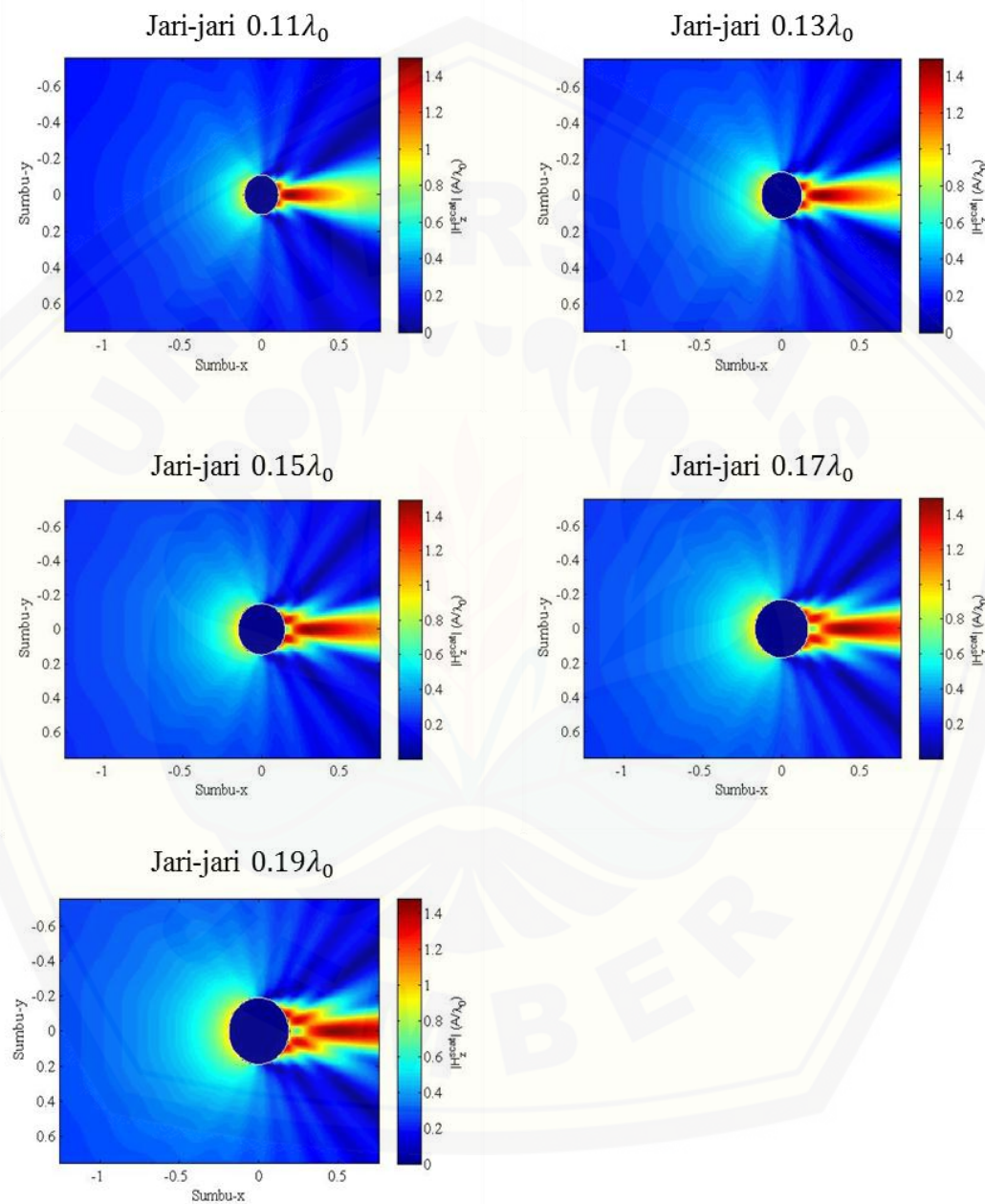
Lampiran 4.6b Citra 2D fase gelombang medan magne terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz



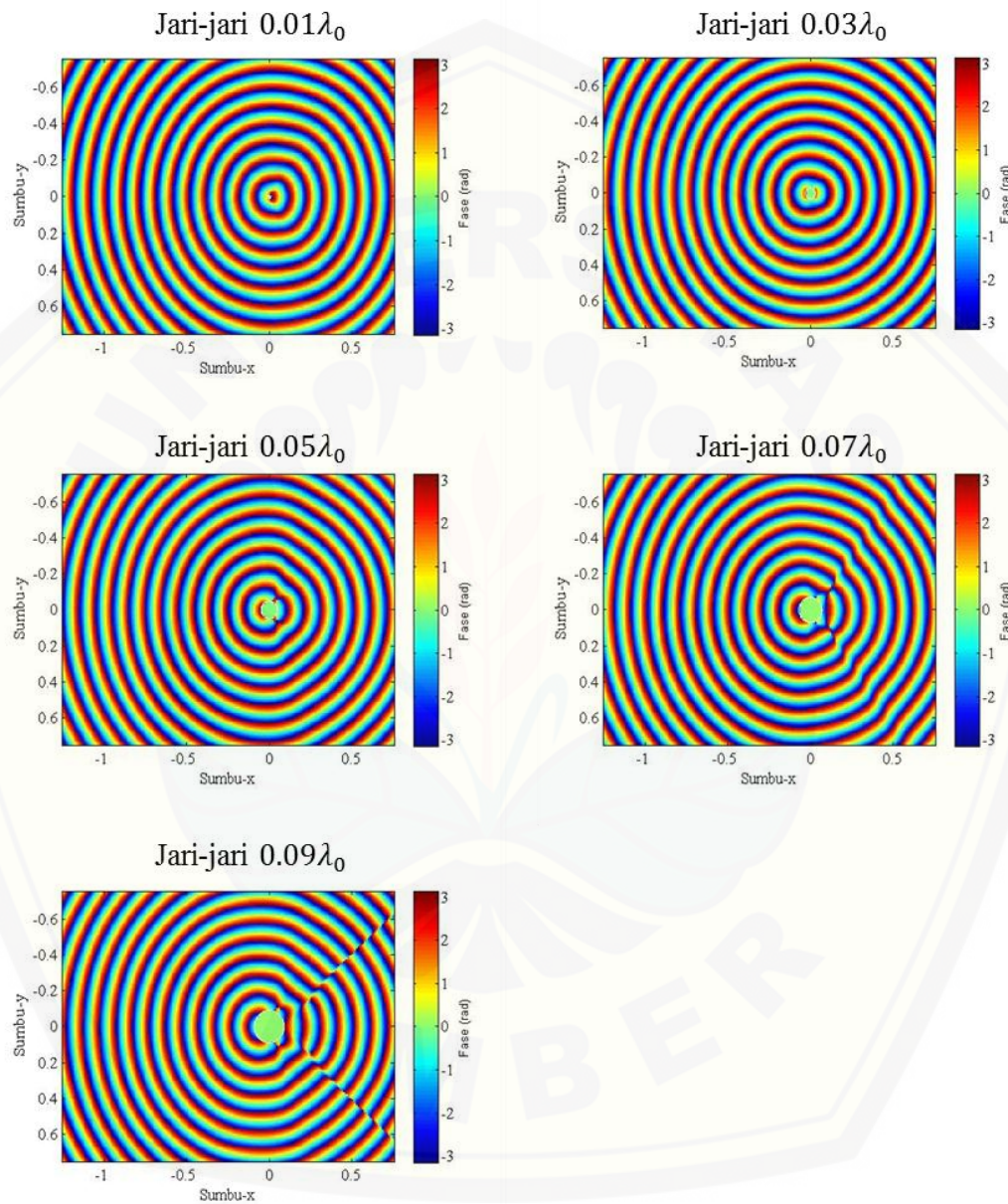
Lampiran 4.7a Citra 2D *magnitude* medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$



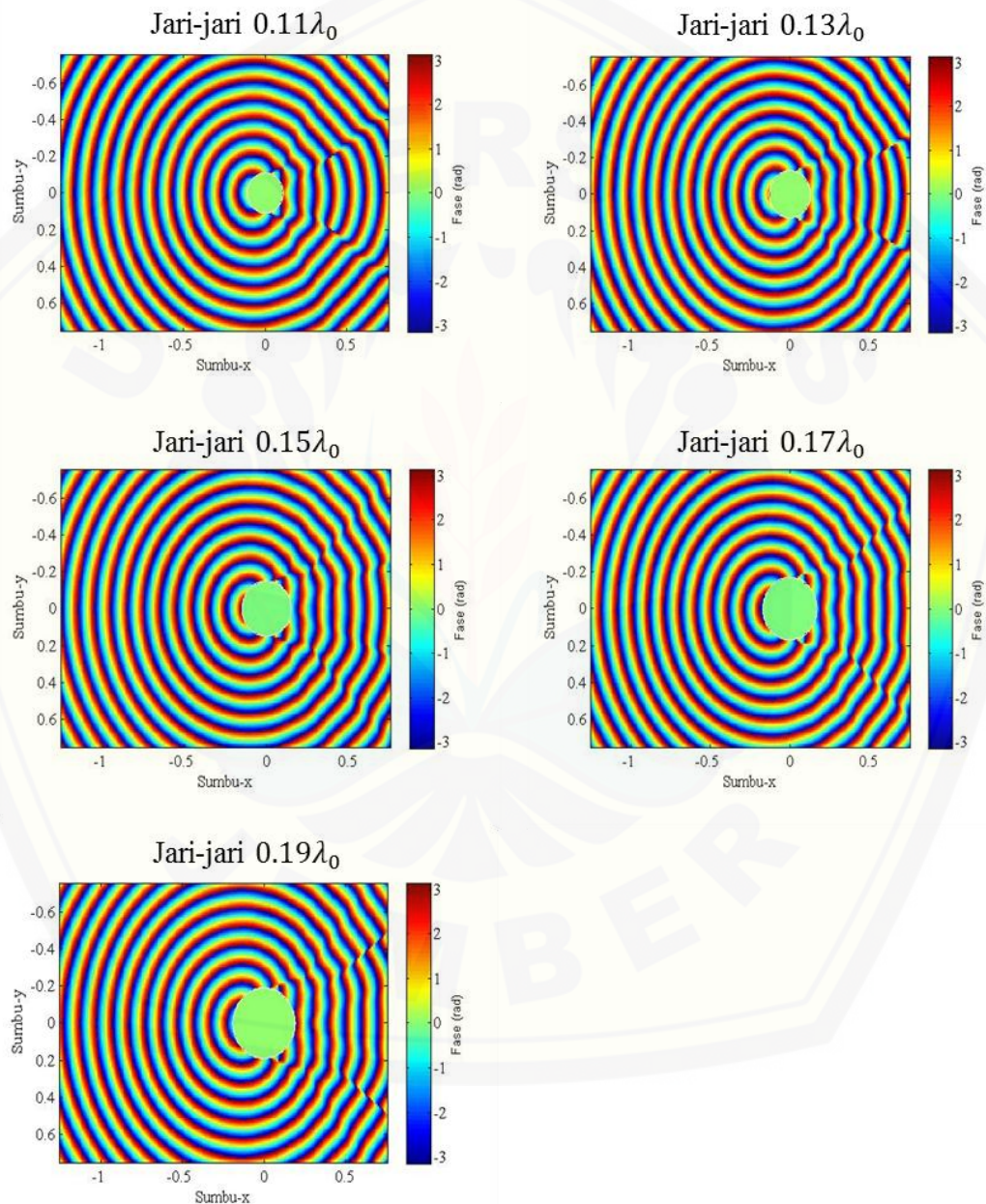
Lampiran 4.7b Citra 2D *magnitude* medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$



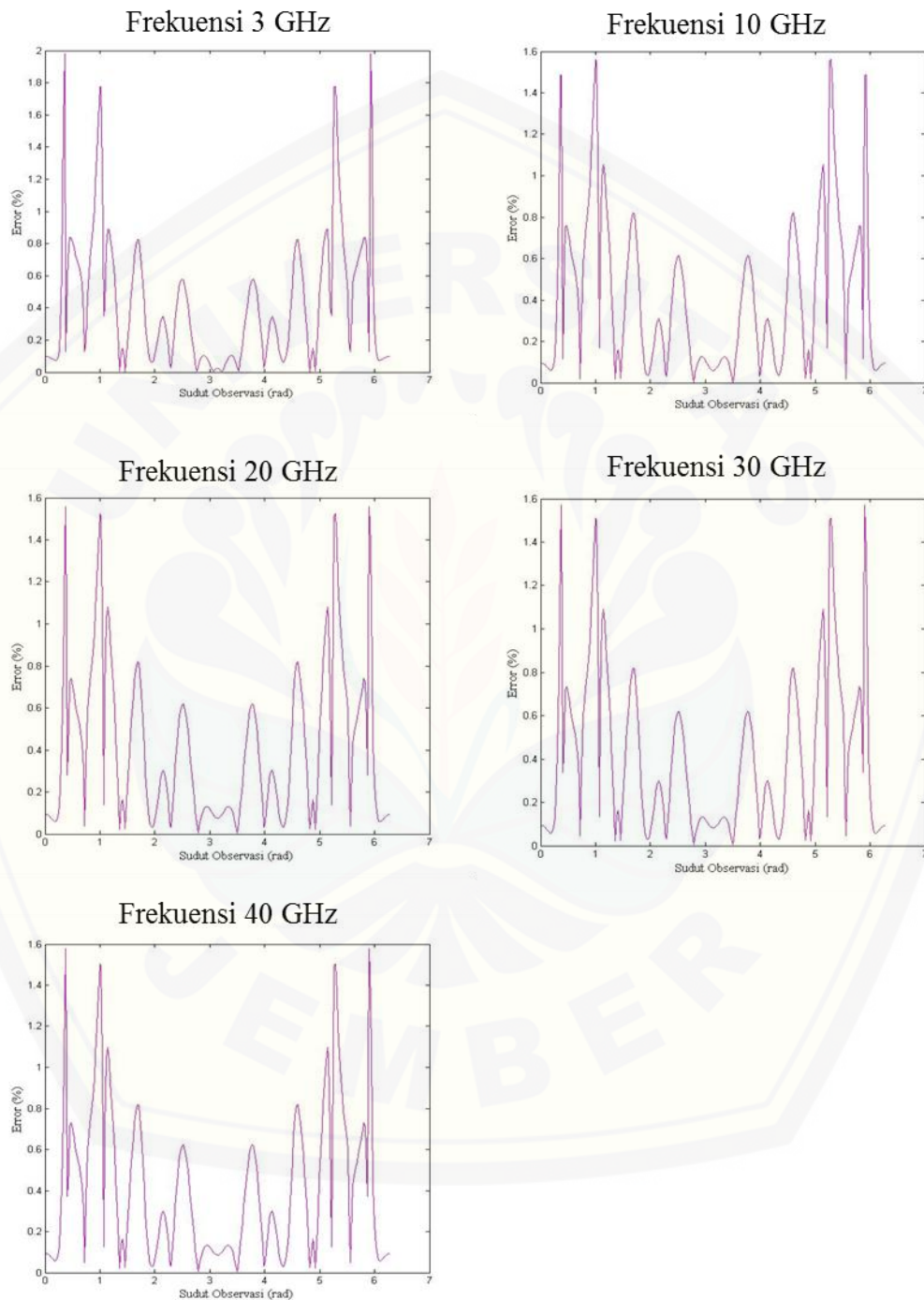
