

**SINTESIS SUARA GAMELAN GANGSA MENGGUNAKAN METODE
MODIFIED FREQUENCY MODULATION (ModFM)**

KOMPETENSI KOMPUTASI

SKRIPSI



DEWA MADE SRI ARSA

1008605051

JURUSAN ILMU KOMPUTER

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS UDAYANA

JIMBARAN

2014

**SINTESIS SUARA GAMELAN GANGSA MENGGUNAKAN METODE
MODIFIED FREQUENCY MODULATION (ModFM)**

KOMPETENSI KOMPUTASI

[SKRIPSI]

Sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

Komputer

pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Udayana

Tulisan ini merupakan hasil penelitian yang belum pernah dipublikasikan

DEWA MADE SRI ARSA

NIM. 1008605051

Pembimbing I

Pembimbing II

I Made Widiartha, S.Si, M.Kom
NIP. 19821220 200801 1 008

Agus Muliantara, S.Kom, M.Kom
NIP. 19800616 200501 1 001

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Judul Skripsi : Sintesis Suara Gamelan Gangsa Menggunakan Metode
Modified Frequency Modulation (ModFM)
Kompetensi : Komputasi
Nama : Dewa Made Sri Arsa
NIM : 1008605051
Tanggal Seminar : 19 September 2014

Disetujui Oleh:

Pembimbing I

Penguji I

I Made Widiartha, S.Si, M.Kom

NIP. 198212202008011008

Ngurah Agus Sanjaya ER, S.Kom, M.Kom

NIP. 197803212005011001

Pembimbing II

Penguji II

Agus Muliantara, S.Kom, M.Kom

NIP. 198006162005011001

I Komang Ari Mogi, S.Kom, M.Kom

NIP. 198409242008011007

Penguji III

I Dewa Made Bayu Atmaja Darmawan, S.Kom, M.Cs.

NIP. 198901272012121001

Mengetahui,

Jurusan Ilmu Komputer

Ketua,

Drs. I Wayan Santiyasa, M.Si.

NIP. 196704141992031002

Judul : Sintesis Suara Gamelan Gangsa Menggunakan Metode Modified Frequency Modulation (ModFM)
Nama : Dewa Made Sri Arsa
Pembimbing : 1. I Made Widiartha, S.Si., M.Kom.
2. Agus Muliantara, S.Kom., M.Kom.

ABSTRAK

Gangsa merupakan salah satu jenis gamelan di Bali. Dengan semakin berkembangnya metode pembelajaran dan teknologi, memainkan gamelan gangsa secara langsung kurang efisien mengingat bobot dan dimensi dari gamelan gangsa itu sendiri. Untuk itu perlu dilibatkan teknologi dengan cara mendigitalisasi permainan gamelan gangsa sehingga memudahkan dalam memainkan maupun pembelajaran memainkan gamelan gangsa.

Teknik sintesis suara dalam bidang pengolahan suara digital dapat membantu mendigitalisasi permainan gamelan gangsa. Teknik sintesis dilakukan dengan menggunakan metode Modified Frequency Modulation. Sebelum dilakukan proses sintesis, dilakukan analisis 6 gangsa kantil pengumbang dan 6 gangsa kantil pengisep untuk mendapatkan rentang frekuensi dasar setiap bilah dan pencarian bungkus sinyal menggunakan Transformasi Hilbert.

Dari hasil pengujian yang dilakukan didapatkan perbandingan frekuensi pembawa dan pemodulasi adalah 1:7 dengan rentang rata-rata selisih frekuensi harmoni adalah 1 Hz hingga 49 Hz. Suara hasil sintesis 100% telah memiliki nada yang relatif sama dengan suara dataset yang dibuktikan dengan frekuensi dasar suara hasil sintesis berada dalam rentang toleransi.

Kata kunci : Sintesis, frekuensi dasar

Title : Gamelan *Gangsa* Sound Synthesis Using Modified
Frequency Modulation (ModFM) Method
Name : Dewa Made Sri Arsa
Main Supervisor : I Made Widiartha, S.Si.; M.Kom.
Co-Supervisor : Agus Muliantara, S.Kom.; M.Kom.

ABSTRACT

Gangsa is one of the types of gamelans in Bali. With the development of teaching methods and technology, playing *gangsa* gamelan directly is less efficient given the weight and dimension of the *gangsa* gamelan itself. For that we need to involve a technology by digitizing the play of *gangsa* gamelan to ease the problem of playing and learning it.

Sound synthesis techniques in the field of digital sound processing can help digitize the play of *gangsa* gamelan. Synthesis technique is done by using Modified Frequency Modulation. Before making a synthesis process, 6 *gangsa* kantil pengumbangs and 6 *gangsa* kantil pengiseps were analyzed to get the fundamental frequency range of each blade and the search of signal wrap using Hilbert Transform.

The results showed that the ratio of carrier frequency and modulation was 1:7 with the average span of the difference of harmonic frequency was 1 Hz to 49 Hz. The 100% synthesis of basil sound of synthesis had had relatively the same tone as a sound dataset as evidenced by the synthesis of fundamental frequency of basil sounds which was within the tolerance range.

Keywords : Synthesis, fundamental frequency

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya tugas akhir yang berjudul “*Sintesis Suara Gamelan Gangsa Menggunakan Metode Modified Frequency Modulation (ModFM)*” dapat diselesaikan tepat pada waktunya.

Secara khusus penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Widiartha, S.Si, M.Cs dan Bapak Agus Muliantara, S.Kom, M.Kom karena telah meluangkan waktu untuk mengoreksi serta memberikan saran selama penyusunan tugas akhir.
2. Bapak-bapak dan ibu-ibu dosen di Jurusan Ilmu Komputer yang telah meluangkan waktu turut memberikan saran dan masukan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Komisi Seminar dan Tugas Akhir Jurusan Ilmu Komputer FMIPA UNUD, yang telah memberikan petunjuk dalam penyusunan penelitian tugas akhir.
4. Keluarga yang telah memberi masukan dan dukungan dalam penyusunan penelitian tugas akhir ini.
5. Teman-teman baik dari dalam maupun luar lingkungan Universitas Udayana yang telah memberikan dukungan moral dalam penyelesaian penelitian tugas akhir ini.
6. Semua pihak yang telah memberi dukungan sehingga laporan ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang ditentukan.

Penulis berharap tugas akhir ini mampu memberikan inspirasi kepada pembaca dan menemukan ide-ide baru yang dapat dibuat menjadi topik penelitian selanjutnya.

Bukit Jimbaran, 2 Oktober 2014

Dewa Made Sri Arsa

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Metodologi Penelitian	3
1.6.1. Data Penelitian	4
1.6.1.1. Pengumpulan Data	4
1.6.1.2. Pengolahan Data Awal	4
1.6.2. Desain Penelitian	4
1.6.3. Metode yang digunakan	5

1.6.4. Uji Coba dan Evaluasi	6
1.6.5. Tempat dan Waktu Pelaksanaan	9
BAB II	10
TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1. Tinjauan Studi	10
2.2. Gamelan <i>Gangsa</i>	11
2.3. Domain Waktu dan Frekuensi	13
2.4. Frekuensi Dasar dan Frekuensi Harmoni	13
2.5. Cent	14
2.6. Fast Fourier Transform (FFT)	15
2.7. FFT Window	19
2.8. Sound Forge	21
2.9. Moving Average Filter	22
2.10. Transformasi Hilbert	23
2.8.1. Definisi dan Properti	23
2.8.2. Sinyal Analitik	24
2.11. Frequency Modulation (FM)	25
2.12. Modified Frequency Modulation (ModFM)	31
BAB III	33
ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM	33
3.1. Kebutuhan Fungsional	33
3.1.1. Pencarian Sinyal Envelope	33
3.1.2. Sintesis Suara	33
3.1.3. Pencarian Frekuensi Harmoni	33

3.1.4. Pencarian Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni	34
3.2. Rancangan Data.....	34
3.3. Rancangan Antar Muka Sistem	34
BAB IV	37
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Pencarian Frekuensi Dasar	37
4.2. Input untuk Proses Sintesis.....	39
4.3. Proses Sintesis	42
4.4. Uji Coba dan Evaluasi	42
4.5. Aplikasi Sederhana	46
4.6. Pembahasan	48
BAB V	53
KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1. Kesimpulan.....	53
5.2. Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1:Perbandingan frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi.....	7
Tabel 1. 2 : Tabel pemetaan frekuensi harmoni hasil sintesis.....	8
Tabel 1. 3 : Tabel pemetaan selisih nilai frekuensi harmoni.....	8
Tabel 1. 4 : Waktu Pelaksanaan Penelitian	9
Tabel 2 . 1 : Perbandingan fungsi window.....	21
Tabel 4. 1 : Frekuensi tertinggi seluruh bilah pengumbang hasil analisis Sound Forge	37
Tabel 4. 2 : Frekuensi tertinggi seluruh bilah pengisep hasil analisis Sound Forge	37
Tabel 4. 3 : Frekuensi dasar dari setiap data suara pengumbang.....	38
Tabel 4. 4 : Frekuensi dasar dari setiap data suara pengisep	38
Tabel 4. 5 : Sintak fungsi pencarian sinyal envelope.....	40
Tabel 4. 6 : Selisih frekuensi dasar pengumbang dengan frekuensi rata-rata pengumbang	41
Tabel 4. 7 : Selisih frekuensi dasar pengisep dengan frekuensi dasar rata-rata pengisep	42
Tabel 4. 8 : Sintak fungsi proses sintesis	42
Tabel 4. 9 : Frekuensi Harmoni Gangsa Kantil Pengumbang dan Pengisep Dataset	43
Tabel 4. 10 : Frekuensi dasar hasil sintesis bilah pertama percobaan pertama.....	43
Tabel 4. 11 : Hasil percobaan kedua gamelan gangsa kantil pengumbang.....	44
Tabel 4. 12 : Hasil percobaan kedua gamelan gangsa kantil pengisep	44

Tabel 4. 13 : Frekuensi dasar hasil sintesis bilah pertama hingga kelima pengumbang dan pengisep	44
Tabel 4. 14 : Hasil percobaan ketiga gamelan gangsa kantil pengumbang	45
Tabel 4. 15 : Hasil percobaan ketiga gamelan gangsa kantil pengisep	45
Tabel 4. 16 : Hasil pengujian kedua percobaan ketiga.....	46
Tabel 4. 17 : Perbandingan frekuensi bilah gamelan gangsa kantil pengumbang	51
Tabel 4. 18 : Perbandingan frekuensi bilah gamelan gangsa kantil pengisep.....	52
Tabel 4. 19 : Ratio (cent) frekuensi bilah terdekat.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 : Alur proses analisis hingga sintesis suara gamelan gangsa kantil menggunakan ModFM.....	6
Gambar 2 . 1 : Gamelan Gangsa	12
Gambar 2 . 2 : Penomoran Bilah Gangsa.....	12
Gambar 2 . 3 : Kiri : sinyal suara piano note E4, kanan : domain waktu dari sinyal suara piano note E4	14
Gambar 2 . 4 : Grafik Aliran FFT dengan 2 Penjumlahan.....	18
Gambar 2 . 5 : Grafik aliran FFT dengan N/4 titik transformasi	19
Gambar 2 . 6 : Perhitungan butterfly FFT.....	19
Gambar 2 . 7 : Perbandingan grafik gelombang periodik dan nonperiodik	20
Gambar 2 . 8 : a) sinyal analog dari suatu suara, b) sinyal envelope dari sinyal analog a, c) sinyal envelope setelah dikenakan filter.....	24
Gambar 2 . 9 : a) sinyal pembawa, b) sinyal pemodulasi, c) sinyal hasil sintesis FM.....	26
Gambar 2 . 10 : Grafik Fungsi Bessel untuk $n=0$ hingga $n=5$	27
Gambar 2 . 11 : a) komponen spektrum di domain frekuensi negatif ; b) refleksi frekuensi dari domain negatif dan ditambahkan pada domain positif ; c) grafik magnitude komponen b	29
Gambar 2 . 12 : Fungsi Bessel jenis pertama $J_n(x)$ untuk $n=0$ hingga $n=5$	32
Gambar 2 . 13 : Fungsi Bessel ternormalisasi $e^{-x}J_n(x)$ untuk $n=0$ hingga $n=5$	32
Gambar 3. 1 : Rancangan array frekuensi dasar gamelan gangsa kantil.....	34
Gambar 3. 2 : Rancangan tampilan awal aplikasi	35
Gambar 3. 3 : Rancangan tampilan menu aplikasi.....	35

Gambar 3. 4 : Rancangan tampilan untuk menambahkan suara gamelan baru	36
Gambar 4. 1 : Nilai dari array ratio	39
Gambar 4. 2 : Nilai dari array ff yang berisi frekuensi dasar suara bilah	40
Gambar 4. 3 : (a) Plot sinyal suara gangsa kantil pengumbang ke 3 bilah pertama, (b) sinyal envelope dari gambar (a)	41
Gambar 4. 4 : Cell array envelope yang menyimpan seluruh envelope data suara	42
Gambar 4. 5 : Tampilan Awal dan Menu.....	46
Gambar 4. 6 : Tampilan Awal Menambah Suara Baru.....	47
Gambar 4. 7 : Tampilan Menambah Suara Baru dengan Jumlah 10 Suara	47
Gambar 4. 8 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni pertama dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengumbang	48
Gambar 4. 9 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni kedua dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengumbang	49
Gambar 4. 10 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni pertama dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengisep	49
Gambar 4. 11 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni kedua dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengisep	50
Gambar 4. 12 : Domain frekuensi hasil sintesis suara bilah kedua pengumbang .	50
Gambar 4. 13 : Domain frekuensi suara rekaman gangsa ketiga bilah kedua	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

1. Frekuensi Harmoni Hasil Sintesis Suara Gangsa Pengumbang
2. Frekuensi Harmoni Hasil Sintesis Suara Gangsa Pengisep
3. Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni Pengumbang
4. Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni Pengisep
5. Perbandingan Grafik Domain Frekuensi Hasil Sintesis dengan Dataset Gamelan Gangsa Kantil Pengumbang
6. Perbandingan Grafik Domain Frekuensi Hasil Sintesis dengan Dataset Gamelan Gangsa Kantil Pengisep

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Musik bali dalam hal ini gamelan sangat digemari oleh orang seluruh dunia karena keunikan, dinamika, dan citra etnik yang sangat kuat. Salah satu gamelan di Bali adalah *gangsa*. Dalam upaya pelestarian gamelan *gangsa*, telah dilakukan upaya-upaya oleh pemerintah daerah seperti pelatihan di setiap desa dan mengadakan lomba-lomba. Meskipun hasrat untuk melestarikan dan mengembangkan gamelan *gangsa* tetap tinggi, akan tetapi untuk beberapa tahun mendatang akan menghadapi berbagai tantangan. Tantangan tersebut seperti berkurangnya minat memainkan gamelan *gangsa* akibat terpengaruh permainan musik budaya lain. Selain itu kurang efisiennya dari metode konvensional. Dari segi mobilitas, akan menyulitkan membawa *gangsa* karena bobot dan dimensi dari gamelan ini. Bayangkan saja jika ada anak kecil (berusia 5-10 tahun) yang ingin memainkan *gangsa* dan ingin mengubah posisi gamelan. Itu akan membutuhkan pertolongan dari orang dewasa untuk mengubah posisinya. Oleh karena itu, perlu dilibatkan teknologi untuk mendigitalisasi permainan gamelan ini sehingga untuk memainkannya lebih efisien dan membantu pelestarian gamelan *gangsa* itu sendiri.

Dalam bidang pengolahan suara, ada teknik yang dinamakan sintesis. Sintesis merupakan teknik yang digunakan untuk membangkitkan suara. Sintesis menggunakan algoritma tertentu untuk membangkitkan suara yang ingin ditiru atau membuat suara-suara yang unik. Seperti yang diketahui bahwa pada jaman teknologi saat ini, digitasi memberikan banyak pengaruh terhadap perkembangan seni, termasuk seni musik tradisional. Hingga saat ini telah ada usaha-usaha dari para peneliti untuk mencoba mengembangkan musik digital dengan melakukan sintesis suara. Pada penelitian sebelumnya, digunakan model *Analysis by Synthesis* dengan objek gamelan jawa (Aris Tjahyanto, 2011). Dengan menggunakan model tersebut belum mampu menghasilkan suara dentingan khas

logam. Eko Rendra Saputra dan kawan-kawan juga melakukan penelitian dengan judul Analisa dan Sintesa Bunyi Dawai Pada Gitar Semi-Akustik (Eko Rendra Saputra, 2006). Pada penelitian Eko Rendra menggunakan metode sintesis Aditif dengan hasil yang sudah cukup mendekati atau sama dengan suara yang dihasilkan oleh gitar. Penelitian lainnya melakukan sintesis terhadap suara kuningan, *woodwind*, dan suara perkusif menggunakan metode rata-rata *Frequency Modulation* (FM) (Chowning, 1973). Dari penelitian oleh Chowning didapatkan bahwa sintesis suara menggunakan FM lebih sederhana dibandingkan dengan menggunakan metode Aditif. Dengan parameter control yang sedikit metode FM mampu memberikan suara yang sama yang dihasilkan dari metode Aditif (Chowning, 1973). Namun ketika ingin melakukan sintesis suara instrument asli, hasil suara sintesis menggunakan metode FM memiliki kemiripan yang buruk.

Pada tahun 2010, Lazzarini dan Timoney mengemukakan metode pengembangan dari metode FM yaitu Modified Frequency Modulation yang disingkat ModFM (Lazzarini, 2010). ModFM memiliki kelebihan mengkonsumsi ruang penyimpanan sedikit, memiliki ketelitian suara yang sangat baik karena menggunakan matematika murni, dan sangat baik untuk suara yang memiliki banyak variasi (Burk, 2004). Selain itu metode ModFM mampu menghasilkan suara sintesis yang mendekati atau sama dengan suara asli dari suara instrument yang ditiru. Dengan memperhatikan kelebihan dari metode ModFM, maka dalam penelitian ini dilakukan penerapan metode ModFM untuk melakukan sintesis suara gamelan *gangsa*. Penelitian ini diharapkan mampu membantu pelestarian budaya khususnya gamelan *gangsa*.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang penelitian, dapat dirumuskan permasalahan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Bagaimana melakukan sintesis suara gamelan *gangsa* menggunakan metode ModFM?

- b. Bagaimana kemiripan suara dari suara rekaman asli gamelan *gangsa* dengan hasil sintesis dengan menggunakan metode ModFM?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

- a. Dataset (rekaman suara gamelan *gangsa*) yang digunakan berada dalam format .wav.
- b. Gamelan *gangsa* yang suaranya direkam merupakan gamelan *gangsa* dengan jenis *gangsa* kantil dari desa Tihingan, Kabupaten Klungkung. Desa ini merupakan desa tempat membuat gamelan *gangsa*.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Untuk membangun aplikasi gamelan *gangsa* dengan menggunakan salah satu teknik sintesis suara yaitu metode ModFM.
- b. Untuk mengetahui kemiripan suara dari suara rekaman gamelan *gangsa* dengan hasil sintesis dengan menggunakan metode ModFM.

1.5. Manfaat Penelitian

Dengan penerapan metode sintesis ModFM diharapkan dapat menambah wawasan mengenai sintesis suara dan pemanfaatan media teknologi khususnya digital dalam melestarikan budaya, dalam penelitian ini budaya musik *gangsa* di Bali. Penelitian ini juga memberikan manfaat bagi peneliti lainnya untuk menemukan ide-ide baru. Khusus bagi penulis, penelitian ini memberikan jawaban akan pertanyaan-pertanyaan dan keingintahuan terhadap permasalahan yang penulis teliti.

1.6. Metodologi Penelitian

Sub bab Metodologi Penelitian ini menjelaskan langkah-langkah yang akan dilalui untuk melakukan sintesis suara gamelan *gangsa* menggunakan metode Modified Frequency Modulation (ModFM). Adapun sub bahasan yang akan dijelaskan adalah data penelitian yang berisi penjelasan mengenai pengumpulan data dan pengolahan data awal, desain penelitian, metode yang digunakan, uji coba dan evaluasi, dan jadwal pelaksanaan penelitian.