Lampiran 4.8a Citra 2D fase gelombang medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$



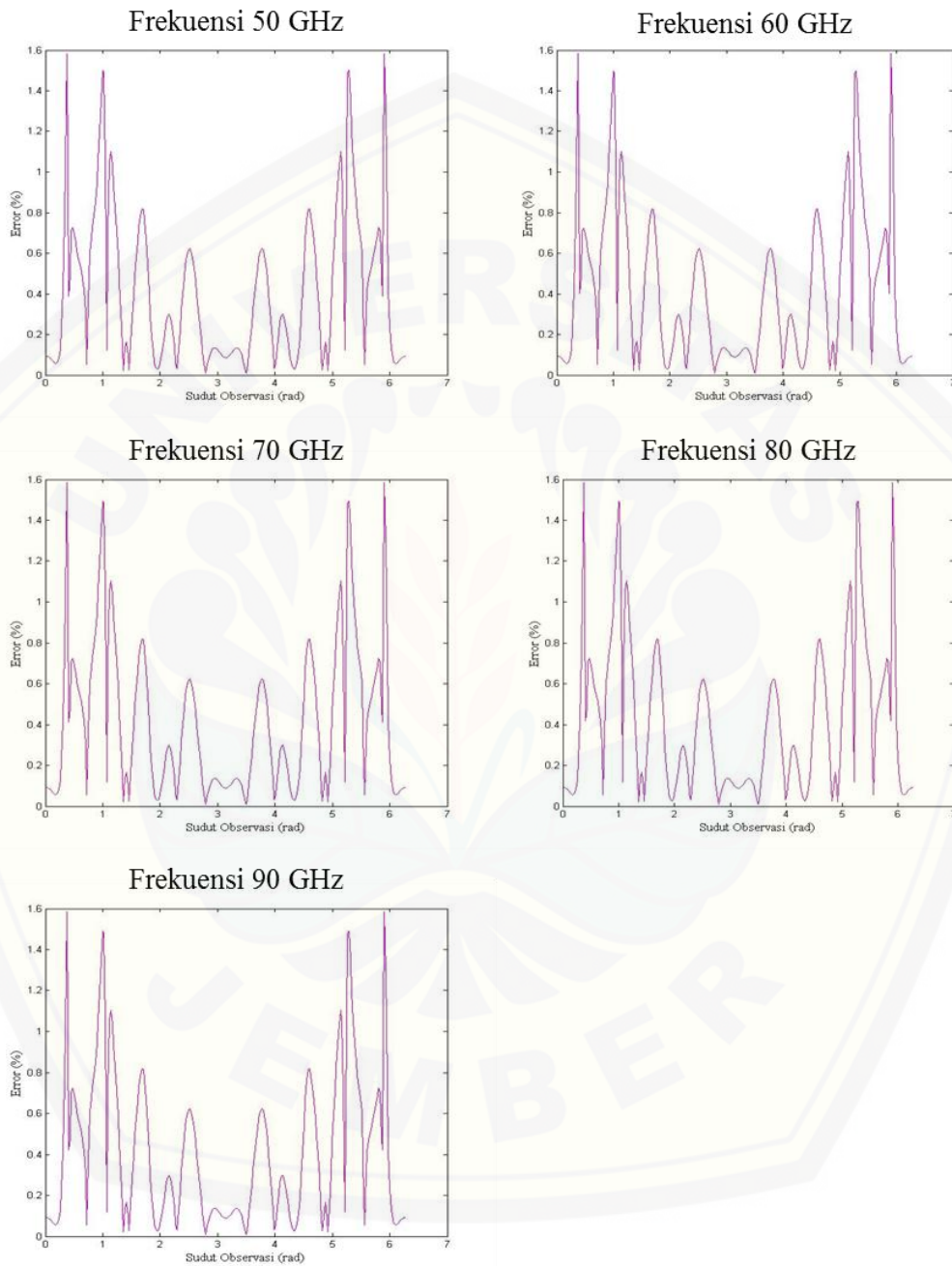
Lampiran 4.8b Citra 2D fase gelombang medan magnet terhambur di sekitar silinder pada sebuah *mesh* dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$



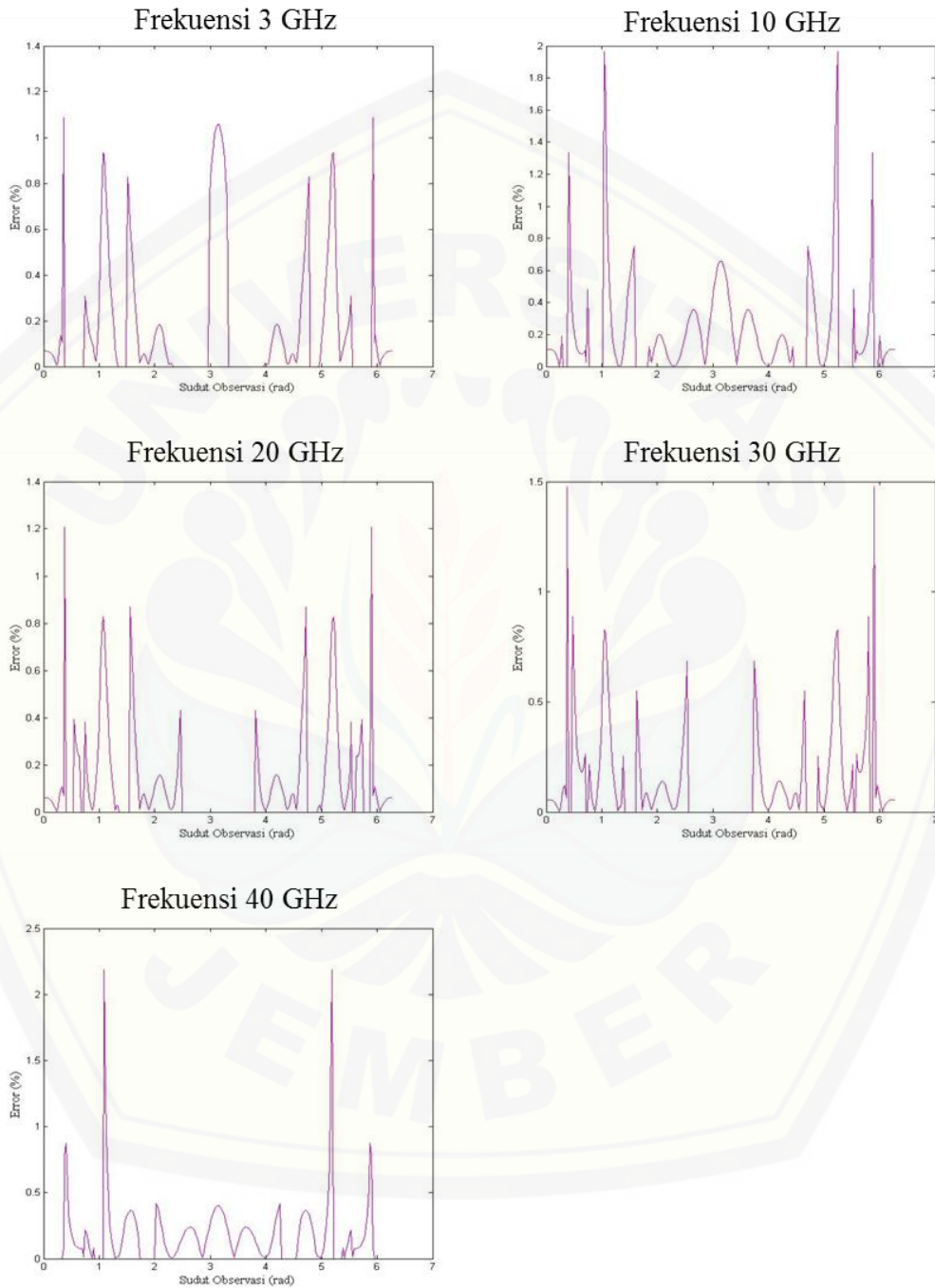
Lampiran 4.9a *Error* relatif *magnitude* hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-40 GHz



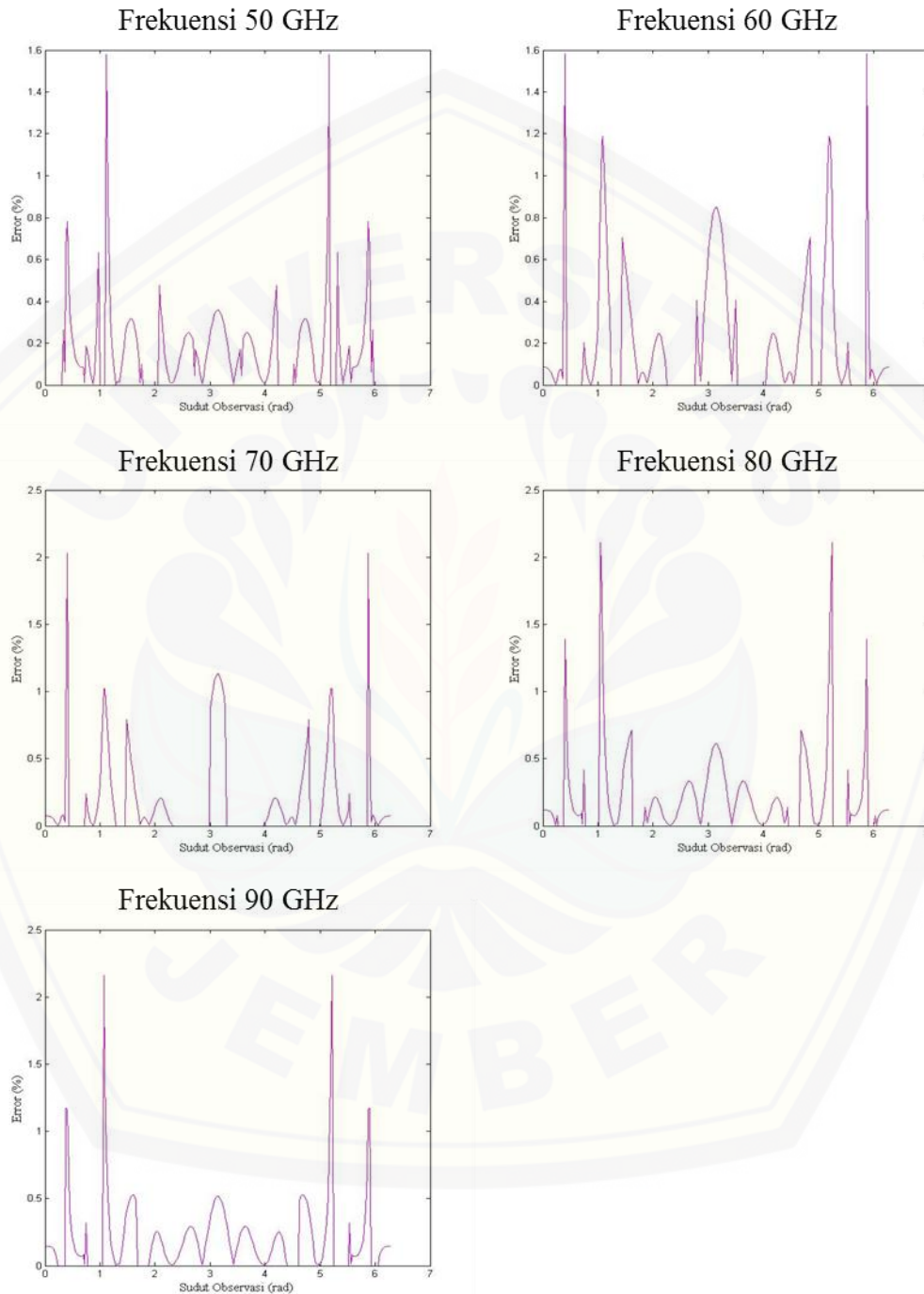