1.6.1. Data Penelitian

1.6.1.1. Pengumpulan Data

Data penelitian ada dua jenis (Hasibuan, 2007) yaitu data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang diambil langsung dari obyek penelitian. Sedangkan data sekunder merupakan data yang tidak didapatkan secara langsung dari obyek penelitian, melainkan data yang berasal dari sumber yang telah dikumpulkan oleh pihak lain. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer yang berwujud rekaman dari suara gamelan *gangsa kantil*. Suara gamelan *gangsa kantil* direkam menggunakan telepon genggam dengan *brand* Blackberry Curve 9220. Data yang digunakan diambil ditempat pembuatan gamelan *gangsa kantil* secara langsung yang bertempat di desa Tihingan, kabupaten Klungkung. Jumlah suara gamelan *gangsa kantil* yang akan direkam berjumlah 12 buah gamelan (enam suara *gangsa kantil* pengumbang dan enam suara *gangsa kantil* pengisep) dengan satu gamelan *gangsa kantil* memiliki 10 rekaman suara mengikuti jumlah bilah *gangsa*. Dua belas rekaman gamelan *gangsa kantil* ini digunakan untuk mengetahui rentang frekuensi dari suara setiap bilah mengingat pembuatan gamelan masih menggunakan cara tradisional.

1.6.1.2. Pengolahan Data Awal

Hasil rekaman yang didapatkan masih berupa format .amr. Format ini jarang digunakan dan masih awam pada bahasa pemrograman. Untuk itu perlu diubah format tersebut kedalam format wav. Format ini dipilih dengan alasan mampu dibaca oleh bahasa pemrograman manapun dan tidak mengurangi kualitas suara dari format sebelumnya.

1.6.2. Desain Penelitian

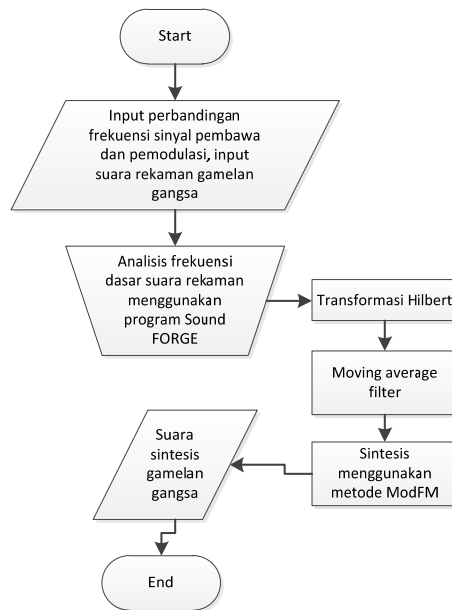
Judul dari penelitian ini adalah Sintesis Suara Gamelan *Gangsa* dengan Menggunakan Metode *Modified Frequency Modulation* (ModFM). Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental. Variabel independen dari penelitian ini adalah perbandingan frekuensi sinyal *carrier* dengan sinyal pemodulasi. Sebelum dilakukan sintesis dilakukan identifikasi format dari dataset apakah sudah sesuai dengan format yang diijinkan oleh system yaitu format wav. Kemudian dilakukan

analisis data. Dari analisis data dihasilkan frekuensi dasar dan bungkus sinyal. Kemudian hasil tersebut digunakan untuk melakukan sintesis suara menggunakan metode ModFM. Sintesis akan dilakukan beberapa kali dengan perbandingan frekuensi pembawa dan pemodulasi yang berbeda dan akan dipilih suara terbaik. Setelah didapatkan hasil sintesis terbaik, komponen penyusun suara tersebut mulai dari frekuensi dasar, sinyal envelope, dan perbandingan frekuensi pembawa dan pemodulasi dibungkus menjadi satu aplikasi. Aplikasi ini dapat digunakan untuk memainkan gamelan gangsa kantil. Selain itu akan diisi fitur tambahan, yaitu fitur penambahan suara gamelan lainnya.

1.6.3. Metode yang digunakan

Dalam penelitian yang akan dilakukan, perlu dilakukan proses analisis terhadap data sebelum sintesis suara gamelan *gangsa kantil* dilakukan. Proses analisis tersebut akan menghasilkan sinyal *envelope* dan frekuensi dasar. Kedua hasil analisis inilah yang digunakan sebagai masukan pada metode sintesis ModFM. Untuk lebih jelasnya dapat melihat pada *flowchart* 3.5.

Pada tahap analisis digunakan metode *windowing* dan FFT untuk mencari frekuensi dasar dari rekaman suara gamelan *gangsa kantil*. FFT dan *windowing* dilakukan dengan menggunakan program Sound Forge Pro 10.0. Proses ini akan dikenakan kepada seluruh data set untuk menghasilkan rentang frekuensi dari suara gamelan *gangsa kantil* tiap bilahnya. Kemudian dicari rata-rata dari frekuensi dasar dari masing-masing bilah yang akan digunakan dalam proses sintesis. Selanjutnya dilakukan proses pemilihan suara dataset yang akan dicari bungkus sinyalnya dengan menggunakan transformasi Hilbert pada sinyal suara asli dan dilakukan filtering. Filter yang digunakan adalah filter rerata bergerak (*moving average*). Kemudian hasil dari analisis yaitu frekuensi dasar rata-rata dan sinyal *envelope* ditambah dengan perbandingan frekuensi dasar dan pemodulasi dijadikan masukan pada proses sintesis menggunakan metode ModFM.



Gambar 1. 1 : Alur proses analisis hingga sintesis suara gamelan gangsa kantil menggunakan ModFM

1.6.4. Uji Coba dan Evaluasi

Pada tahapan ini akan dicari suara hasil sintesis yang sama atau mendekati suara gangsa kantil asli. Untuk mendapatkan hasil tersebut akan dilakukan 3 kali percobaan sintesis suara gamelan *gangsa kantil* dengan perbandingan frekuensi sinyal pembawa (f_c) dan frekuensi sinyal pemodulasi (f_m) seperti yang diperlihatkan pada tabel 3.1. Rasio tersebut dipilih berdasarkan bentuk normal yang telah dijelaskan pada sub bab 2.10 dengan mengambil rentang nilai dari 1 hingga 9.

Percobaan pertama akan menggunakan satu suara dari gamelan *gangsa kantil*. Akan dipilih bilah pertama untuk dilakukan sintesis sebanyak perbandingan yang akan digunakan pada tabel 1.1. Setelah proses sintesis suara gamelan *gangsa kantil* berdasarkan perbandingan frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi selesai maka akan dilakukan pengujian kemiripan suara. Skenario pengujian pertama dilakukan analisis domain frekuensi hasil sintesis yang dibandingkan dengan domain frekuensi suara dataset (gamelan asli). Untuk mengetahui kemiripan suara hasil sintesis dengan suara rekaman dapat dilihat dari frekuensi harmoni. Beberapa frekuensi harmoni yang paling menonjol dari setiap

hasil sintesis akan dipetakan dalam bentuk tabel seperti pada tabel 1.2. Jumlah frekuensi harmoni yang digunakan adalah 2. Jumlah ini dipilih karena sesuai dengan jumlah frekuensi harmoni dari suara rekaman dalam domain frekuensi.

Hasil tersebut akan dicari selisih antara frekuensi harmoni suara hasil sintesis dengan frekuensi harmoni dari suara dataset yang ditiru. Selisih tersebut akan dipetakan pada tabel seperti pada tabel 1.3. Kemudian selisih dari frekuensi harmoni tiap bilah akan dijumlahkan dan dihitung rata-ratanya.

Tabel 1. 1:Perbandingan frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi

Sinyal <i>Carrier</i>	Sinyal Pemodulasi
1	1
1	2
1	3
1	4
1	5
1	6
1	7
1	8
1	9
2	5
2	7
2	9
3	7
3	8
4	9

Tabel 1. 2 : Tabel pemetaan frekuensi harmoni hasil sintesis

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni	
	fc	fm	1	2

Tabel 1. 3 : Tabel pemetaan selisih nilai frekuensi harmoni

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisih Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		

Hasil sintesis yang memiliki rata-rata selisih nilai frekuensi harmoni terkecil akan dibandingkan frekuensi dasarnya dengan frekuensi dasar bilah *gangsaka kanti* yang ditiru. Jika masuk kedalam rentang frekuensi yang ditoleransi, maka akan dipilih komponen penyusunnya (perbandingan frekuensi) untuk digunakan proses sintesis suara bilah lainnya. Setelah proses sintesis seluruh bilah dilakukan, akan dilakukan pengujian kedua. Skenario pengujian kedua adalah dengan melihat nilai frekuensi dasar hasil sintesis berada pada rentang frekuensi yang diijinkan atau tidak.

Percobaan kedua dilakukan dengan menggunakan lima suara dari 5 bilah suara gamelan *gangsaka*. Kemudian suara hasil sintesis dilakukan pengujian seperti pada percobaan pertama. Hasil pengujian juga dipetakan menggunakan tabel 1.2 dan tabel 1.3. Kemudian dipilih perbandingan frekuensi terbaik dari masing-masing bilah dengan melihat rata-rata selisih nilai frekuensi harmoni terkecil. Perbandingan tiap bilah ini akan digunakan untuk melakukan sintesis suara dimana proses sintesis suara bilah pertama dan keenam menggunakan

perbandingan frekuensi bilah pertama, proses sintesis suara bilah kedua dan ketujuh menggunakan perbandingan frekuensi bilah kedua, proses sintesis suara bilah ketiga dan kedelapan menggunakan perbandingan frekuensi bilah ketiga, proses sintesis suara bilah keempat dan kesembilan menggunakan perbandingan frekuensi bilah keempat, dan proses sintesis suara bilah kelima dan kesepuluh menggunakan perbandingan frekuensi bilah kelima. Kemudian hasil sintesis tersebut akan diuji kembali dengan menggunakan skenario pengujian kedua.

Percobaan ketiga dilakukan dengan menggunakan 10 suara bilah. Masing-masing bilah akan disintesis menggunakan perbandingan frekuensi pembawa dan pemodulasi pada tabel 1.1. Hasil sintesis tersebut akan dianalisis dan dipetakan hasilnya seperti pada tabel 1.2 dan tabel 1.3. Kemudian akan dipilih perbandingan f_c dan f_m terbaik yang memiliki rata-rata selisih frekuensi harmoni terendah. Hasil perbandingan yang didapatkan berjumlah 10 buah dan akan digunakan untuk melakukan proses sintesis seluruh bilah. Setelah itu akan diuji menggunakan skenario pengujian kedua seperti skenario pengujian kedua pada percobaan pertama.

1.6.5. Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian dilakukan di Desa Tihingan, Kabupaten Klungkung, Provinsi Bali. Penelitian akan dilaksanakan selama 8 minggu. Tabel 8.1 merupakan rincian kegiatan pelaksanaan penelitian ini.

Tabel 1. 4 : Waktu Pelaksanaan Penelitian

Kegiatan	Minggu							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Pengumpulan Data								
Analisis Data								
Desain dan Implementasi								
Analisis Hasil Implementasi								
Pembuatan Laporan Akhir								

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Untuk menunjang pelaksanaan penelitian ini dilakukan tinjauan pustaka mengenai tinjauan studi yang berisi penelitian-penelitian terkait dengan sintesis suara, gamelan gangsa, domain waktu dan frekuensi dalam pengolahan sinyal, frekuensi dasar dan frekuensi harmoni, Fast Fourier Transform (FFT), FFT Window, Sound Forge, Moving Average Filter, transformasi Hilbert, Frequency Modulation, dan Modified Frequency Modulation (ModFM).

2.1. Tinjauan Studi

Sintesis suara merupakan salah satu bidang dalam pengolahan sinyal. Sintesis suara mulai dilakukan penelitian terkait dengan pelestarian budaya. Salah satu penelitian itu dilakukan oleh Aris Tjahyanto dengan menggunakan model *Analysis By Synthesis* (Aris Tjahyanto, 2011). Objek yang diambil adalah gamelan Jawa. Alur dari model yang digunakan adalah merekam suara gamelan dengan rate sebesar 44.100 per detik. Selanjutnya dilakukan identifikasi frekuensi harmonisa dan ekstraksi *envelope*. Kemudian dilakukan sintesis menggunakan metode sintesis Aditif. Langkah terakhir adalah membandingkan suara gamelan yang dihasilkan dari penabuh dengan suara hasil sintesis. Untuk mendapatkan sinyal *envelope* pada penelitian Aris Tjahyanto digunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) dan Infinite Fast Fourier Transform (IFFT). Disebutkan juga metode pendeteksian sinyal *envelope* yaitu transformasi Hilbert dan *low pass filter*. Hasil dari penelitian Aris Tjahyanto adalah belum mampu menirukan suara dentingan khas logam yang dipukul. Untuk penelitian selanjutnya, Aris Tjahyanto mengatakan bahwa metode sintesis FM dapat dicoba untuk melakukan sintesis yang telah dipakai oleh *synthesizer* Yamaha DX7.

Peneliti lainnya, Eko Rendra Saputra dan kawan-kawan, juga melakukan penelitian yang pada bidang sintesis suara. Dengan judul penelitian Analisa dan

Sintesa Bunyi Dawai Pada Gitar Semi-Akustik (Eko Rendra Saputra, 2006), Eko Rendra dan kawan-kawan mensintesis suara dawai gitar dengan menggunakan metode sintesis Aditif. Pada penelitiannya, proses analisa data digunakan program Sound Forge, Origin, dan Matlab dengan menggunakan analisa FFT. Sedangkan proses sintesis suara dilakukan dengan program Matlab. Hasil dari penelitian Eko Rendra bahwa suara hasil sintesis sudah cukup mendekati dengan suara yang ditiru. Dari penelitian tersebut juga didapatkan bahwa warna suara ditentukan oleh rasio amplitudo.

Selain kedua penelitian yang telah disebutkan, ada penelitian yang melakukan sintesis menggunakan metode FM yaitu John M. Chowning dengan judul penelitian *The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation*. Penelitian Chowning mencoba melakukan sintesis suara kuningan, *woodwind*, dan suara perkusif. Dengan menggunakan metode FM, Chowning mengatakan bahwa FM dapat menghasilkan spectrum yang kompleks dengan sederhana (Chowning, 1973). Namun ada kelemahan dari metode FM ini yaitu ketika digunakan untuk memodelkan suara instrument asli (Lazzarini, 2010). Kemiripan suara yang dihasilkan tidak mirip dengan suara instrument aslinya. Dalam penelitian Lazzarini dan Timoney diusulkan metode baru perbaikan dari metode FM yaitu ModFM. Metode ini melakukan normalisasi pada fungsi Bessel yang digunakan pada metode FM. Dengan melakukan perubahan tersebut mampu menghilangkan fitur yang tidak diinginkan pada fungsi Bessel.

2.2. Gamelan Gangsa

Gamelan gangsa merupakan salah satu instrument dalam suatu ensemble atau barungan gambelan yang daun bilahannya terbuat dari perunggu (Yudha Triguna, 1993). Contoh gamelan gangsa diperlihatkan pada gambar 2.1. Banyak jenis barungan gamelan Bali yang mempergunakan gangsa, seperti samara pagulingan, angklung, gong kebyar, gong gede, dan gambang. Jumlah daun gamelan berbeda-beda. Gangsa berbeda dari gender yang merupakan alat musik tradisional di daerah Jawa. Suara dari bilah gangsa lebih keras dan mampu membuat lebih banyak harmoni.

Pada gong kebyar, gangsa yang digunakan adalah pangugal, pamade, dan kantil. Gangsa kantil memiliki 10 daun bilah. Gangsa kantil ada dua jenis yaitu gangsa kantil pengumbang dan pengisep. Gangsa kantil pengumbang memiliki nada yang lebih nyaring, lebih lantang, dan nadanya lebih rendah dari gangsa pengisep. Sedangkan gangsa kantil pengisep memiliki nada yang lebih pendek dan nadanya lebih tinggi dari gangsa pengumbang.



Gambar 2 . 1 : Gamelan Gangsa



Gambar 2 . 2 : Penomoran Bilah Gangsa

Gambar 2.2 menunjukkan penomoran dari bilah *gangsa*. Bilah terpanjang berada paling kiri dan merupakan bilah pertama dengan nomor 1. Semakin kekanan panjang bilah akan berkurang dan diikuti kenaikan nada suara.

2.3. Domain Waktu dan Frekuensi

Domain waktu dan domain frekuensi adalah dua mode yang digunakan untuk melakukan analisis data. Kedua mode analisis ini digunakan secara luas pada berbagai bidang seperti elektronik, akustik, telekomunikasi, dan lain-lain. Analisis domain frekuensi digunakan pada kondisi dimana prosesnya membutuhkan *filtering*, *amplifying*, dan *mixing*. Analisis domain frekuensi juga sangat berguna untuk membuat pola gelombang yang diinginkan seperti pola bit biner dari computer. Sedangkan analisis domain waktu memberikan kebiasaan dari sinyal terhadap waktu. Ini memungkinkan untuk melakukan prediksi dan model regresi terhadap sinyal. Selain itu analisis domain waktu juga digunakan untuk memahami yang dikirim seperti pola bit terhadap waktu.

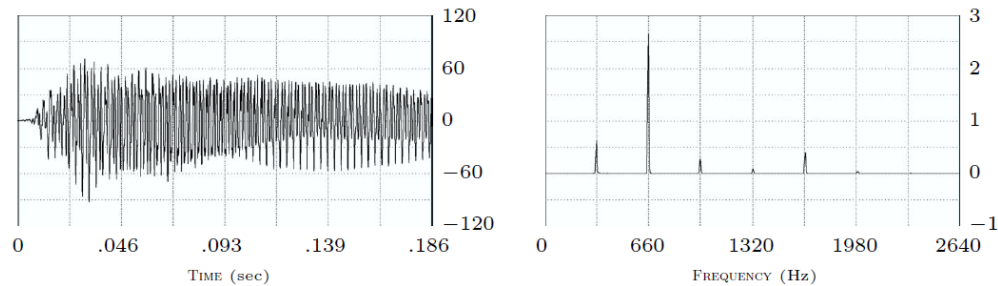
Analisis domain waktu adalah menganalisis data terhadap periode waktu tertentu. Fungsi seperti sinyal elektronik, kebiasaan pasar, dan system biologi adalah beberapa dari fungsi yang dianalisis menggunakan analisis domain waktu. Domain frekuensi juga digunakan untuk menganalisis data. Namun analisis yang dilakukan untuk menganalisis fungsi matematika atau sinyal mengenai frekuensi. Analisis domain frekuensi lebih banyak digunakan terhadap sinyal atau fungsi yang bersifat periodic terhadap waktu. Ini bukan berarti bahwa analisis domain frekuensi tidak dapat digunakan pada sinyal yang tidak periodic.

Konsep terpenting dari analisis domain frekuensi adalah transformasi. Transformasi digunakan untuk mengubah fungsi domain waktu ke dalam fungsi domain frekuensi dan sebaliknya. Transformasi yang paling sering digunakan adalah transformasi Fourier. Transformasi Fourier digunakan untuk mengubah sinyal dari berbagai bentuk kedalam sejumlah gelombang sinusoidal tak terbatas. Ini mengingatkan analisis fungsi sinusoidal lebih mudah dari pada menganalisis bentuk fungsi secara umum (domain waktu).

2.4. Frekuensi Dasar dan Frekuensi Harmoni

Perlu diketahui bahwa sinyal yang sebenarnya tidak berupa gelombang sinus. Sinyal asli memiliki berbagai frekuensi, amplitudo yang berbeda, dan gangguan. Frekuensi yang ada dimiliki suatu sinyal ada dua, yaitu frekuensi dasar

dan frekuensi harmoni. Frekuensi dasar merupakan frekuensi terendah dari suatu gelombang sinyal periodik. Sedangkan frekuensi harmoni adalah komponen frekuensi dari sinyal yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar (Jeremy F., 2002). Sebagai contoh dari frekuensi dasar dan frekuensi harmoni dari suatu sinyal diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 : Kiri : sinyal suara piano note E4, kanan : domain waktu dari sinyal suara piano note E4

Dari gambar 2.3 sebelah kanan terdapat puncak pada frekuensi 330 Hz, 660 Hz, 990 Hz, 1320 Hz, dan 1620 Hz. Dapat dilihat bahwa nilai-nilai tersebut merupakan kelipatan dari puncak frekuensi pertama, yaitu 330 Hz. Frekuensi 330 Hz dinamakan frekuensi dasar dan sekaligus sebagai harmoni pertama. Untuk frekuensi 660 Hz merupakan harmoni kedua dan merupakan *overtone* pertama dari frekuensi dasar. *Overtone* merupakan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi dasar dan memiliki nilai kelipatan frekuensi dasar.