Lampiran 4.9b *Error* relatif *magnitude* hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz



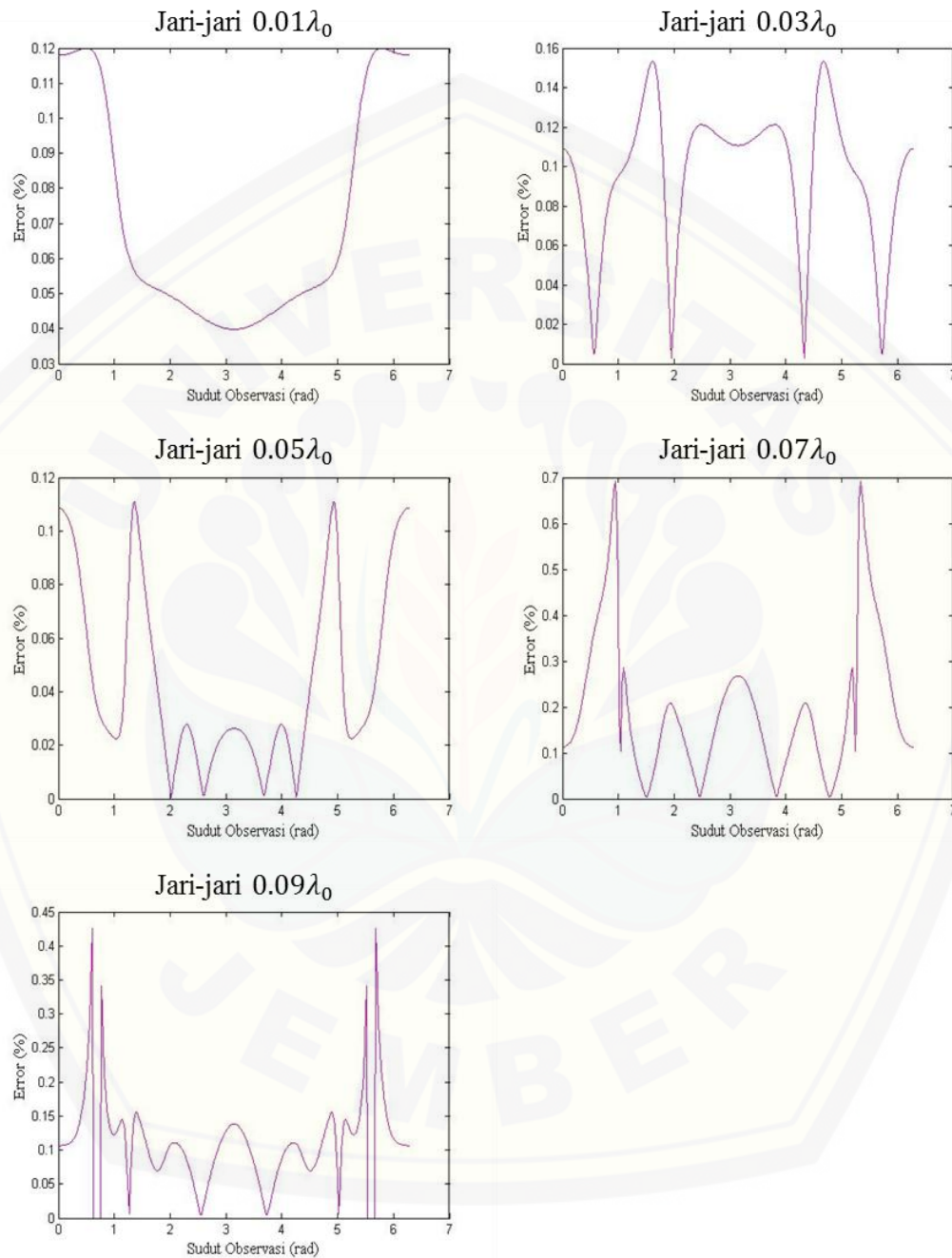
Lampiran 4.10a *Error* relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 3 GHz-50 GHz