2.5. Cent

Cent adalah unit logaritmik ukuran yang digunakan untuk interval musik. Teknik pengukuran ini dikemukakan oleh Alexander J. Ellis (Ellis, 1885). Seperti relasi desibel untuk intensitas, sen adalah rasio antara dua frekuensi dekat. Untuk rasio tetap konstan selama spektrum frekuensi, rentang frekuensi yang dicakup oleh satu sen harus sebanding dengan dua frekuensi. Jika diketahui frekuensi a dan b dari dua nada, nilai cent (n) untuk mengukur dari a hingga b dapat dihitung dengan menggunakan formula 2.1.

$$n = 1200 \cdot \log_2 \left(\frac{b}{a} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Demikian juga, jika diketahui catatan dan jumlah n cent dalam interval dari a ke b, maka b dapat dihitung dengan cara:

$$b = a \times 2^{n/1200} \dots\dots\dots(2.2)$$

)

2.6. Fast Fourier Transform (FFT)

Banyaknya waktu untuk mengevaluasi sebuah DFT (*Discrete Fourier Transform*) dalam komputer digital bergantung pada jumlah perhitungan, mengingat ini merupakan operasi terlambat. Dengan DFT, jumlah ini secara langsung berhubungan dengan N^2 (perkalian matrik dari vector), dimana N adalah panjang dari transformasi.

Algoritma komputer yang lebih efisien untuk estimasi DFT telah dikembangkan sejak pertengahan tahun 1960. Algoritma itu dinamakan Fast Fourier Transform (FFT) dan algoritma ini menyatakan bahwa DFT standar terdiri dari banyak perhitungan yang tidak perlu (redundan) :

$$F[n] = \sum_{k=0}^{N-1} f[k] e^{j \frac{2\pi}{N} nk} = \sum_{k=0}^{N-1} f[k] W_N^{nk} \dots\dots\dots(2.3)$$

Ini mudah untuk merealisasikan bahwa nilai yang sama dari W_N^{nk} dihitung berulang kali selama proses komputasi. Pertama, produk integer nk berulang untuk kombinasi yang berbeda dari k dan n ; kemudian, W_N^{nk} merupakan fungsi periodic dengan hanya nilai N yang berbeda. Sebagai contoh, dimisalkan $N = 8$ (FFT paling sederhana sejauh ini jika N adalah kekuatan integral dari 2)

$$W_8^1 = e^{-j \frac{2\pi}{8}} = e^{-j \frac{\pi}{4}} = \frac{1-j}{\sqrt{2}} = a \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\text{Maka } a^2 = -j \quad a^3 = -j/a = -a^5 \quad a^4 = -1$$

$$a^5 = -a \quad a^6 = j \quad a^7 = j/a = a^3 \quad a^8 = 1$$

Dari perhitungan diatas dapat dilihat menjadi sebagai berikut.

$$W_8^4 = -W_8^0$$

$$W_8^3 = -W_8^1$$

$$W_8^6 = -W_8^2$$

$$W_8^5 = -W_8^7$$

Selain itu, jika nk bernilai diluar dari 0 hingga 7, masih didapatkan salah satu dari nilai diatas. Contohnya:

Jika $n = 5$ dan $k = 7$, maka:

$$W_8^{35} = \alpha^{35} = (\alpha^8)^4 \cdot \alpha^3 = \alpha^3 \quad \#$$

Dalam teknik FFT terdapat dua algoritma yaitu algoritma FFT DIT (Decimation in Time/desimasi di bidang waktu) dan algoritma FFT DIF (Decimation in Frequency/desimasi di bidang frekuensi). Untuk mengolah suara digunakan FFT DIT karena suara inputan hasil rekaman berada pada domain waktu, bukan berada pada domain frekuensi.

Desimasi di bidang waktu dilakukan dengan cara memisahkan penjumlahan tunggal terhadap N menjadi dua penjumlahan.

Mari dimulai dengan memisahkan penjumlahan tunggal atas sampel N menjadi 2 penjumlahan, $\frac{N}{2}$, dimana satu untuk k dengan nilai genap dan satu untuk

k dengan nilai ganjil. Kemudian substitusi $m = \frac{k}{2}$ untuk k genap dan $m = \frac{k-1}{2}$

untuk k ganjil, maka persamaannya dapat ditulis menjadi persamaan 2.5.

$$F[n] = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} f[2m] W_N^{2mn} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} f[2m+1] W_N^{(2m+1)n} \dots\dots\dots (2.5)$$

Ingat bahwa :

$$W_N^{2mn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}(2mn)} = e^{-j\frac{2\pi}{N}mn} = W_N^{mn} \dots\dots\dots (2.6)$$

Maka :

$$F[n] = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} f[2m] W_N^{mn} + W_N^m \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} f[2m+1] W_N^{mn}$$

$$F[n] = G[n] + W_N^m H[n] \dots\dots\dots (2.7)$$

Jadi N-point DFT $F[n]$ dapat diperoleh dari dua $\frac{N}{2}$ transformasi titik, satu untuk input data genap, $G[n]$, dan satu untuk input data ganjil, $H[n]$. Meskipun indeks frekuensi n memiliki rentang sebanyak nilai N , hanya $\frac{N}{2}$ nilai dari $G[n]$ dan $H[n]$ dibutuhkan untuk menghitung karena $G[n]$ dan $H[n]$ periodic pada n dengan periode $\frac{N}{2}$.

Sebagai contoh, untuk $N = 8$;

- Input data genap : $f[0] f[2] f[4] f[6]$
- Input data ganjil : $f[1] f[3] f[5] f[7]$

$$F[0] = G[0] + W_8^0 H[0]$$

$$F[1] = G[1] + W_8^1 H[1]$$

$$F[2] = G[2] + W_8^2 H[2]$$

$$F[3] = G[3] + W_8^3 H[3]$$

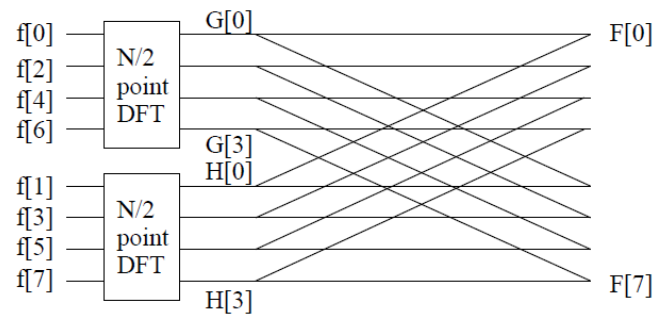
$$F[4] = G[0] + W_8^4 H[0] = G[0] - W_8^0 H[0]$$

$$F[5] = G[1] + W_8^3 H[1] = G[1] - W_8^1 H[1]$$

$$F[6] = G[2] + W_8^6 H[2] = G[2] - W_8^2 H[2]$$

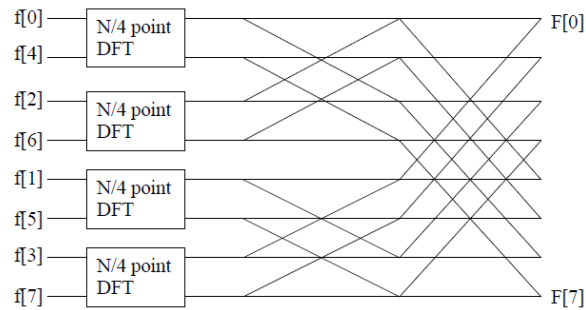
$$F[7] = G[3] + W_8^5 H[3] = G[3] - W_8^3 H[3]$$

Hal ini ditunjukkan dengan grafik pada grafik aliran pada gambar 2.4.



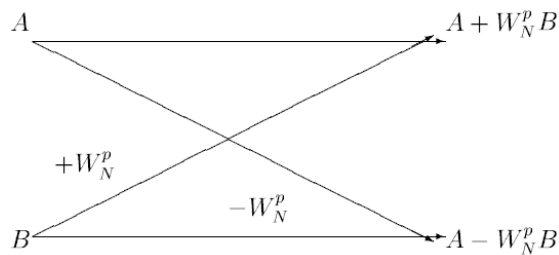
Gambar 2 . 4 : Grafik Aliran FFT dengan 2 Penjumlahan

Asumsikan bahwa N habis dibagi 2, dapat di ulang proses diatas menjadi $\frac{N}{2}$ titik transformasi, mengubahnya menjadi $\frac{N}{4}$ titik transformasi dan seterusnya hingga di dapatkan 2 titik transformasi. Untuk $N = 8$, hanya satu tahapan dibutuhkan jika menggunakan $\frac{N}{4}$ titik transformasi seperti yang diperlihatkan gambar 2.5.



Gambar 2 . 5 : Grafik aliran FFT dengan N/4 titik transformasi

Dasar perhitungan dari FFT diketahui dengan *butterfly* karena penampilan perkalian silang. Untuk algoritma FFT DIT, perhitungan butterfly diperlihatkan pada gambar 2.6.



Gambar 2 . 6 : Perhitungan butterfly FFT

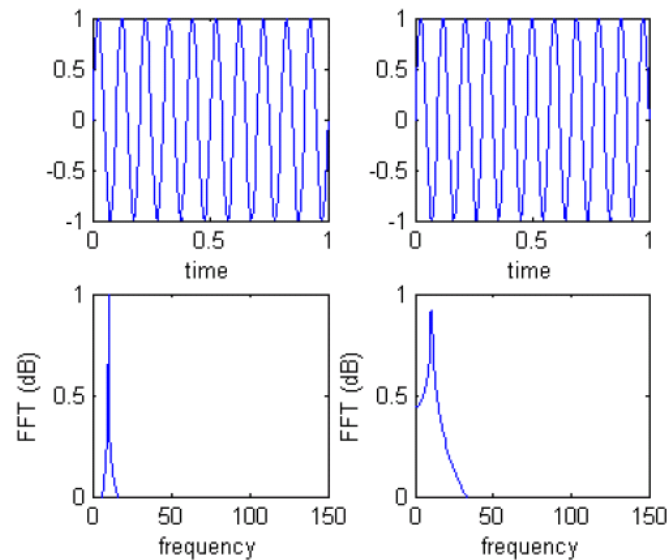
Dimana A dan B adalah angka kompleks. Perhitungan butterfly ini membutuhkan satu perkalian kompleks dan dua penambahan kompleks.

2.7. FFT Window

Perhitungan FFT berasumsi bahwa sebuah sinyal bersifat periodic di setiap blok data yang terus berulang dan identic disetiap waktu. Ketika FFT dari sinyal yang tidak periodic dihitung maka hasil dari spectrum frekuensi terjadi kebocoran (ANO14, 2008). Hasil kebocoran pada energy sinyal menodai sepanjang rentang frekuensi yang lebar pada FFT ketika itu seharusnya terjadi pada rentang frekuensi yang terbatas. Gambar 2.7 mengilustrasikan akibat dari adanya kebocoran.

Grafik paling atas sebelah kiri dari gambar 2.7 memperlihatkan sebuah gelombang sinus 10 Hz dengan amplitude 1 yang periodik pada bingkai waktu. Hasil dari FFT gelombang tersebut (kiri bawah) memperlihatkan satu puncak

sempit pada 10 Hz di sumbu frekuensi dengan tinggi 1 seperti yang diperkirakan. Sedangkan gambar atas sebelah kanan merupakan gelombang sinus yang tidak periodic dan menghasilkan kebocoran di FFT (kanan bawah). Amplitudo yang dihasilkan kurang dari 1 dan sinyal lebih melebar. Dengan melebarnya tersebut menjadi lebih sulit untuk mengidentifikasi konten frekuensi dari sinyal yang diberikan. Untuk mengatasi kebocoran ini, maka digunakan teknik *window*.



Gambar 2 . 7 : Perbandingan grafik gelombang periodik dan nonperiodik

Ketika kebanyakan sinyal tidak periodik pada pendefinisian ulang blok data pada periode waktu, sebuah *window* dapat digunakan untuk menangani kebocoran. Sebuah *window* dibentuk sehingga memiliki nilai nol pada awal dan akhir dari blok data dan memiliki beberapa bentuk khusus di antara keduanya. Fungsi ini kemudian dikalikan dengan data blok waktu yang memaksa sinyal menjadi periodik. Faktor bobot khusus juga harus diterapkan sehingga tingkat amplitudo sinyal FFT yang sebenarnya sama setelah dilakukan *windowing*. Fungsi window ada 9, yaitu Barlett, Blackman, Flat Top, Hanning, Hamming, Kaiser-Bessel, None (boxcar), Tukey, dan Welch. Tabel 2.1 menampilkan perbandingan fungsi window (ANO14, 2008).

Dari tabel 2.1 didapatkan bahwa fungsi *window* Blackman merupakan yang terbaik dalam menangani kebocoran dilihat dari penilaian pada kebocoran spectrum. Persamaan Blackman *window* adalah :

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan nilai $a_0 = 0,42$, $a_1 = 0,49$, dan $a_2 = 0,077$

Tabel 2 . 1 : Perbandingan fungsi window

Window	Terbaik untuk Tipe Sinyal	Resolusi Frekuensi	Mengatasi Kebocoran Spektrum	Akurasi Amplitudo
Barlett	Random	Bagus	Sedang	Sedang
Blackman	Random or mixed	Buruk	Terbaik	Bagus
Flat top	Sinusoids	Buruk	Bagus	Terbaik
Hanning	Random	Bagus	Bagus	Sedang
Hamming	Random	Bagus	Sedang	Sedang
Kaiser-Bessel	Random	Sedang	Bagus	Bagus
None (boxcar)	Transient & Synchronous Sampling	Terbaik	Buruk	Buruk
Tukey	Random	Bagus	Buruk	Buruk
Welch	Random	Bagus	Bagus	Sedang

2.8. Sound Forge

Sound Forge merupakan salah satu produk perangkat lunak unggulan Steinberg Corp. Produk ini digunakan untuk melakukan pengolahan suara seperti merekam suara, memotong suara, mastering hasil rekaman, mengkonversi format suara, melakukan analisis terhadap suatu suara, dan lain-lain. Untuk melakukan

analisis suara, program Sound Forge menyediakan fitur untuk mengubah suara dari domain waktu ke domain frekuensi. Dalam proses tersebut digunakan metode windowing dan FFT.

2.9. Moving Average Filter

Moving average atau rerata bergerak merupakan filter yang paling umum pada pengolahan sinyal digital karena kemudahan filter digital ini untuk dipahami dan digunakan. Disamping itu, filter rerata bergerak optimal untuk perintah umum seperti mengurangi gangguan acak ketika mempertahankan respon langkah yang jelas. Ini membuat filter rerata bergerak menjadi filter utama untuk mengkodekan sinyal domain waktu. Namun, filter rerata bergerak merupakan filter terburuk untuk mengkodekan sinyal di domain frekuensi, dengan sedikit kemampuan untuk memisahkan satu jalur frekuensi dengan frekuensi lainnya.

Filter rerata bergerak bekerja dengan menghitung rata-rata sejumlah titik dari sinyal masukan untuk menghasilkan titik lainnya di sinyal keluaran. Dalam bentuk persamaan dapat ditulis seperti persamaan 2.9 :

$$y[t] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[t+j] \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan persamaan 2.9 :

- $x[]$ merupakan sinyal masukan
- $y[]$ merupakan sinyal keluaran
- M merupakan jumlah titik yang digunakan di rerata bergerak

Sebagai contoh, pada 5 titik filter rerata bergerak, titik ke 80 di sinyal keluaran diberikan:

$$y[80] = \frac{x[80] + x[81] + x[82] + x[83] + x[84]}{5}$$

Alternatif lainnya, sekelompok titik dari sinyal masukan dapat dipilih secara simetris sepanjang titik keluaran:

$$y[80] = \frac{x[78] + x[79] + x[80] + x[81] + x[82]}{5}$$

Kesesuaian berubah pada persamaan diatas dari $j=0$ hingga $M-1$ menjadi $j=-(M-1)/2$ hingga $(M-1)/2$. Sebagai contoh, pada 11 titik filter rerata bergerak, indeks j dapat berjalan dari 0 hingga 11 (satu sisi rata-rata) atau -5 hingga 5 (rata-rata simetris). Rata-rata simetris membutuhkan nilai M yang ganjil. Pemrograman sedikit lebih mudah dengan titik dalam satu sisi, namun itu akan menghasilkan perpindahan relatif diantara sinyal masukan dan keluaran.

Perlu diingat bahwa filter rerata bergerak merupakan sebuah konvolusi menggunakan kernel filter yang sangat sederhana. Sebagai contoh, 5 titik filter memiliki kernel filter : ...0, 0, 1/5, 1/5, 1/5, 0, 0...

2.10. Transformasi Hilbert

Transformasi Hilbert merupakan teknik yang kuat (Ronald L. Allen, 2004) yang dapat digunakan untuk:

- Mencari bungkus (*envelope*) dari sebuah sinyal.
- Mencari fase sesaat dari sebuah sinyal.
- Mencari frekuensi sesaat dari sebuah sinyal.
- Menyembunyikan salah satu *sideband* untuk membuat modulasi *sideband* tunggal (SSB) sebuah sinyal.

Transformasi Hilbert memiliki banyak teori dan sifat yang menarik.

2.8.1. Definisi dan Properti

Transformasi Hilbert ada dua, yaitu transformasi analog dan diskrit. Transformasi analog Hilbert dari suatu sinyal $x(t)$ didefinisikan dengan persamaan 2.10.

$$x_H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(s)}{t-s} ds = (Hx)(t) \dots \dots \dots (2.10)$$

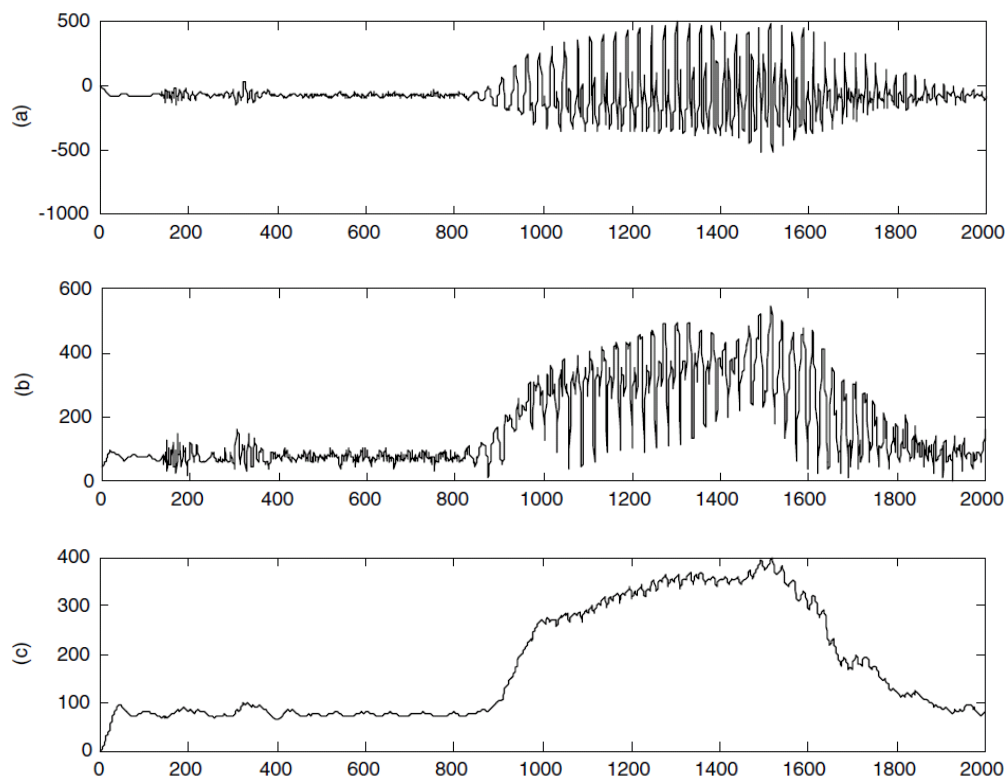
Cara lain untuk menuliskan definisi tersebut adalah mengingat transformasi Hilbert juga merupakan konvolusi dari fungsi $1/\pi t$ dari sinyal $x(t)$. Maka dapat ditulis persamaan 2.10 menjadi persamaan 2.11.

$$x_H(t) = \frac{1}{\pi t} * x(t) \dots \dots \dots (2.11)$$

2.8.2. Sinyal Analitik

Sinyal analitik merupakan sinyal yang tidak memiliki komponen frekuensi negative. Untuk mendapatkan sinyal analitik diperlukan sebuah sinyal analog $x(t)$ dan hasil transformasi Hilbert $x_H(t)$, maka asosiasi sinyal analisis adalah:

$$x_A(t) = x(t) + jx_H(t) \dots \dots \dots (2.12)$$



Gambar 2 . 8 : a) sinyal analog dari suatu suara, b) sinyal envelope dari sinyal analog a, c) sinyal envelope setelah dikenakan filter

Walaupun mengganti nilai riil dengan nilai kompleks sinyal, mungkin dapat membuat sesuatu tampak rumit, itu memperbolehkan untuk mendefinisikan hubungan yang ditunjukkan dan konsep yang cukup berharga. Sinyal *envelope* didefinisikan dengan:

$$|x_A(t)| = \sqrt{x^2(t) + x_H^2(t)} \dots \dots \dots (2.13)$$

Maka dapat ditulis sinyal analitik sebagai:

$$x_A(t) = |x_A(t)| e^{j\phi(t)} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dengan fase sesaat $\phi(t)$ adalah:

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{x_H(t)}{x(t)} \right] \dots \dots \dots (2.15)$$

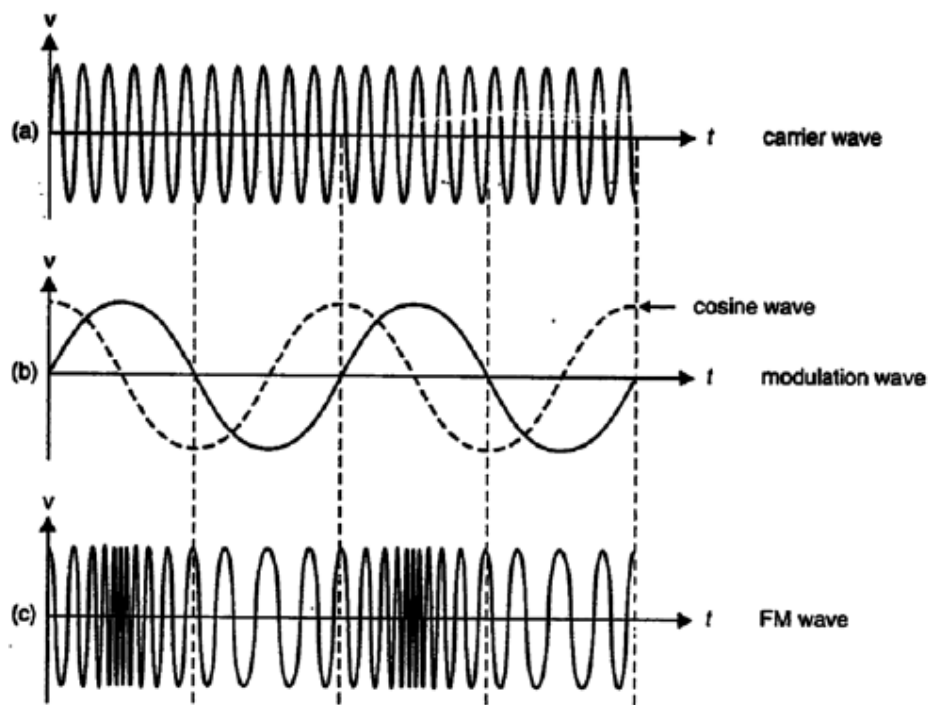
Contoh dari penerapan transformasi Hilbert adalah pendeteksian sinyal *envelope*. Untuk lebih jelasnya dapat melihat pada gambar 2.8. Gambar 2.8a merupakan sinyal analog dari suatu suara. Gambar 2.8b merupakan sinyal *envelope* hasil yang didapat dengan menggunakan transformasi Hilbert. Sedangkan gambar 2.8c merupakan gambar sinyal *envelope* setelah dikenakan *low pass filter*.

2.11. Frequency Modulation (FM)

Frequency Modulation atau yang lebih dikenal dengan FM merupakan salah satu metode sintesis suara. Metode ini termasuk kedalam golongan *direct synthesis* karena menggunakan perhitungan matematika dalam melakukan sintesis suara.

Pada tahun 1973, metode sintesis FM diperkenalkan oleh Dr. John M. Chowning. Teknik sintesis ini dipatenkan sendiri oleh Chowning pada tahun 1975 dan dipatenkan penggunaannya oleh Yamaha pada produk DX7 pada tahun 1980. Hingga saat ini Yamaha masih menggunakan teknik ini.

Kerja dari sintesis FM secara prinsip menyerupai dengan radio FM, yaitu sebuah gelombang sinyal cosinus atau sinus yang disebut dengan sinyal pembawa (*carrier*), yang memiliki sebuah frekuensi sendiri pada sumber lainnya. Gambar 2.9 memperlihatkan contoh sinyal pembawa, sinyal pemodulasi, dan sinyal termodulasi FM. Pada FM, frekuensi sesaat dari gelombang pembawa bervariasi sesuai dengan gelombang modulasi. Jumlah pembawa bervariasi di sekitar rata-rata, atau deviasi frekuensi puncak, sebanding dengan amplitud gelombang modulasi.



Gambar 2.9 : a) sinyal pembawa, b) sinyal pemodulasi, c) sinyal hasil sintesis FM

Persamaan untuk sebuah gelombang modulasi frekuensi puncak amplitud A dimana sinyal pembawa dan pemodulasi adalah sinusoid adalah:

$$e = A \sin(\omega t + I \sin \beta t) \dots \dots \dots (2.16)$$

dimana:

e = amplitud sementara dari sinyal pembawa yang telah termodulasi

α = frekuensi sinyal pembawa dalam rad/s, $\alpha = 2\pi f_c$

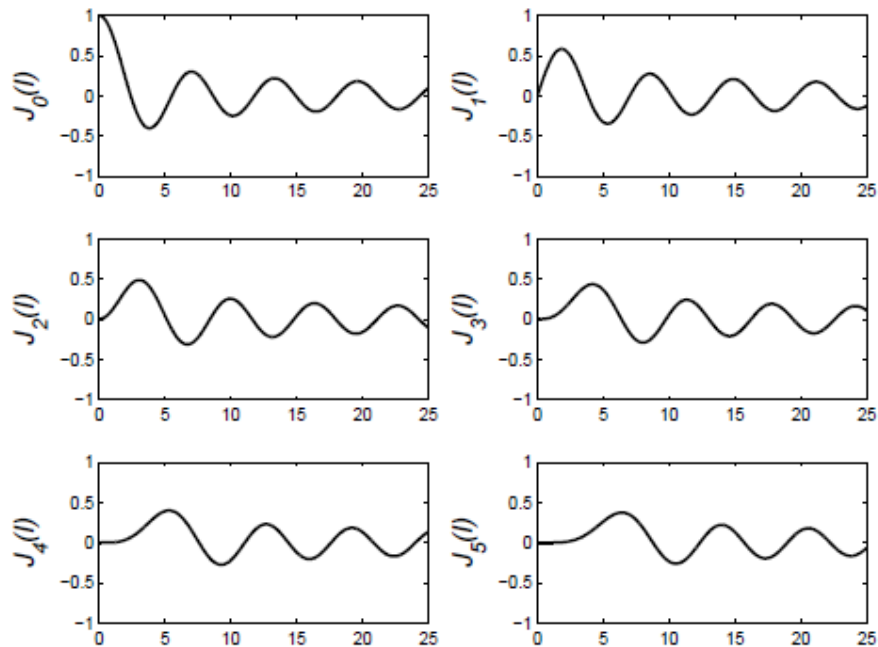
β = frekuensi sinyal modulasi dalam rad/s, $\beta = 2\pi f_m$

I = indek modulasi, rasio dari deviasi pundak dan frekuensi modulasi

f_c = frekuensi sinyal pembawa

f_m = frekuensi sinyal pemodulasi

Amplitude sinyal pembawa dan komponen *sideband* ditentukan oleh fungsi Bessel jenis pertama dan n urutan, $J_n(I)$, yang merupakan indeks modulasi. Gambar 2.10 memperlihatkan grafik fungsi Bessel untuk $n=0$ hingga $n=5$. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa tidak memberikan amplitudo yang signifikan ketika nilai I kecil. Jika nilai I lebih besar akan memproduksi urutan sideband yang lebih besar. Jadi semakin tinggi urutan frekuensi sisi maka dibutuhkan indeks yang lebih besar untuk frekuensi sisi untuk mendapatkan amplitudo yang signifikan.



Gambar 2 . 10 : Grafik Fungsi Bessel untuk $n=0$ hingga $n=5$

Kekayaan khusus teknik FM ini terletak pada kenyataan bahwa ada rasio pembawa dan modulasi frekuensi dan nilai-nilai indeks yang akan memproduksi komponen sideband yang jatuh dalam domain frekuensi negatif dari spektrum. Komponen negatif ini tergambarkan disekitar 0 Hz dan bercampur dengan komponen pada domain positif. Jenis-jenis relasi frekuensi yang hasilnya dari pencampuran ini sangat banyak dan termasuk kedalam spectra harmoni dan inharmoni.

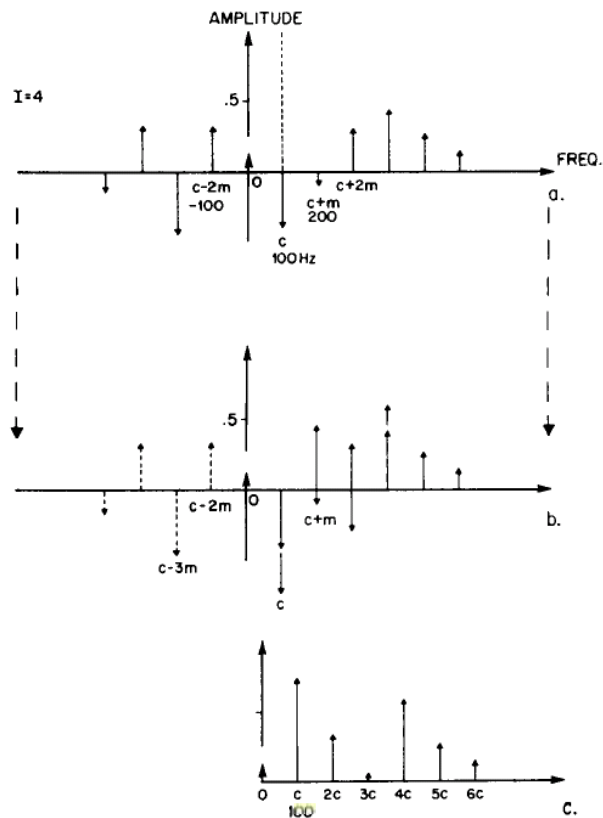
Satu contoh yang sangat berguna dalam merefleksikan frekuensi terjadi jika rasio antara frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi sama. Untuk nilai

$$c = 100 \text{ Hz}$$

$$m = 100 \text{ Hz}$$

$$I = 4$$

grafik dari spektrumnya diperlihatkan pada gambar 2.11.



Gambar 2 . 11 : a) komponen spektrum di domain frekuensi negatif ; b) refleksi frekuensi dari domain negatif dan ditambahkan pada domain positif ; c) grafik magnitude komponen b

Komponen pada 0 Hz merepresentasikan kesatuan yang konstan pada gelombang. Sisa dari bagian frekuensi yang rendah direfleksikan pada domain frekuensi positif dengan perubahan tanda dan ditambahkan aljabar pada komponen seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.11 b. Sebagai contoh, bagian frekuensi rendah kedua akan ditambahkan pada sinyal pembawa seperti tanda, maka akan meningkatkan energi pada frekuensi 100 Hz. Ketika bagian frekuensi rendah ketiga ditambahkan pada bagian frekuensi tinggi pertama tidak seperti tanda, akan mengurangi energi pada frekuensi 200 Hz. Gambar 2.11 c menunjukkan plot dari besarnya komponen. Kelebihan dari sintesis menggunakan FM adalah kemampuannya untuk membuat suara yang kaya spektrum yang tidak dapat dibuat oleh metode sintesis lainnya .

Untuk menentukan frekuensi dasar dari suara sintesis FM, sangat diperlukan representasi rasio frekuensi pembawa (f_c) dan modulator (f_m) dalam bentuk pecahan adalah:

$$\frac{f_c}{f_m} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana N_1 dan N_2 pada persamaan 2.17 adalah bilangan bulat. Maka frekuensi dasar (f_0) dari suara hasil sintesis adalah:

$$f_0 = \frac{f_c}{N_1} = \frac{f_m}{N_2} \dots \dots \dots (2.18)$$

Sebagai contoh jika frekuensi sinyal pembawa 220hz dan frekuensi modulator 110hz, maka besar rasionya:

$$\frac{f_c}{f_m} = \frac{220}{110} = \frac{2}{1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dan frekuensi dasarnya adalah:

$$f_0 = \frac{220}{2} = \frac{110}{1} = 110$$

Untuk menjadikan frekuensi dari sinyal pembawa sebagai frekuensi dasar dari suara sintesis, maka besar frekuensi modulator harus lebih besar atau dua kali frekuensi sinyal pembawa. Kondisi ini merupakan bentuk normal rasio. Jika kita hanya mempertimbangkan rasio yang melibatkan bilangan bulat hingga 9, dapat dibuat seluruh rasio dalam Bentuk Normal:

$$1:1 \ 1:2 \ 4:9 \ 3:7 \ 2:5 \ 3:8 \ 1:3 \ 2:7 \ 1:4 \ 2:9 \ 1:5 \ 1:6 \ 1:7 \ 1:8 \ 1:9$$

Dimisalkan rasio frekuensi sinyal pembawa dan pemodulator adalah C:M, maka jika nilai M kurang dari dua kali nilai C, maka dikatakan tidak berada dalam bentuk normal. Oleh karena itu, perlu diubah kedalam bentuk normal dengan operasi:

$$C = |C-M|$$

Operasi tersebut terus dilakukan hingga mendapatkan rasio dalam bentuk normal.

2.12. Modified Frequency Modulation (ModFM)

ModFM merupakan metode perbaikan pada metode FM. ModFM dikemukakan oleh Victor Iazzerini dan Joseph Timoney pada tahun 2010. Seperti yang telah diketahui formula FM pada persamaan 2.16 dengan cosine modulation (dengan $\omega_c = \alpha$ dan $\omega_m = \beta$), maka:

$$s(t) = \cos[\omega_c t + \sin(\omega_m t)] = \Re\{e^{i\omega_c t + i\sin(\omega_m t)}\} \dots (2.19)$$

Dengan melakukan modifikasi pada persamaan 2.19 didapatkan persamaan baru yang merupakan persamaan sintesis metode ModFM, yaitu:

$$s(t) = A \sin(\omega_m t) = -k \cos(\omega_c t)$$

$$s(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(k) \cos(\omega_c t + n\omega_m t) \dots (2.20)$$

Keterangan:

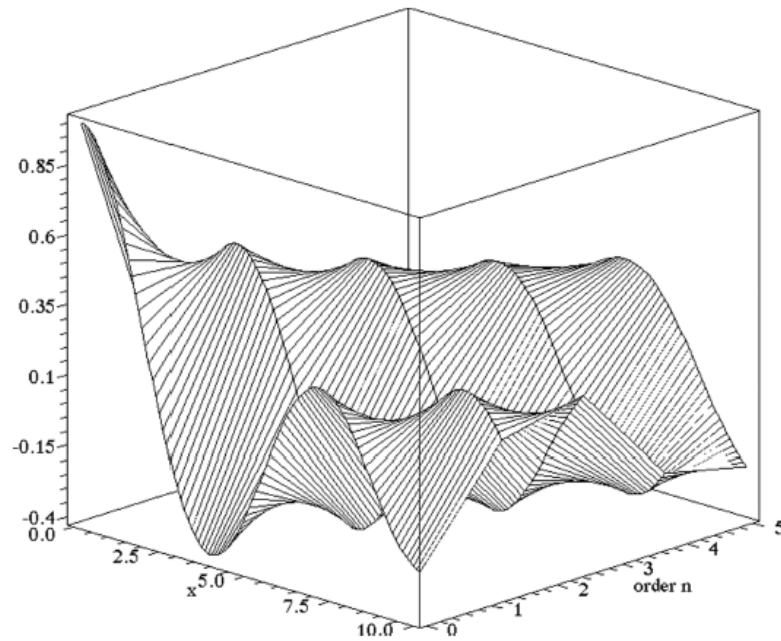
$s(t)$: sinyal yang telah termodulasi

A : sinyal envelope

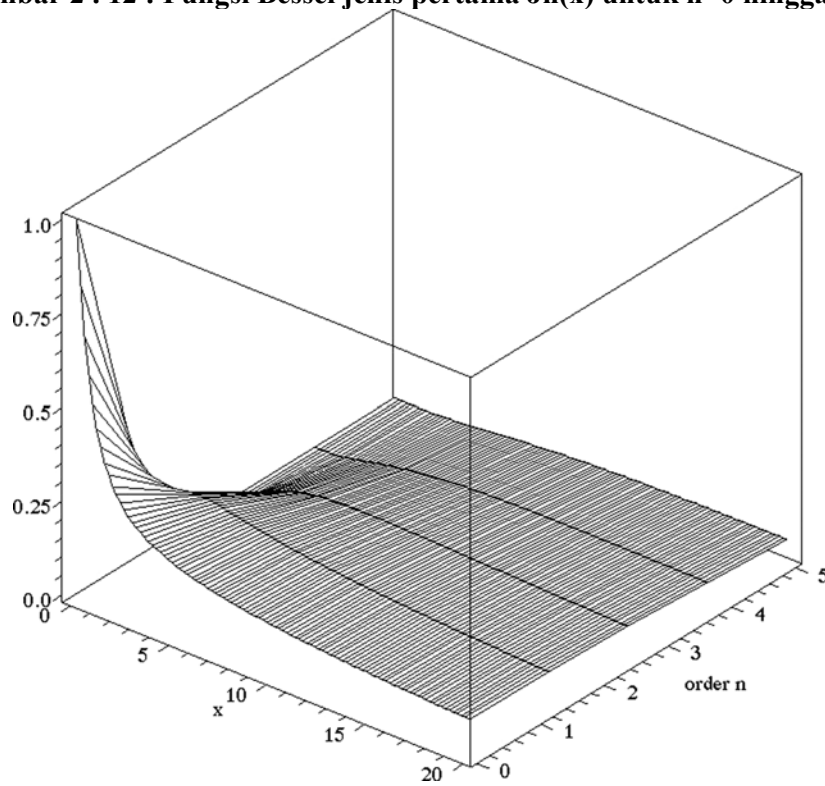
I : fungsi Bessel yang telah ternormalisasi ($I_n(k) \approx \frac{e^{-k}}{\sqrt{2\pi k}}$)

k : indeks modulasi

ModFM menggunakan fungsi Bessel yang ternormalisasi. Perbedaan hasil dari fungsi Bessel tanpa dan dengan normalisasi diperlihatkan pada gambar 2.12 dan 2.13.



Gambar 2 . 12 : Fungsi Bessel jenis pertama $J_n(x)$ untuk $n=0$ hingga $n=5$



Gambar 2 . 13 : Fungsi Bessel ternormalisasi $e^{-x}J_n(x)$ untuk $n=0$ hingga $n=5$

BAB III

ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM

Bab ini menjelaskan analisis dan perancangan sistem yang akan dibuat. Adapun sub bahasan yang akan dijelaskan adalah kebutuhan fungsional, rancangan data, dan rancangan antar muka sistem.