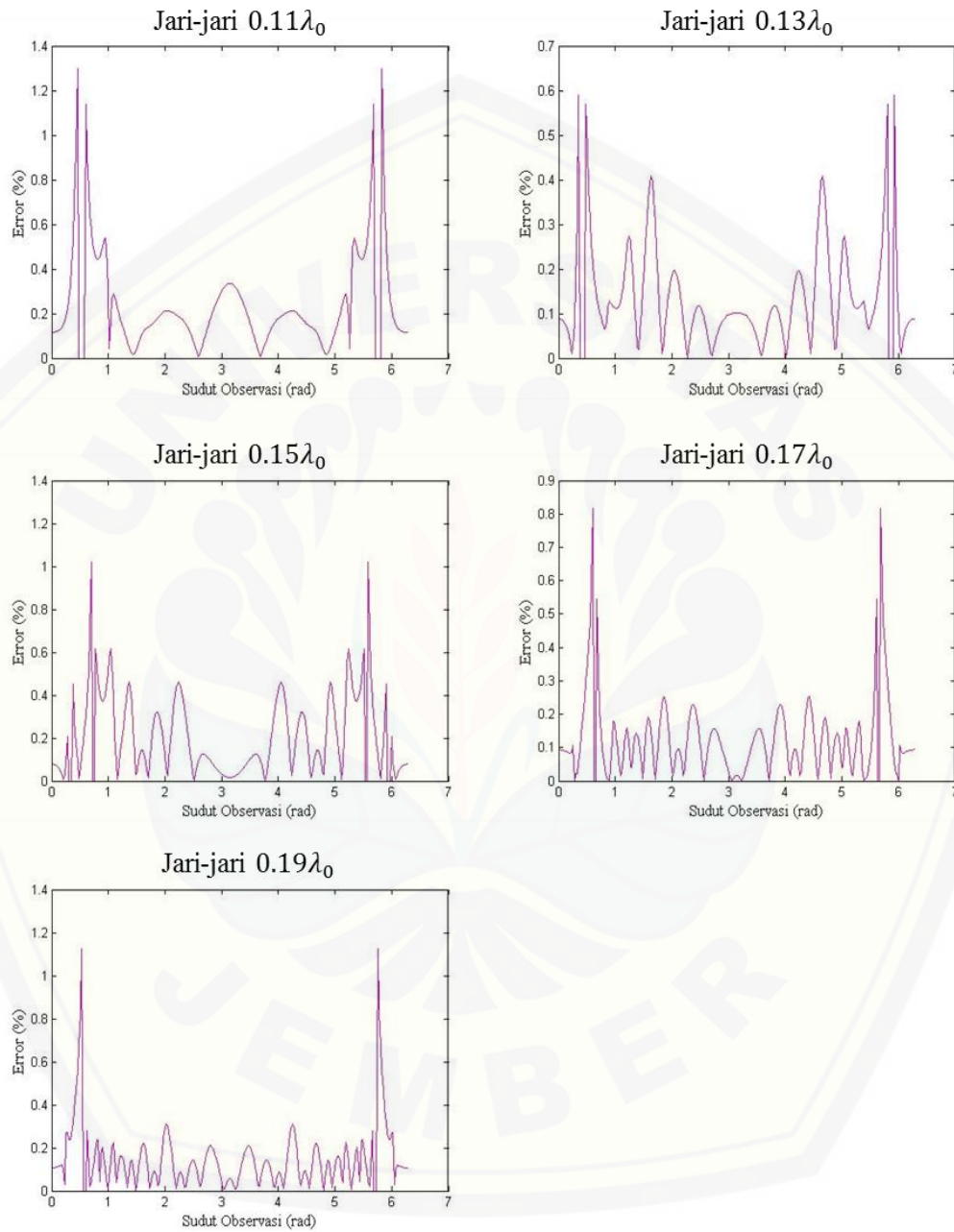
Lampiran 4.10b *Error* relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan jari-jari silinder $0.07\lambda_0$ untuk variasi frekuensi 50 GHz-90 GHz



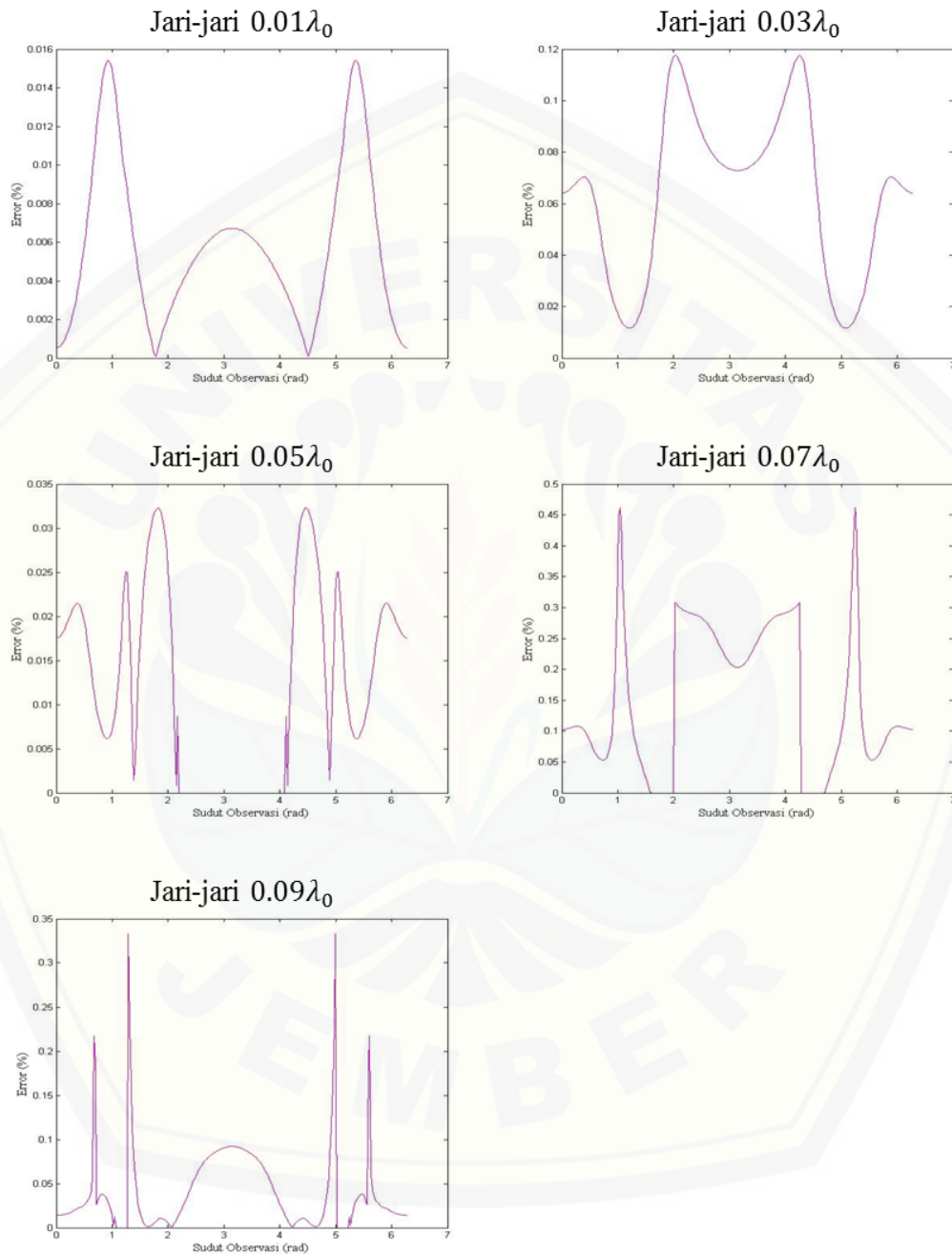
Lampiran 4.11a *Error* relatif *magnitude* hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$



Lampiran 4.11b *Error* relatif *magnitude* hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$



Lampiran 4.12a *Error* relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.01\lambda_0$ - $0.09\lambda_0$



Lampiran 4.12b *Error* relatif fase gelombang hasil numerik terhadap hasil analitik dengan frekuensi 3 GHz untuk variasi jari-jari silinder $0.11\lambda_0$ - $0.19\lambda_0$