3.1. Kebutuhan Fungsional

Fungsi-fungsi yang harus ada dalam sistem untuk menunjang proses sintesis adalah pencarian sinyal envelope, sintesis suara, pencarian frekuensi harmoni, dan pencarian rata-rata selisih frekuensi harmoni.

3.1.1. Pencarian Sinyal Envelope

Masukan data untuk mencari bungkus sinyal adalah suara dataset dalam domain waktu. Kemudian sinyal ini akan dikenakan transformasi Hilbert dan hasilnya akan dikenakan filter rerata bergerak. Filter rerata bergerak digunakan untuk menghaluskan bentuk sinyal envelope seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.8 pada sub bab 2.8.2.

3.1.2. Sintesis Suara

Fungsi sintesis suara menggunakan metode Modified Frequency Modulation (ModFM). Nilai-nilai masukan dalam proses sintesis ini adalah frekuensi dasar, bungkus sinyal, perbandingan frekuensi pembawa dan pemodulasi dan, panjang sinyal, dan sampel frekuensi yang akan dibangkitkan. Hasil dari proses sintesis adalah suara baru.

3.1.3. Pencarian Frekuensi Harmoni

Pencarian frekuensi harmoni digunakan dalam proses pengujian kemiripan suara dataset dengan suara hasil sintesis. Inputan untuk mencari frekuensi harmoni adalah domain frekuensi dari suara. Jumlah frekuensi harmoni yang akan dicari adalah 2 buah dari masing-masing suara (suara hasil sintesis dan dataset).

3.1.4. Pencarian Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni

Fungsi pencarian rata-rata selisih frekuensi harmoni digunakan untuk mengetahui seberapa besar pergeseran yang terjadi antara frekuensi harmoni dataset dengan frekuensi harmoni suara hasil sintesis. Rata-rata selisih frekuensi harmoni dicari dengan cara mencari rata-rata selisih antara frekuensi harmoni pertama suara dataset dengan suara hasil sintesis ditambah dengan selisih antara frekuensi harmoni kedua suara dataset dengan suara hasil sintesis.

3.2. Rancangan Data

Data yang akan digunakan berjumlah 12 buah yang terdiri dari 6 buah gamelan gangsa kantil pengumbang dan 6 buah gamelan gangsa kantil pengisep. Frekuensi dasar yang dihasilkan akan dicari frekuensi dasar rata-rata masing-masing bilah yang akan digunakan pada proses sintesis. Frekuensi dasar rata-rata ini akan disimpan dalam array 2 dimensi berukuran 2x10 seperti yang diperlihatkan gambar 3.1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										

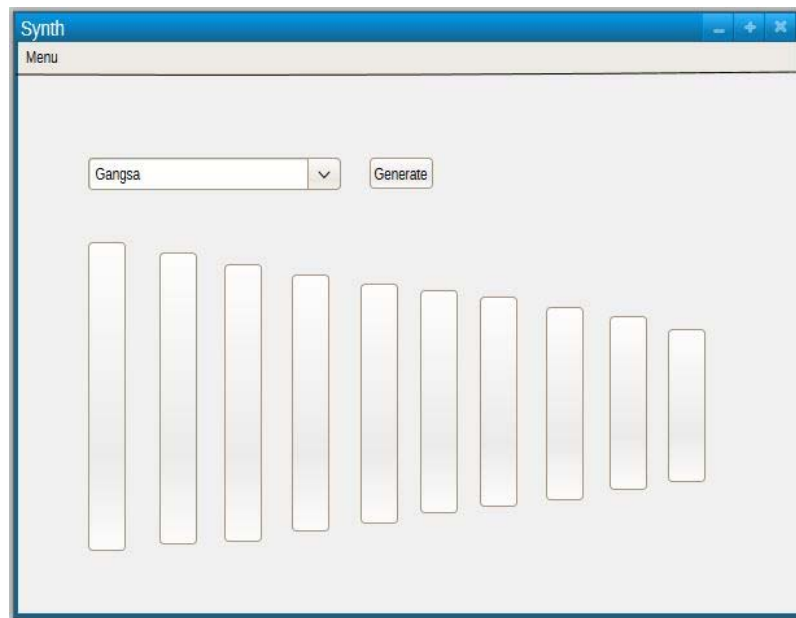
Gambar 3. 1 : Rancangan array frekuensi dasar gamelan gangsa kantil

Baris pada gambar 3.1 menyatakan jenis gamelan gangsa kantil (baris pertama gangsa kantil pengumbang dan baris kedua gangsa kantil pengisep) dan kolom menyatakan bilah gamelan gangsa kantil. Bungkus sinyal yang diperoleh dari hasil proses transformasi Hilbert dan filter rerata bergerak berupa array. Untuk itu bungkus sinyal yang akan digunakan dalam proses sintesis akan disimpan dalam suatu cell array dengan ukuran yang sama seperti array frekuensi dasar. Namun bedanya setiap cell menyimpan array dari satu bungkus sinyal.

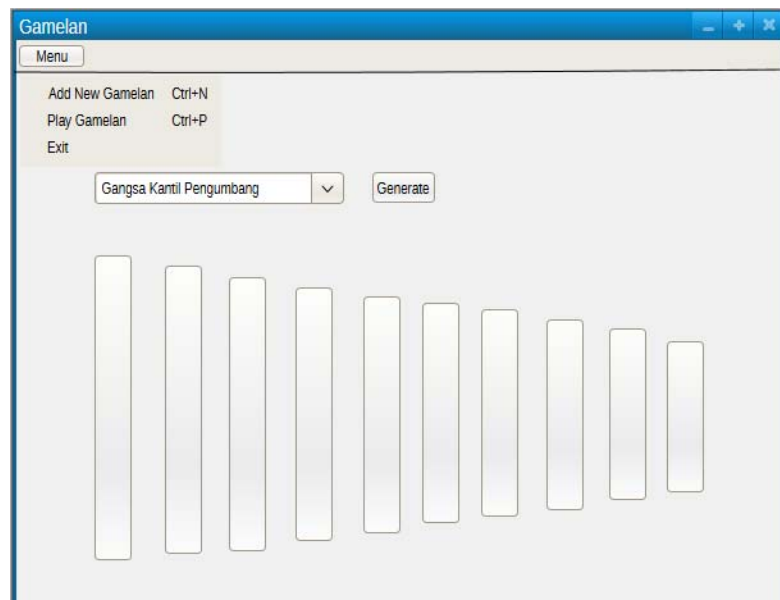
3.3. Rancangan Antar Muka Sistem

Hasil akhir dari sintesis akan dibungkus menjadi suatu aplikasi sederhana. Rancangan tampilan awal aplikasi ini diperlihatkan pada gambar 3.2. Pada tampilan awal pengguna sudah disajikan tampilan berupa bilah gamelan.

Pengguna hanya perlu memilih gamelan yang ingin dimainkan dan pengguna dapat memainkannya.



Gambar 3. 2 : Rancangan tampilan awal aplikasi



Gambar 3. 3 : Rancangan tampilan menu aplikasi

The screenshot shows a window titled "Gamelan" with a "Menu" tab. The form contains the following elements:

- Gamelan's Name:** A text input field.
- Number of Sound:** A numeric input field.
- Insert Detail:** A button located next to the "Number of Sound" field.
- Sound Configuration Grid:** A 2x5 grid of controls. Each cell contains:
 - FF:** A label for Fundamental Frequency.
 - SE:** A label for Sound Example.
 - FF Input:** A text input field.
 - SE Input:** A small square button.
 - SE Menu:** A button with three dots (indicating a dropdown menu).
- Legend:**
 - FF : Fundamental Frequency
 - SE : Sound Example
- Save:** A button at the bottom right of the form.

Gambar 3. 4 : Rancangan tampilan untuk menambahkan suara gamelan baru

Seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.3, akan ada 3 menu pada aplikasi yaitu Add New Gamelan, Play Gamelan, dan Exit.

Menu Add New Gamelan fitur yang akan berfungsi untuk menambah suara gamelan baru. Ketika menu Add New Gamelan dipilih, aplikasi akan menampilkan form untuk menambah suara gamelan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4. Untuk memainkan gamelan, aplikasi akan menampilkan tampilan awal (gambar 3.2).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan diuraikan hasil beserta pembahasan dari pelaksanaan penelitian usulan. Adapun uraian tersebut dimulai dari pencarian frekuensi dasar, input proses sintesis, proses sintesis, dan proses uji coba dan evaluasi.

4.1. Pencarian Frekuensi Dasar

Dari 12 suara gamelan gangsa kantil yang dikumpulkan, terdapat 6 buah suara pengumbang dan 6 suara pengisep. Hasil dari analisis domain waktu menggunakan program Sound Forge 10 didapatkan frekuensi tertinggi dari keenam suara pengumbang ditunjukkan pada tabel 4.1 dan frekuensi tertinggi dari keenam suara pengisep ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4. 1 : Frekuensi tertinggi seluruh bilah pengumbang hasil analisis Sound Forge

Nomor Dataset	Frekuensi Tertinggi Bilah (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	556	606	768	820	1024	1130	1225	1575	1672	2083
2	545	600	759	809	1019	1114	1217	1569	1667	2072
3	538	589	741	802	1014	1071	1182	1476	1574	2003
4	530	580	733	794	1006	1063	1175	1468	1568	1997
5	538	588	749	802	1012	1072	1182	1476	1575	2003
6	530	580	734	793	1006	1064	1174	1469	1566	1997
Min	530	580	733	793	1006	1063	1174	1468	1566	1997
Max	556	606	768	820	1024	1130	1225	1575	1672	2083

Tabel 4. 2 : Frekuensi tertinggi seluruh bilah pengisep hasil analisis Sound Forge

Dengan menggunakan konsep overtone seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 2.4, frekuensi tertinggi setiap bilah merupakan overtone dari frekuensi yang lebih rendah. Untuk bilah pertama dataset pertama pengumbang frekuensi tertingginya merupakan overtone dari frekuensi 278 Hz, 139 Hz, dan 69,5 Hz. Frekuensi 69,5 Hz merupakan frekuensi dasar dari suara tersebut.

Nomor Dataset	Frekuensi Dasar Bilah (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	602	666	829	880	1116	1177	1271	1575	1682	2140
2	594	657	821	872	1108	1168	1263	1566	1671	2132
3	605	666	829	882	1117	1177	1271	1575	1682	2141
4	597	647	806	862	1112	1189	1291	1606	1715	2215
5	585	639	806	857	1100	1170	1277	1607	1711	2191
6	586	639	807	857	1098	1168	1279	1608	1710	2191
Min	585	639	806	857	1098	1168	1263	1566	1671	2132
Max	605	666	829	882	1117	1189	1291	1608	1715	2215

Tabel 4.3 merupakan tabel frekuensi dasar dari gangsa kantil pengumbang dan tabel 4.4 merupakan tabel frekuensi dasar dari gangsa kantil pengisep.

Tabel 4. 3 : Frekuensi dasar dari setiap data suara pengumbang

Nomor Dataset	Frekuensi Dasar Bilah (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	69,5	75,8	96	102,5	128	141,3	153,1	196,9	209	260,4
2	68,1	75	94,9	101,1	127,4	139,3	152,1	196,1	208,4	259
3	67,3	73,6	92,6	100,3	126,8	133,9	147,8	184,5	196,8	250,4
4	66,3	72,5	91,6	99,3	125,8	132,9	146,9	183,5	196	249,6
5	67,3	73,5	93,6	100,3	126,5	134	147,8	184,5	196,9	250,4
6	66,3	72,5	91,8	99,1	125,8	133	146,8	183,6	195,8	249,6
Min	66,3	72,5	91,6	99,1	125,8	132,9	146,8	183,5	195,8	249,6
Max	69,5	75,8	96	102,5	128	141,3	153,1	196,9	209	260,4
Rata-rata	67,5	73,8	93,4	100,4	126,7	135,7	149,1	188,2	200,5	253,2

Tabel 4. 4 : Frekuensi dasar dari setiap data suara pengisep

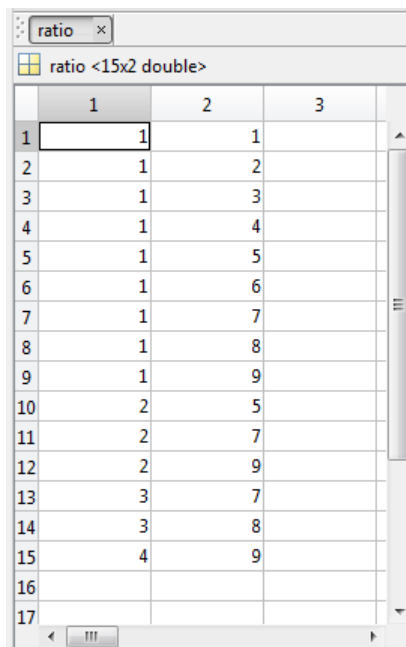
Nomor Dataset	Frekuensi Dasar Bilah (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	75,3	83,3	103,6	110	139,5	147,1	158,9	196,9	210,3	267,5
2	74,3	82,1	102,6	109	138,5	146	157,9	195,8	208,9	266,5
3	75,6	83,3	103,6	110,3	139,6	147,1	158,9	196,9	210,3	267,6
4	74,6	80,9	100,8	107,8	139	148,6	161,4	200,8	214,4	276,9
5	73,3	79,8	100,8	107,1	137,6	146,3	159,8	200,9	213,9	273,9
6	73,3	79,9	100,9	107,1	137,3	146	159,9	200,9	213,8	273,9
Min	73,3	79,8	100,8	107,1	137,3	146	157,9	195,8	208,9	266,5
Max	75,6	83,3	103,6	110,3	139,6	148,6	161,4	200,9	214,4	276,9
Rata-rata	74,4	81,6	102,1	108,6	138,6	146,9	159,5	198,7	211,9	271,1

Baris Min dan Max pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 menandakan rentang frekuensi dasar dari masing-masing bilah dimana Min adalah batas bawah dan Max batas atas frekuensi yang diijinkan. Sedangkan rata-rata merupakan rata-rata frekuensi dari tiap bilah. Nilai rata-rata ini akan digunakan dalam proses sintesis.

4.2. Input untuk Proses Sintesis

Input pada proses sintesis adalah ratio frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi yang diperlihatkan pada tabel 3.1, frekuensi dasar suara, dan sinyal envelope. Frekuensi dasar yang digunakan merupakan rata-rata frekuensi dasar setiap bilah baik itu pengumbang maupun pengisep seperti yang diperlihatkan pada tabel 4.3 dan tabel 4.4.

Untuk nilai ratio dan frekuensi dasar disimpan dalam bentuk file MATLAB dengan format .mat. Nilai ratio disimpan dengan nama array `ratio` dan nilai frekuensi dasar disimpan dengan nama array `ff`. Array `ratio` disimpan dengan nama file `ratio.mat` dan array `ff` disimpan dengan nama `fundamentalfrequency.mat`. Gambar 4.1 memperlihatkan isi dari array `ratio` dan gambar 4.2 memperlihatkan isi dari array `ff`.



	1	2	3
1	1	1	
2	1	2	
3	1	3	
4	1	4	
5	1	5	
6	1	6	
7	1	7	
8	1	8	
9	1	9	
10	2	5	
11	2	7	
12	2	9	
13	3	7	
14	3	8	
15	4	9	
16			
17			

Gambar 4. 1 : Nilai dari array `ratio`

ff <2x10 double>											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	67.5000	73.8000	93.4000	100.4000	126.7000	135.7000	149.1000	188.2000	200.5000	253.2000	
2	74.4000	81.5500	102.1000	108.6000	138.6000	146.9000	159.5000	198.7000	211.9000	271.1000	
3											

Gambar 4. 2 : Nilai dari array ff yang berisi frekuensi dasar suara bilah

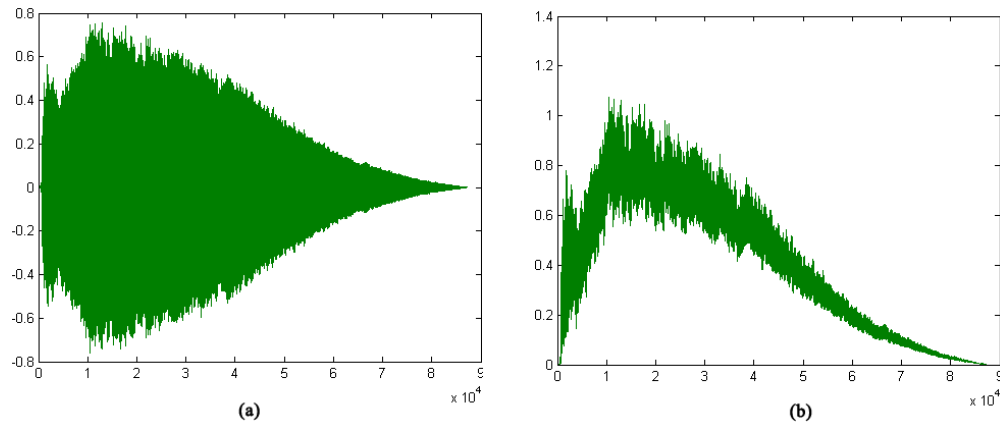
Baris pertama pada array ff menandakan frekuensi pengumbang dan baris kedua menandakan frekuensi pengisep. Sedangkan kolom pada array ff menyatakan urutan bilah gamelan. Inputan terakhir adalah sinyal envelope dari masing-masing suara. Untuk melakukannya dibuat fungsi dengan nama GetEnvelope.m dengan inputan satu suara bilah dan fungsi ini dikenakan untuk seluruh dataset. Sintak dari fungsi pencarian sinyal envelope diperlihatkan tabel 4.6. Untuk melakukan transformasi Hilbert dapat menggunakan fungsi yang telah disediakan MATLAB. Kemudian hasil transformasi Hilbert digunakan untuk mendapatkan sinyal analitik dan dikenakan filter rerata bergerak. Variabel a diberi nilai 1 untuk mengatur tingkat kehalusan sinyal envelope. Semakin besar nilai a, maka semakin banyak komponen frekuensi menyusun sinyal suara yang hilang.

Tabel 4. 5 : Sintak fungsi pencarian sinyal envelope

```
function envelope = GetEnvelope(wave)

hilbert_trans = abs(hilbert(wave)); %transformasi hilbert
envelope_bf = wave + j*(hilbert_trans); %sinyal analitik, envelope
sebelum dikenakan filter
a = 1;
b = [1/4 1/4 1/4 1/4];
envelope = filter(b,a,abs(envelope_bf)); %moving average filter
untuk menghaluskan bungkus sinyal
end
```

Gambar 4.3 (a) merupakan sinyal suara gangsa kantil ke 3 bilah pertama dan gambar 4.3 (b) merupakan sinyal envelope-nya.



Gambar 4. 3 : (a) Plot sinyal suara gangsa kantil pengumbang ke 3 bilah pertama, (b) sinyal envelope dari gambar (a)

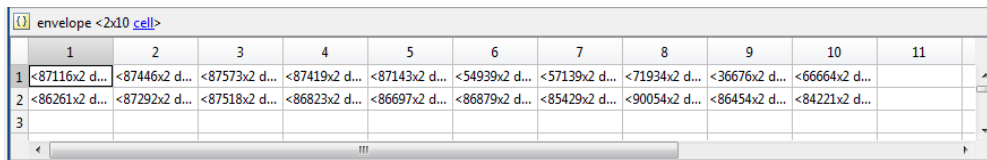
Sinyal envelope yang digunakan dipilih dari suara dataset yang memiliki selisih frekuensi dasar terkecil dengan frekuensi dasar yang digunakan (tabel 4.5). Tabel 4.6 memperlihatkan selisih untuk pengumbang dan tabel 4.7 memperlihatkan selisih untuk pengisep. Bagian tabel yang diberi warna kuning merupakan selisih terkecil yang diperoleh. Maka sinyal envelope yang digunakan pada proses sintesis diambil dari dataset dengan bilah terkecil tiap bilangannya. Proses pencarian envelope dilakukan sebanyak 20 buah mengingat jumlah bilah gamelan gangsa pengumbang 10 dan pengisep 10. Sinyal envelope disimpan dalam cell array dengan nama envelope. Isi dari cell ini diperlihatkan pada gambar 4.4. Angka-angka yang terlihat pada isi cell gambar 4.4 merupakan dimensi dari sinyal envelope.

Tabel 4. 6 : Selisih frekuensi dasar pengumbang dengan frekuensi rata-rata pengumbang

Bilah		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nomor Dataset											
1		2	2	2,6	2,1	1,3	5,6	4	8,7	8,5	7,2
2		0,6	1,2	1,5	0,7	0,7	3,6	3	7,9	7,9	5,8
3		0,2	0,2	0,8	0,1	0,1	1,8	1,3	3,7	3,7	2,8
4		1,2	1,3	1,8	1,1	0,9	2,8	2,2	4,7	4,5	3,6
5		0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1,7	1,3	3,7	3,6	2,8
6		1,2	1,3	1,6	1,3	0,9	2,7	2,3	4,6	4,7	3,6

Tabel 4. 7 : Selisih frekuensi dasar pengisep dengan frekuensi dasar rata-rata pengisep

Bilah Nomor Dataset	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,9	1,8	1,6	1,5	0,9	0,3	0,6	1,8	1,6	3,6
2	0,1	0,6	0,6	0,5	0,1	0,9	1,6	2,9	3	4,6
3	1,2	1,8	1,6	1,8	1	0,3	0,6	1,8	1,6	3,5
4	0,2	0,7	1,3	0,8	0,4	1,8	1,9	2,1	2,5	5,9
5	1,1	1,8	1,3	1,5	0,9	0,6	0,3	2,2	1,9	2,9
6	1,1	1,7	1,2	1,5	1,3	0,9	0,4	2,2	1,9	2,9



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	<87116x2 d...	<87446x2 d...	<87573x2 d...	<87419x2 d...	<87143x2 d...	<54939x2 d...	<57139x2 d...	<71934x2 d...	<36676x2 d...	<66664x2 d...	
2	<86261x2 d...	<87292x2 d...	<87518x2 d...	<86823x2 d...	<86697x2 d...	<86879x2 d...	<85429x2 d...	<90054x2 d...	<86454x2 d...	<84221x2 d...	
3											

Gambar 4. 4 : Cell array envelope yang menyimpan seluruh envelope data suara

4.3. Proses Sintesis

Metode ModFM diterapkan menggunakan fungsi pada MATLAB. Fungsi ini diberi nama `ModFM.m`. Tabel 4.4 merupakan fungsi `ModFM` yang dibuat.

Tabel 4. 8 : Sintak fungsi proses sintesis

```
function synthesis = ModFM(N, ratio, envelope, ff, fs)
t=0:1/fs:(N-1)/fs;

k=0.2;
synthesis = (envelope(:,1)/exp(k))'.*cos(2*pi*ratio(:,1)*ff*t +
2*pi*ratio(:,2)*ff*t)*(exp(k)/(sqrt(2*pi*k))); %SYNTHESIS PROCESS

end
```

Variabel `N` berisi nilai panjang dari suara yang akan disintesis. Nilai ini diambil dari panjang suara asli.

4.4. Uji Coba dan Evaluasi

Percobaan yang dilakukan sebanyak tiga kali sesuai dengan skenario yang telah dijabarkan pada sub bab 3.4. Pengujian pertama hasil sintesis dilakukan

dengan mencari selisih frekuensi harmoni dari suara hasil sintesis dengan suara dataset. Frekuensi harmoni dari dataset yang digunakan diperlihatkan pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 : Frekuensi Harmoni Gangsa Kantil Pengumbang dan Pengisep Dataset

Bilah ke-	Pengumbang		Pengisep	
	Frekuensi Harmoni ke-		Frekuensi Harmoni ke-	
	1	2	1	2
1	1065	86053	1163	85100
2	1168	86280	1282	86012
3	1489	86086	1630	85890
4	1590	85631	1718	85107
5	2003	85142	2186	84513
6	1336	53605	2320	84561
7	1532	55609	2476	82955
8	2408	69528	3217	86839
9	1310	35368	3298	83158
10	3029	63637	4185	80038

Pengujian penerapan skenario percobaan pertama menghasilkan perbandingan frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi terbaik bilah pertama untuk gangsa kantil pengumbang adalah 1:7 dengan rata-rata selisih frekuensi harmoni adalah 3. Sedangkan untuk gangsa kantil pengisep juga memberikan perbandingan terbaik yaitu 1:7 dengan rata-rata selisih frekuensi harmoni adalah 2.

Hasil pengujian kedua percobaan pertama ditunjukkan pada tabel 4.10. Frekuensi dasar yang dihasilkan dari suara hasil sintesis pengumbang dan pengisep masuk dalam rentang frekuensi pada tabel 4.3 dan tabel 4.4.

Tabel 4. 10 : Frekuensi dasar hasil sintesis bilah pertama percobaan pertama

Bilah	Pengumbang	Pengisep
1	67,5	74,5

Pada pengujian pertama percobaan kedua dihasilkan perbandingan terbaik frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi adalah 1:7 untuk kelima bilah gamelan

gangsa kantil pengumbang maupun pengisep. Tabel 4.11 memperlihatkan rata-rata selisih frekuensi harmoni dari gamelan gangsa pengumbang dari perbandingan terbaik yang terpilih. Sedangkan tabel 4.12 memperlihatkan rata-rata selisih frekuensi harmoni dari gamelan gangsa kantil pengisep berdasarkan perbandingan terbaik yang terpilih.

Tabel 4. 11 : Hasil percobaan kedua gamelan gangsa kantil pengumbang

Bilah	Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni
1	3
2	4
3	4
4	3
5	1

Tabel 4. 12 : Hasil percobaan kedua gamelan gangsa kantil pengisep

Bilah	Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni
1	2
2	10
3	8
4	7
5	5

Pada pengujian kedua percobaan kedua didapatkan bahwa kelima bilah dengan perbandingan terbaik memiliki frekuensi dasar yang berada pada rentang toleransi (ditunjukkan pada tabel 4.3 dan tabel 4.4). Frekuensi dasar baik gangsa kantil pengumbang maupun pengisep hasil sintesis diperlihatkan pada tabel 4.13.

Tabel 4. 13 : Frekuensi dasar hasil sintesis bilah pertama hingga kelima pengumbang dan pengisep

Bilah ke-	Frekuensi Dasar Pengumbang	Frekuensi Dasar Pengisep
1	67,5	74,5
2	73,75	81,63
3	93,38	102,13
4	100,38	108,63
5	126,63	138,63

Tabel 4.14 dan tabel 4.15 menunjukkan hasil pengujian pertama percobaan ketiga untuk gamelan gangsa kantil pengumbang dan gamelan gangsa pengisep. Perbandingan frekuensi terbaik sinyal pembawa dan pemodulasi adalah 1:7.

Tabel 4. 14 : Hasil percobaan ketiga gamelan gangsa kantil pengumbang

Bilah	Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni
1	3
2	4
3	4
4	3
5	1
6	17
7	14
8	49
9	25
10	34

Tabel 4. 15 : Hasil percobaan ketiga gamelan gangsa kantil pengisep

Bilah	Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni
1	2
2	10
3	8
4	7
5	5
6	4
7	3
8	30
9	26
10	42

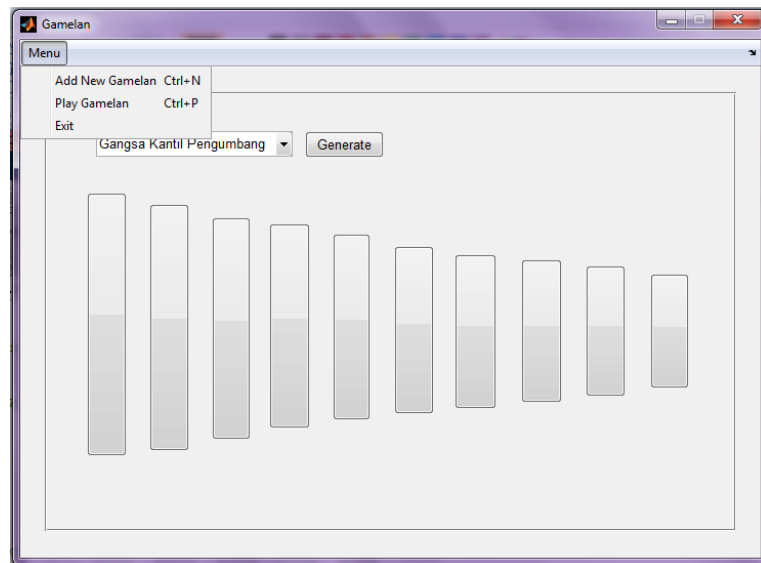
Hasil pengujian kedua percobaan ketiga diperlihatkan pada tabel 4.16. Frekuensi dasar yang dihasilkan dari suara hasil sintesis dengan perbandingan terbaik telah berada pada rentang toleransi yang ditunjukkan pada tabel 4.3 untuk gangsa kantil pengumbang dan tabel 4.4 untuk gangsa kantil pengisep.

Tabel 4. 16 : Hasil pengujian kedua percobaan ketiga

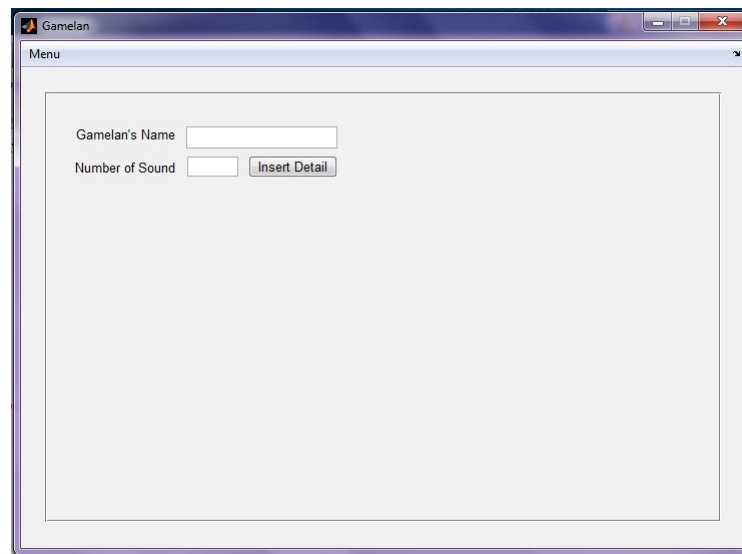
Bilah ke-	Frekuensi Dasar Pengumbang	Frekuensi Dasar Pengisep
1	67,5	74,5
2	73,75	81,63
3	93,38	102,13
4	100,38	108,63
5	126,63	138,63
6	135,63	146,88
7	149,13	159,5
8	188,13	198,63
9	200,5	211,88
10	253,25	271,13

4.5. Aplikasi Sederhana

Aplikasi sederhana dengan menggunakan teknik sintesis berhasil diimplementasikan. Gambar 4.5 menunjukkan tampilan awal dan menu yang ada pada aplikasi. Untuk memudahkan mengakses menu juga disediakan *shortcut* untuk menu Add New Gamelan (Ctrl+N) dan Play Gamelan (Ctrl+P).

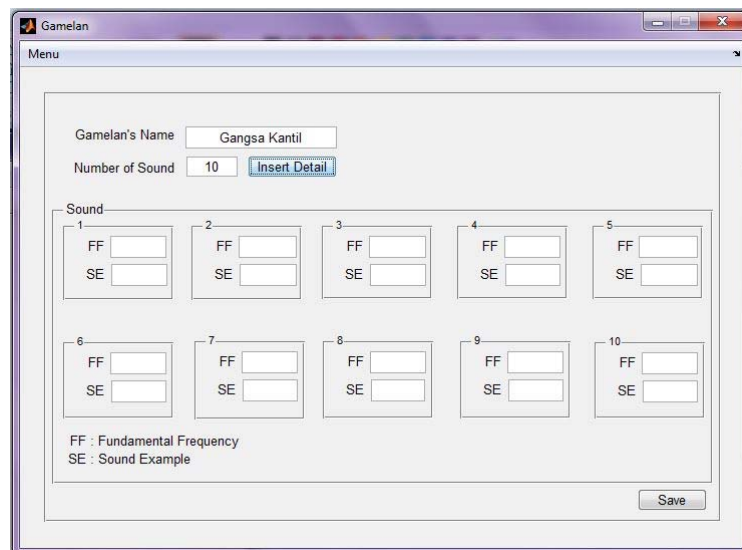
**Gambar 4. 5 : Tampilan Awal dan Menu**

Pada tampilan awal, pengguna sudah dapat memainkan gamelan setelah memilih gamelan apa yang ingin dimainkan. Ketika menu Play Gamelan dipilih, aplikasi akan kembali pada halaman awal seperti gambar 4.5. Gambar 4.7 menunjukkan tampilan awal ketika menu Add New Gamelan dipilih. Untuk menambah suara gamelan, perlu dimasukkan nama gamelan dan jumlah suara yang ingin dimasukkan. Setelah diisi, maka akan keluar tampilan seperti pada gambar 4.8.



The screenshot shows a window titled 'Gamelan' with a 'Menu' tab. Inside the window, there are two text input fields. The first is labeled 'Gamelan's Name' and the second is labeled 'Number of Sound'. To the right of the 'Number of Sound' field is a button labeled 'Insert Detail'.

Gambar 4. 6 : Tampilan Awal Menambah Suara Baru



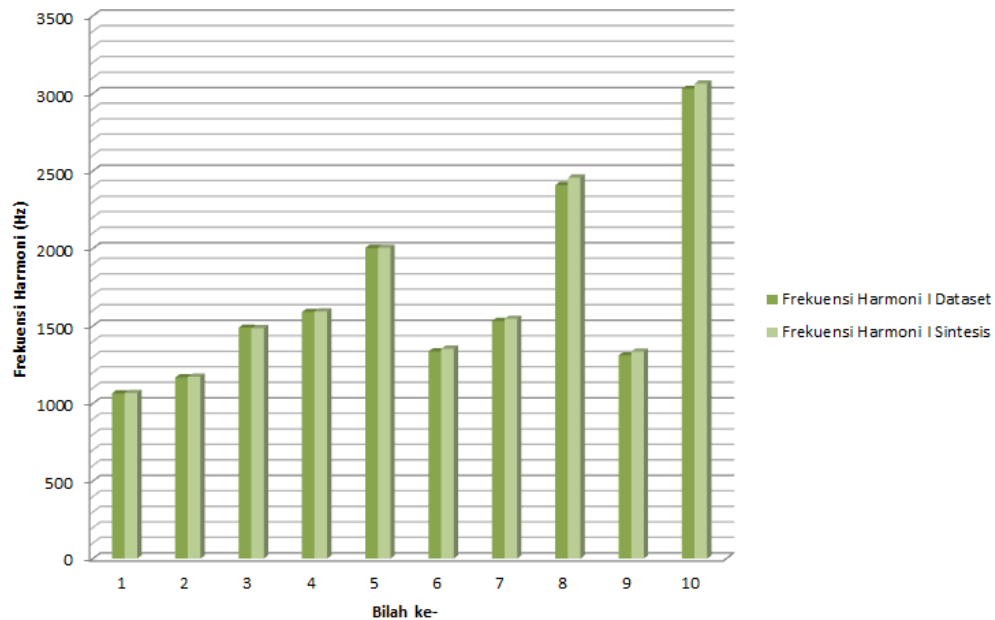
The screenshot shows the same 'Gamelan' window with the 'Menu' tab. The 'Gamelan's Name' field now contains the text 'Gangsa Kantil' and the 'Number of Sound' field contains '10'. The 'Insert Detail' button is highlighted. Below these fields, there is a section titled 'Sound' containing 10 numbered boxes (1 to 10). Each box has two input fields: 'FF' (Fundamental Frequency) and 'SE' (Sound Example). At the bottom of the window, there is a 'Save' button. A legend at the bottom left explains the abbreviations: 'FF : Fundamental Frequency' and 'SE : Sound Example'.

Gambar 4. 7 : Tampilan Menambah Suara Baru dengan Jumlah 10 Suara

Contoh pada gambar 4.7 jumlah suara yang ingin ditambah adalah 10. Seluruh input harus diisi. Setelah seluruh input diisi, tekan tombol save pada pojok kanan bawah dan sistem akan melakukan pencarian perbandingan terbaik dan menyimpan frekuensi dasar, bungkus sinyal, dan perbandingan terbaik untuk setiap suara.

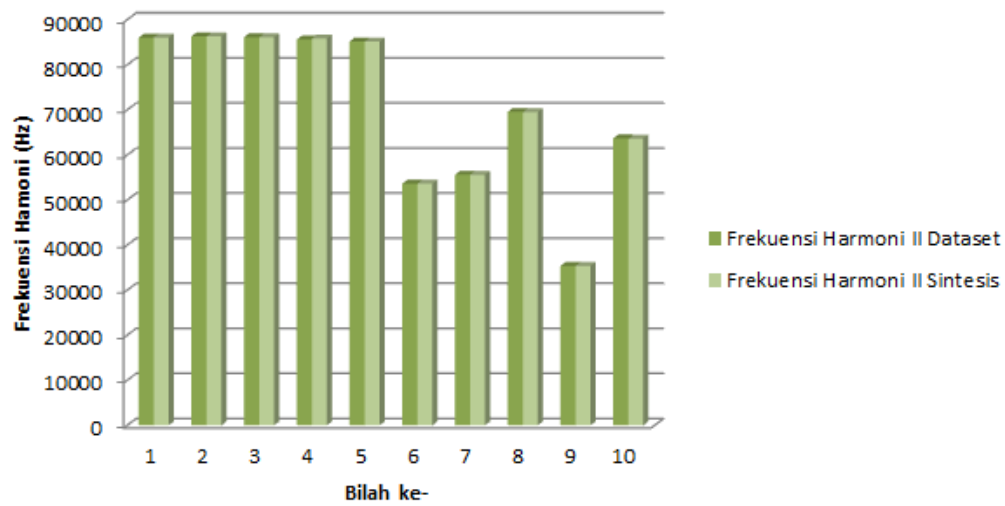
4.6. Pembahasan

Dari hasil percobaan yang dilakukan didapatkan bahwa perbandingan terbaik frekuensi sinyal pembawa dan pemodulasi yang didapatkan untuk seluruh bilah adalah 1:7. Selisih frekuensi harmoni hasil sintesis dengan suara dataset yang ditiru terletak dari 1 hingga 49.

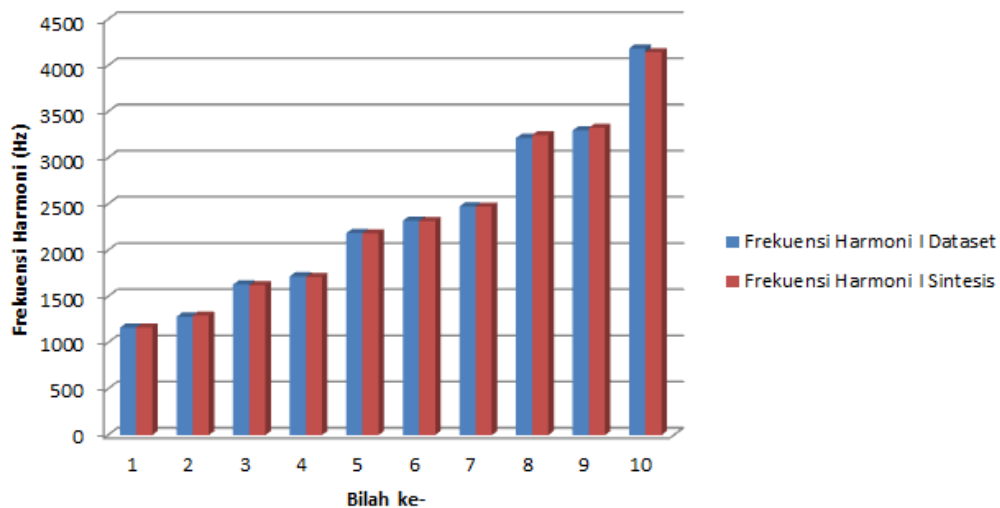


Gambar 4. 8 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni pertama dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengumbang

Gambar 4.8 memperlihatkan perbandingan frekuensi harmoni pertama dataset dengan hasil sintesis untuk perbandingan terbaik yang didapatkan berdasarkan pengujian pertama hingga ketiga yaitu 1:7. Terlihat perbedaan dari seluruh harmoni sangat kecil. Gambar 4.9 memperlihatkan perbandingan frekuensi harmoni kedua dataset dengan hasil sintesis. Dapat diamati bahwa perbedaannya hampir tidak terlihat.

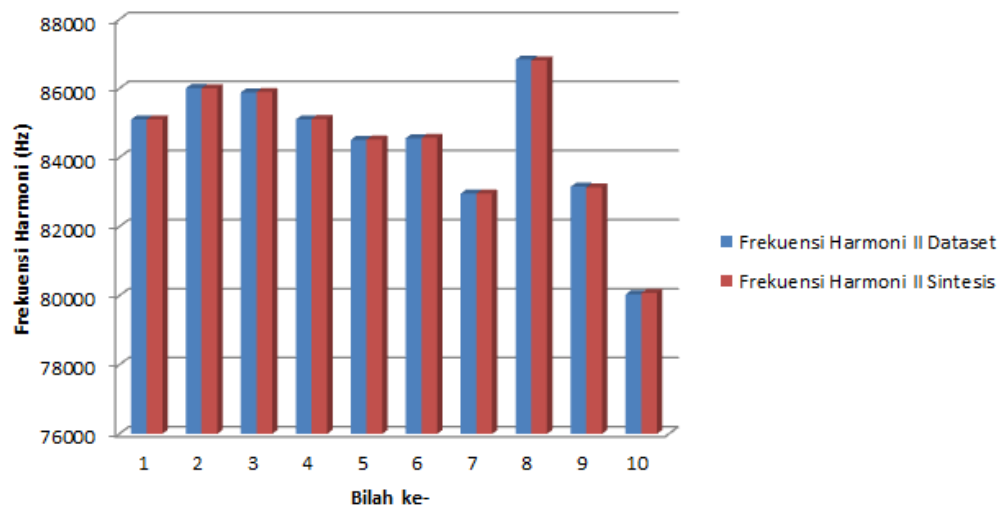


Gambar 4. 9 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni kedua dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengumbang



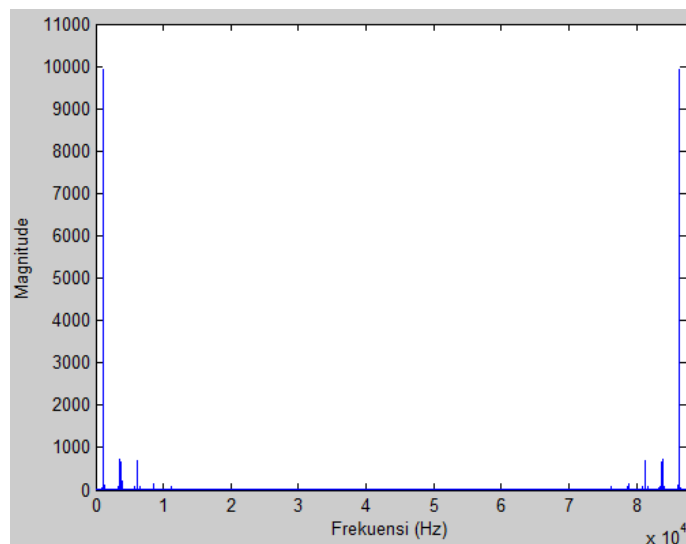
Gambar 4. 10 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni pertama dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengisep

Gambar 4.10 memperlihatkan perbandingan frekuensi harmoni pertama dataset dengan hasil sintesis untuk gamelan gangsa kantil pengisep. Dari grafik tersebut dapat diamati perbedaan frekuensi antara dataset dan hasil sintesis kecil. Begitu juga halnya pada perbandingan frekuensi harmoni kedua dataset dengan hasil sintesis untuk gamelan gangsa kantil pengisep yang diperlihatkan gambar 4.10. Perbedaan frekuensi harmoninya sangat kecil.



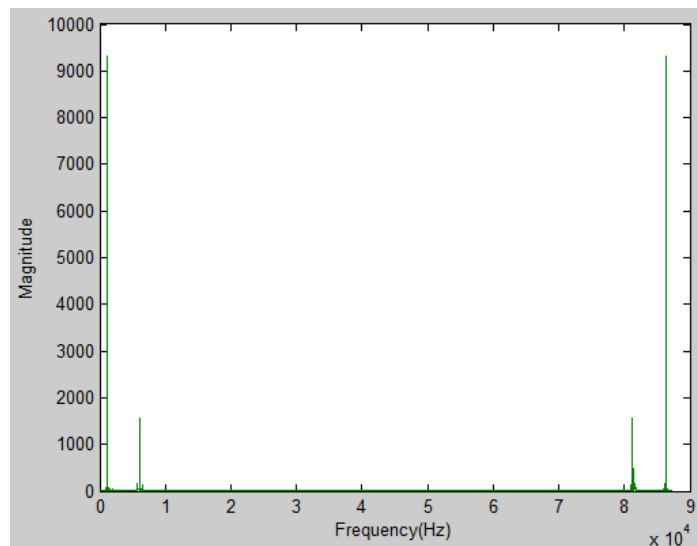
Gambar 4. 11 : Grafik perbandingan frekuensi harmoni kedua dataset dengan hasil sintesis gangsa kantil pengisep

Suara bilah hasil sintesis yang memiliki rata-rata selisih frekuensi harmoni terkecil adalah bilah kelima dari gamelan gangsa pengumbang dan gamelan gangsa pengisep. Suara yang dihasilkan telah mampu 100% menghasilkan suara senada dengan suara aslinya yang dapat dilihat dari kemiripan frekuensi harmoni pada gambar 4.8 hingga gambar 4.11 dan frekuensi dasar yang dihasilkan (table 4.16) yang telah masuk kedalam rentang frekuensi dasar yang diperbolehkan (table 4.3 dan table 4.4) untuk setiap bilah gamelan gangsa.



Gambar 4. 12 : Domain frekuensi hasil sintesis suara bilah kedua pengumbang

Namun seluruh suara hasil sintesis memiliki warna suara yang sedikit berbeda dari suara aslinya ketika didengar. Penyebab perbedaan warna suara ini dapat diketahui dari domain frekuensi dari masing-masing suara. Gambar 4.12 merupakan domain frekuensi dari hasil sintesis suara bilah kedua pengumbang dan gambar 4.13 merupakan domain frekuensi dari suara rekaman gangsa ketiga bilah kedua. Terlihat perbedaan besar magnitude frekuensi. Dari gambar tersebut juga dapat diamati bahwa terdapat beberapa frekuensi harmoni baru yang muncul dan mempengaruhi warna suara. Untuk domain frekuensi bilah lainnya diperlihatkan pada lampiran 5 dan 6.



Gambar 4. 13 : Domain frekuensi suara rekaman gangsa ketiga bilah kedua

Frekuensi dasar dari gamelan gangsa kantil ternyata memiliki perbandingan yang unik. Tabel 4.17 dan table 4.18 memperlihatkan perbandingan yang dihasilkan.

Tabel 4. 17 : Perbandingan frekuensi bilah gamelan gangsa kantil pengumbang

Perbandingan Frekuensi Bilah	Perbandingan
6:1	$135,7:67,5 = 1:2,01$
7:2	$149,1:73,8 = 1:2,02$
8:3	$188,2:93,4 = 1: 2,02$
9:4	$200,5:100,4 = 1:1,99$
10:5	$253,2:126,7 = 1:1,99$

Perbandingan ini dapat digunakan dalam proses sintesis. Selain itu perbandingan ini berguna ketika ingin melakukan sintesis untuk bilah yang lebih tinggi (bilah 11, 12, dan seterusnya).

Tabel 4. 18 : Perbandingan frekuensi bilah gamelan gangsa kantil pengisep

Perbandingan Frekuensi Bilah	Perbandingan
6:1	$146,9:74,4 = 1:1,97$
7:2	$159,5:81,6 = 1:1,96$
8:3	$198,7:102,1 = 1:1,95$
9:4	$211,9:108,6 = 1:1,95$
10:5	$271,1:138,6 = 1:1,96$

Selain perbandingan antar bilah tersebut dapat dihitung nilai cent untuk mendapatkan ratio antar frekuensi bilah terdekat. Nilai cent tersebut diperlihatkan pada table 4.19.

Tabel 4. 19 : Ratio (cent) frekuensi bilah terdekat

Perbandingan Frekuensi Bilah	Ratio (Cent) Gangsa Kantil Pengumbang	Ratio (Cent) Gangsa Kantil Pengisep
1:2	154,48	159,92
2:3	407,76	388,01
3:4	125,12	106,85
4:5	402,79	422,28
5:6	118,81	100,69
6:7	163,03	142,47
7:8	403,18	380,44
8:9	109,60	111,35
9:10	404,01	426,53

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil uji coba dan evaluasi penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Teknik sintesis menggunakan metode ModFM telah berhasil dilakukan. Perbandingan terbaik frekuensi pembawa dan pemodulasi adalah 1:7 dengan rata-rata selisih frekuensi harmoni hasil sintesis dengan suara acuan berada pada rentang 1 Hz hingga 49 Hz. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan selisih rata-rata frekuensi dasar untuk masing-masing bilah pada dataset yang digunakan. Semakin besar selisihnya maka diikuti dengan meningkatnya besar rata-rata selisih frekuensi harmoni.
2. Suara hasil sintesis 100% telah memiliki nada yang sama dengan suara dataset yang dibuktikan dengan seluruh frekuensi dasar suara hasil sintesis berada pada rentang frekuensi dasar masing-masing bilah.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Untuk mendapatkan suara yang memiliki noise kecil, dataset dapat diambil dengan melakukan perekaman di studio music atau menggunakan teknik pengurangan noise pada dataset sebelum dataset digunakan lebih lanjut.
2. Untuk mendapatkan rentang frekuensi yang lebih akurat dapat dilakukan dengan menambah dataset.
3. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan penambahan jumlah dataset untuk mengetahui kemungkinan adanya korelasi antara jumlah dataset terhadap besarnya rata-rata selisih frekuensi harmoni.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrien Vetterli, P. P. (2008). *Signal Processing For Communications*. Swiss: EPFL Press.
- Analog Devices, I. (2013). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing Moving Average Filters*.
- ANO14. (2008). *Understanding FFT Windows*.
- Aris Tjahyanto, Y. K. (2011). Model Analysis-By-Synthesis Aplikasi Pembangkit Suara Gamelan Sintetik. Yogyakarta: Seminar nasional Aplikasi Teknologi Informasi.
- Burk, P. (2004). *Direct Synthesis versus Wavetable Synthesis*. Mobileer.
- Chowning, J. M. (1973). The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *Stanford Artificial Intelligence Laboratory*, 526.
- Eko Rendra Saputra, A. P. (2006). Analisa dan Sintesa Bunyi Dawai pada Gitar Semi-Akustik. *Seminar Nasional MIPA*. Yogyakarta: FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta.
- Ellis, A. J. (1885). On the Musical Scales of Various Nations. *The Journal of the Society of Arts*, 485-527.
- Hasibuan, Z. A. (2007). *Metodologi Penelitian Pada Bidang Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi*. Universita Indonesia.
- Jeremy F., J. S. (2002). Time-Frequency Analysis of Musical Instruments*. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 457-476.
- Langton, C. (1999). *Signal Processing & Simulation Newsletter*.
- Lazzarini, V. T. (2010). Theory and Practice of Modified Frequency Modulation Synthesis. (p. 459). *J. Audio Eng. Soc.*
- Ronald L. Allen, D. W. (2004). *Signal Analysis: Time, Frequency, Scale, and Structure*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Technologies, A. (2000). *The Fundamental of Signal Analysis*. Agilent Technologies.
- Truax, B. (n.d.). *Tutorial for Frequency Modulation Synthesis*. Tersedia : <http://www.sfu.ca/~truax/fmtut.html> [2 April 2014].
- Yudha Triguna, I. B. (1993). *Peralatan Hiburan, dan kesenian Tradisional Daerah Bali*. Denpasar: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Lampiran 1
Frekuensi Harmoni Hasil Sintesis Suara Gangsa Pengumbang

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
1	1	1	268	86850
	1	2	401	86717
	1	3	534	86584
	1	4	668	86450
	1	5	801	86317
	1	6	934	86184
	1	7	1068	86050
	1	8	1201	85917
	1	9	1334	85784
	2	5	934	86184
	2	7	1201	85917
	2	9	1468	85650
	3	7	1334	85784
	3	8	1468	85650
	4	9	1734	85384

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
2	1	1	294	87154
	1	2	440	87008
	1	3	586	86862
	1	4	733	86715
	1	5	879	86569
	1	6	1025	86423
	1	7	1172	86276
	1	8	1318	86130
	1	9	1464	85984
	2	5	1025	86423
	2	7	1318	86130
	2	9	1611	85837
	3	7	1464	85984
	3	8	1611	85837
	4	9	1903	85545

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
3	1	1	372	87203
	1	2	557	87018
	1	3	743	86832
	1	4	928	86647
	1	5	1114	86461
	1	6	1299	86276
	1	7	1485	86090
	1	8	1670	85905
	1	9	1856	85719
	2	5	1299	86276
	2	7	1670	85905
	2	9	2041	85534
	3	7	1856	85719
	3	8	2041	85534
	4	9	2412	85163

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
4	1	1	399	87022
	1	2	598	86823
	1	3	797	86624
	1	4	996	86425
	1	5	1195	86226
	1	6	1394	86027
	1	7	1593	85828
	1	8	1792	85629
	1	9	1991	85430
	2	5	1394	86027
	2	7	1792	85629
	2	9	2190	85231
	3	7	1991	85430
	3	8	2190	85231
	4	9	2588	84833

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
5	1	1	502	86643
	1	2	752	86393
	1	3	1002	86143
	1	4	1253	85892
	1	5	1503	85642
	1	6	1754	85391
	1	7	2004	85141
	1	8	2254	84891
	1	9	2505	84640
	2	5	1754	85391
	2	7	2254	84891
	2	9	2755	84390
	3	7	2505	84640
	3	8	2755	84390
	4	9	3256	83889

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
6	1	1	339	54602
	1	2	508	54433
	1	3	677	54264
	1	4	846	54095
	1	5	1015	53926
	1	6	1184	53757
	1	7	1353	53588
	1	8	1522	53419
	1	9	1692	53249
	2	5	1184	53757
	2	7	1522	53419
	2	9	1861	53080
	3	7	1692	53249
	3	8	1861	53080
	4	9	2199	52742

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
7	1	1	387	56754
	1	2	581	56560
	1	3	774	56367
	1	4	967	56174
	1	5	1160	55981
	1	6	1353	55788
	1	7	1546	55595
	1	8	1740	55401
	1	9	1933	55208
	2	5	1353	55788
	2	7	1740	55401
	2	9	2126	55015
	3	7	1933	55208
	3	8	2126	55015
	4	9	2512	54629

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
8	1	1	615	71321
	1	2	922	71014
	1	3	1229	70707
	1	4	1536	70400
	1	5	1843	70093
	1	6	2150	69786
	1	7	2457	69479
	1	8	2764	69172
	1	9	3071	68865
	2	5	2150	69786
	2	7	2764	69172
	2	9	3378	68558
	3	7	3071	68865
	3	8	3378	68558
	4	9	3992	67944

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
9	1	1	334	36344
	1	2	501	36177
	1	3	668	36010
	1	4	835	35843
	1	5	1001	35677
	1	6	1168	35510
	1	7	1335	35343
	1	8	1502	35176
	1	9	1668	35010
	2	5	1168	35510
	2	7	1502	35176
	2	9	1835	34843
	3	7	1668	35010
	3	8	1835	34843
	4	9	2169	34509

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
10	1	1	767	65899
	1	2	1149	65517
	1	3	1532	65134
	1	4	1915	64751
	1	5	2298	64368
	1	6	2680	63986
	1	7	3063	63603
	1	8	3446	63220
	1	9	3829	62837
	2	5	2680	63986
	2	7	3446	63220
	2	9	4211	62455
	3	7	3829	62837
	3	8	4211	62455
	4	9	4977	61689

Lampiran 2
Frekuensi Harmoni Hasil Sintesis Suara Gangsa Pengisep

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
1	1	1	292	85971
	1	2	438	85825
	1	3	583	85680
	1	4	729	85534
	1	5	874	85389
	1	6	1020	85243
	1	7	1165	85098
	1	8	1311	84952
	1	9	1456	84807
	2	5	1020	85243
	2	7	1311	84952
	2	9	1602	84661
	3	7	1456	84807
	3	8	1602	84661
	4	9	1893	84370

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
2	1	1	324	86970
	1	2	485	86809
	1	3	647	86647
	1	4	808	86468
	1	5	970	86324
	1	6	1131	86163
	1	7	1292	86002
	1	8	1454	85840
	1	9	1615	85679
	2	5	1131	86163
	2	7	1454	85840
	2	9	1777	85517
	3	7	1615	85679
	3	8	1777	85517
	4	9	2099	85195

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
3	1	1	406	87114
	1	2	609	86911
	1	3	811	86709
	1	4	1014	86506
	1	5	1217	86303
	1	6	1419	86101
	1	7	1622	85898
	1	8	1825	85695
	1	9	2027	85493
	2	5	1419	86101
	2	7	1825	85695
	2	9	2230	85290
	3	7	2027	85493
	3	8	2230	85290
	4	9	2635	84885

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
4	1	1	429	86396
	1	2	642	86183
	1	3	856	85969
	1	4	1070	85755
	1	5	1284	85541
	1	6	1498	85327
	1	7	1711	85114
	1	8	1925	84900
	1	9	2139	84686
	2	5	1498	85327
	2	7	1925	84900
	2	9	2353	84472
	3	7	2139	84686
	3	8	2353	84472
	4	9	2781	84044

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
5	1	1	546	86153
	1	2	818	85881
	1	3	1091	85608
	1	4	1363	85336
	1	5	1636	85063
	1	6	1908	84791
	1	7	2181	84518
	1	8	2453	84246
	1	9	2726	83972
	2	5	1908	84791
	2	7	2453	84246
	2	9	2998	83701
	3	7	2726	83973
	3	8	2998	83701
	4	9	3543	83156

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
6	1	1	580	86301
	1	2	869	86012
	1	3	1159	85722
	1	4	1448	85433
	1	5	1737	85144
	1	6	2027	84854
	1	7	2316	84565
	1	8	2606	84275
	1	9	2895	83986
	2	5	2027	84854
	2	7	2606	84275
	2	9	3184	83697
	3	7	2895	83986
	3	8	3184	83697
	4	9	3763	83118

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
7	1	1	619	84812
	1	2	928	84503
	1	3	1237	84194
	1	4	1546	83885
	1	5	1855	83576
	1	6	2164	83267
	1	7	2473	82958
	1	8	2782	82649
	1	9	3091	82340
	2	5	2164	83267
	2	7	2782	82649
	2	9	3400	82031
	3	7	3091	82340
	3	8	3400	82031
	4	9	4018	81413

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
8	1	1	813	89243
	1	2	1218	88838
	1	3	1624	88432
	1	4	2030	88026
	1	5	2436	87620
	1	6	2841	87215
	1	7	3247	86809
	1	8	3653	86403
	1	9	4059	85997
	2	5	2841	87215
	2	7	3653	86043
	2	9	4464	85592
	3	7	4059	85997
	3	8	4464	85592
	4	9	5276	84780

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
9	1	1	832	85624
	1	2	1247	85209
	1	3	1663	84793
	1	4	2078	84378
	1	5	2493	83963
	1	6	2909	83547
	1	7	3324	83132
	1	8	3740	82716
	1	9	4155	82301
	2	5	2909	83547
	2	7	3740	82716
	2	9	4571	81885
	3	7	4155	82301
	3	8	4571	81885
	4	9	5401	81055

Bilah ke-	Perbandingan		Frekuensi Harmoni ke-	
	fc	fm	1	2
10	1	1	1036	83187
	1	2	1554	82669
	1	3	2072	82151
	1	4	2590	81633
	1	5	3107	81116
	1	6	3625	80598
	1	7	4143	80080
	1	8	4661	79562
	1	9	5178	79045
	2	5	3625	80598
	2	7	4661	79562
	2	9	5696	78527
	3	7	5178	79045
	3	8	5696	78527
	4	9	6732	77491

Lampiran 3
Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni Pengumbang

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
1	1	1	797	797	1594	797
	1	2	664	664	1328	664
	1	3	531	531	1062	531
	1	4	397	397	794	397
	1	5	264	264	528	264
	1	6	131	131	262	131
	1	7	3	3	6	3
	1	8	136	136	272	136
	1	9	269	269	538	269
	2	5	131	131	262	131
	2	7	136	136	272	136
	2	9	403	403	806	403
	3	7	269	269	538	269
	3	8	403	403	806	403
	4	9	669	669	1338	669

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
2	1	1	874	874	1748	874
	1	2	728	728	1456	728
	1	3	582	582	1164	582
	1	4	435	435	870	435
	1	5	289	289	578	289
	1	6	143	143	286	143
	1	7	4	4	8	4
	1	8	150	150	300	150
	1	9	296	296	592	296
	2	5	143	143	286	143
	2	7	150	150	300	150
	2	9	443	443	886	443
	3	7	296	296	592	296
	3	8	443	443	886	443
	4	9	735	735	1470	735

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
3	1	1	1117	1117	2234	1117
	1	2	932	932	1864	932
	1	3	746	746	1492	746
	1	4	561	561	1122	561
	1	5	375	375	750	375
	1	6	190	190	380	190
	1	7	4	4	8	4
	1	8	181	181	362	181
	1	9	367	367	734	367
	2	5	190	190	380	190
	2	7	181	181	362	181
	2	9	552	552	1104	552
	3	7	367	367	734	367
	3	8	552	552	1104	552
	4	9	923	923	1846	923

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
4	1	1	1191	1191	2382	1191
	1	2	992	992	1984	992
	1	3	793	793	1586	793
	1	4	594	594	1188	594
	1	5	395	395	790	395
	1	6	196	196	392	196
	1	7	3	3	6	3
	1	8	202	202	404	202
	1	9	401	401	802	401
	2	5	196	196	392	196
	2	7	202	202	404	202
	2	9	600	600	1200	600
	3	7	401	401	802	401
	3	8	600	600	1200	600
	4	9	998	998	1996	998

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
5	1	1	1501	1501	3002	1501
	1	2	1251	1251	2502	1251
	1	3	1001	1001	2002	1001
	1	4	750	750	1500	750
	1	5	500	500	1000	500
	1	6	249	249	498	249
	1	7	1	1	2	1
	1	8	251	251	502	251
	1	9	502	502	1004	502
	2	5	249	249	498	249
	2	7	251	251	502	251
	2	9	752	752	1504	752
	3	7	502	502	1004	502
	3	8	752	752	1504	752
	4	9	1253	1253	2506	1253

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
6	1	1	997	997	1994	997
	1	2	828	828	1656	828
	1	3	659	659	1318	659
	1	4	490	490	980	490
	1	5	321	321	642	321
	1	6	152	152	304	152
	1	7	17	17	34	17
	1	8	186	186	372	186
	1	9	356	356	712	356
	2	5	152	152	304	152
	2	7	186	186	372	186
	2	9	525	525	1050	525
	3	7	356	356	712	356
	3	8	525	525	1050	525
	4	9	863	863	1726	863

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisish Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
7	1	1	1145	1145	2290	1145
	1	2	951	951	1902	951
	1	3	758	758	1516	758
	1	4	565	565	1130	565
	1	5	372	372	744	372
	1	6	179	179	358	179
	1	7	14	14	28	14
	1	8	208	208	416	208
	1	9	401	401	802	401
	2	5	179	179	358	179
	2	7	208	208	416	208
	2	9	594	594	1188	594
	3	7	401	401	802	401
	3	8	594	594	1188	594
	4	9	980	980	1960	980

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisish Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
8	1	1	1793	1793	3586	1793
	1	2	1486	1486	2972	1486
	1	3	1179	1179	2358	1179
	1	4	872	872	1744	872
	1	5	565	565	1130	565
	1	6	258	258	516	258
	1	7	49	49	98	49
	1	8	356	356	712	356
	1	9	663	663	1326	663
	2	5	258	258	516	258
	2	7	356	356	712	356
	2	9	970	970	1940	970
	3	7	663	663	1326	663
	3	8	970	970	1940	970
	4	9	1584	1584	3168	1584

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
9	1	1	976	976	1952	976
	1	2	809	809	1618	809
	1	3	642	642	1284	642
	1	4	475	475	950	475
	1	5	309	309	618	309
	1	6	142	142	284	142
	1	7	25	25	50	25
	1	8	192	192	384	192
	1	9	358	358	716	358
	2	5	142	142	284	142
	2	7	192	192	384	192
	2	9	525	525	1050	525
	3	7	358	358	716	358
	3	8	525	525	1050	525
	4	9	859	859	1718	859

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
10	1	1	2262	2262	4524	2262
	1	2	1880	1880	3760	1880
	1	3	1497	1497	2994	1497
	1	4	1114	1114	2228	1114
	1	5	731	731	1462	731
	1	6	349	349	698	349
	1	7	34	34	68	34
	1	8	417	417	834	417
	1	9	800	800	1600	800
	2	5	349	349	698	349
	2	7	417	417	834	417
	2	9	1182	1182	2364	1182
	3	7	800	800	1600	800
	3	8	1182	1182	2364	1182
	4	9	1948	1948	3896	1948

Lampiran 4
Rata-Rata Selisih Frekuensi Harmoni Pengisep

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
1	1	1	871	871	1742	871
	1	2	725	725	1450	725
	1	3	580	580	1160	580
	1	4	434	434	868	434
	1	5	289	289	578	289
	1	6	143	143	286	143
	1	7	2	2	4	2
	1	8	148	148	296	148
	1	9	293	293	586	293
	2	5	143	143	286	143
	2	7	148	148	296	148
	2	9	439	439	878	439
	3	7	293	293	586	293
	3	8	439	439	878	439
	4	9	730	730	1460	730

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
2	1	1	958	958	1916	958
	1	2	797	797	1594	797
	1	3	635	635	1270	635
	1	4	474	474	948	474
	1	5	312	312	624	312
	1	6	151	151	302	151
	1	7	10	10	20	10
	1	8	172	172	344	172
	1	9	333	333	666	333
	2	5	151	151	302	151
	2	7	172	172	344	172
	2	9	495	495	990	495
	3	7	333	333	666	333
	3	8	495	495	990	495
	4	9	817	817	1634	817

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisish Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
3	1	1	1224	1224	2448	1224
	1	2	1021	1021	2042	1021
	1	3	819	819	1638	819
	1	4	616	616	1232	616
	1	5	413	413	826	413
	1	6	211	211	422	211
	1	7	8	8	16	8
	1	8	195	195	390	195
	1	9	397	397	794	397
	2	5	211	211	422	211
	2	7	195	195	390	195
	2	9	600	600	1200	600
	3	7	397	397	794	397
	3	8	600	600	1200	600
	4	9	1005	1005	2010	1005

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisish Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
4	1	1	1289	1289	2578	1289
	1	2	1076	1076	2152	1076
	1	3	862	862	1724	862
	1	4	648	648	1296	648
	1	5	434	434	868	434
	1	6	220	220	440	220
	1	7	7	7	14	7
	1	8	207	207	414	207
	1	9	421	421	842	421
	2	5	220	220	440	220
	2	7	207	207	414	207
	2	9	635	635	1270	635
	3	7	421	421	842	421
	3	8	635	635	1270	635
	4	9	1063	1063	2126	1063

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
5	1	1	1640	1640	3280	1640
	1	2	1368	1368	2736	1368
	1	3	1095	1095	2190	1095
	1	4	823	823	1646	823
	1	5	550	550	1100	550
	1	6	278	278	556	278
	1	7	5	5	10	5
	1	8	267	267	534	267
	1	9	540	540	1080	540
	2	5	278	278	556	278
	2	7	267	267	534	267
	2	9	812	812	1624	812
	3	7	540	540	1080	540
	3	8	812	812	1624	812
	4	9	1357	1357	2714	1357

Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
6	1	1	1740	1740	3480	1740
	1	2	1451	1451	2902	1451
	1	3	1161	1161	2322	1161
	1	4	872	872	1744	872
	1	5	583	583	1166	583
	1	6	293	293	586	293
	1	7	4	4	8	4
	1	8	286	286	572	286
	1	9	575	575	1150	575
	2	5	293	293	586	293
	2	7	286	286	572	286
	2	9	864	864	1728	864
	3	7	575	575	1150	575
	3	8	864	864	1728	864
	4	9	1443	1443	2886	1443

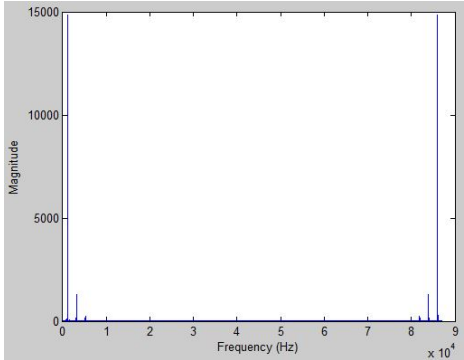
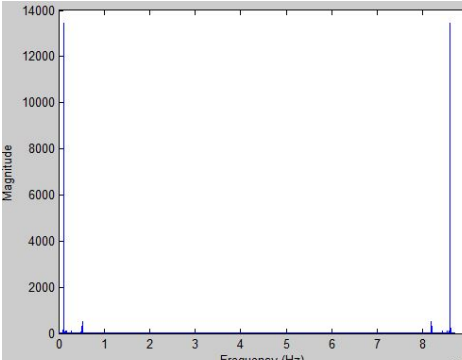
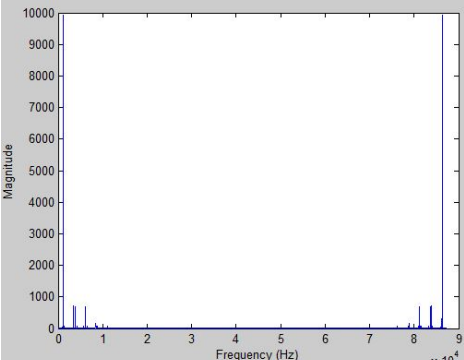
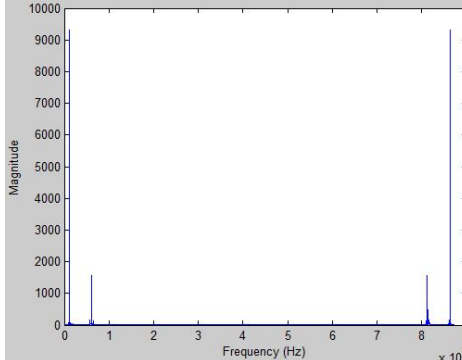
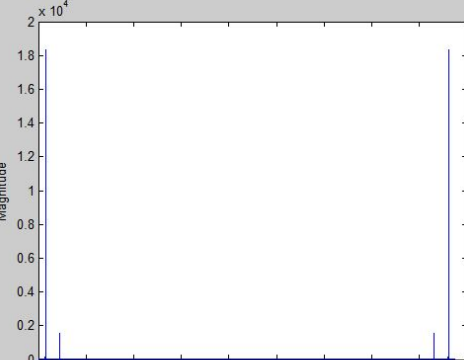
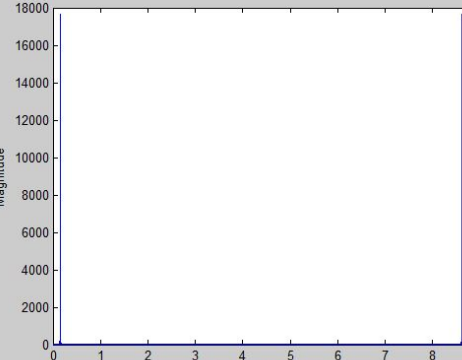
Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisish Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
7	1	1	1857	1857	3714	1857
	1	2	1548	1548	3096	1548
	1	3	1239	1239	2478	1239
	1	4	930	930	1860	930
	1	5	621	621	1242	621
	1	6	312	312	624	312
	1	7	3	3	6	3
	1	8	306	306	612	306
	1	9	615	615	1230	615
	2	5	312	312	624	312
	2	7	306	306	612	306
	2	9	924	924	1848	924
	3	7	615	615	1230	615
	3	8	924	924	1848	924
	4	9	1542	1542	3084	1542

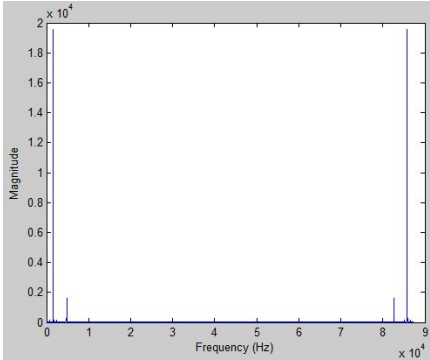
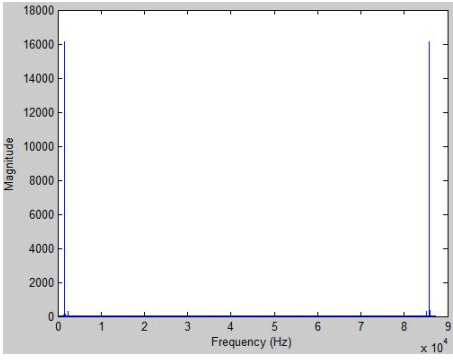
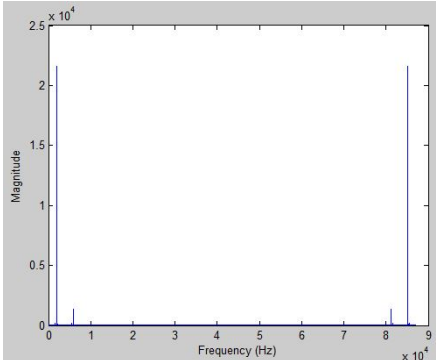
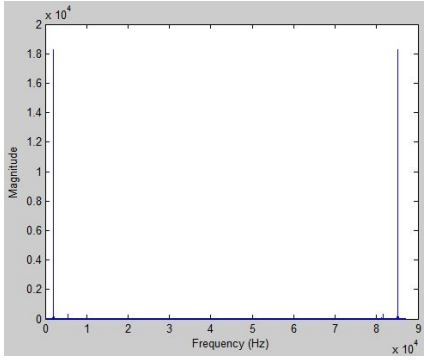
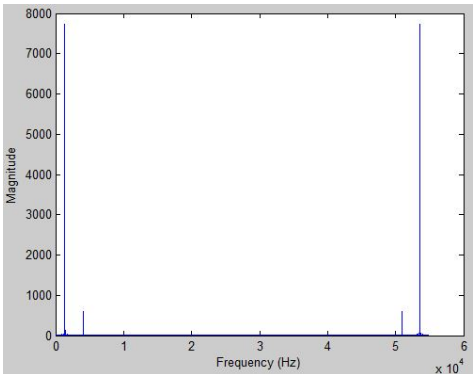
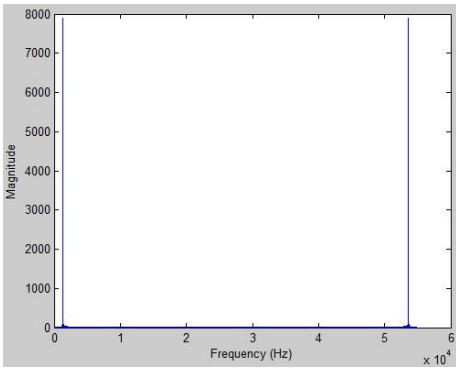
Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisish Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
8	1	1	2402	2402	4804	2402
	1	2	1999	1999	3998	1999
	1	3	1593	1593	3186	1593
	1	4	1187	1187	2374	1187
	1	5	781	781	1562	781
	1	6	376	376	752	376
	1	7	30	30	60	30
	1	8	436	436	872	436
	1	9	842	842	1684	842
	2	5	376	376	752	376
	2	7	436	436	872	436
	2	9	1247	1247	2494	1247
	3	7	842	842	1684	842
	3	8	1247	1247	2494	1247
	4	9	2059	2059	4118	2059

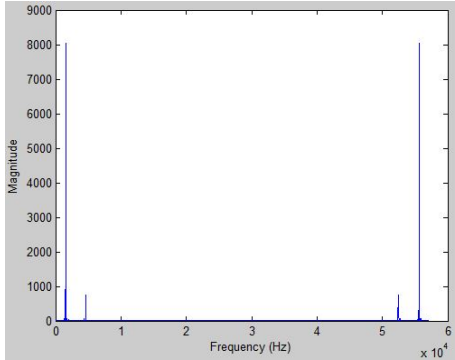
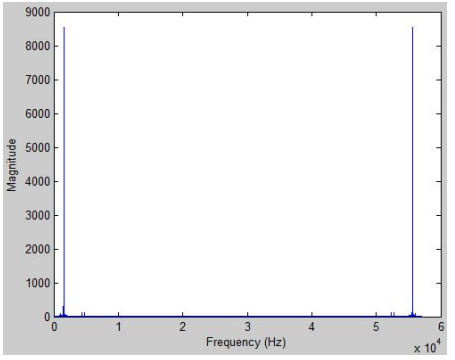
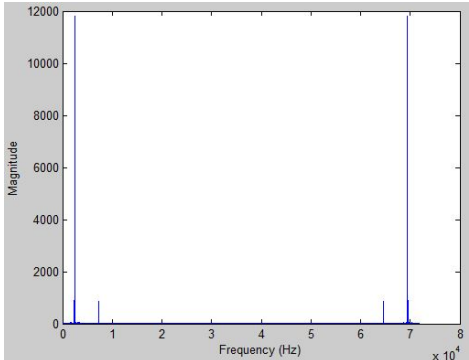
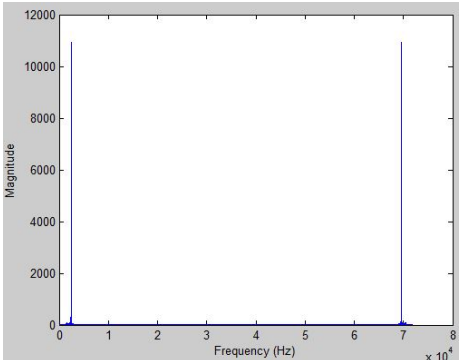
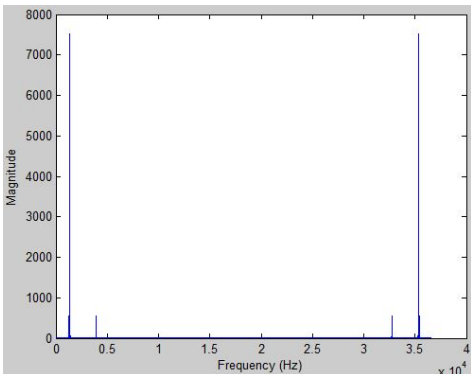
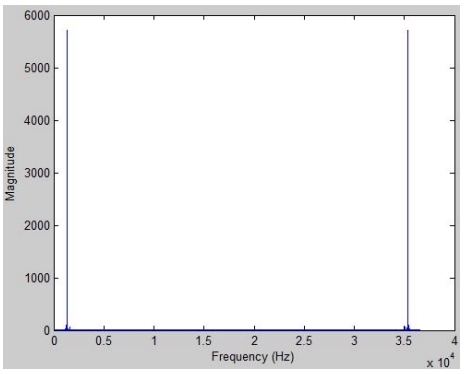
Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
9	1	1	2466	2466	4932	2466
	1	2	2051	2051	4102	2051
	1	3	1653	1653	3306	1653
	1	4	1220	1220	2440	1220
	1	5	805	805	1610	805
	1	6	389	389	778	389
	1	7	26	26	52	26
	1	8	442	442	884	442
	1	9	857	857	1714	857
	2	5	389	389	778	389
	2	7	442	442	884	442
	2	9	1273	1273	2546	1273
	3	7	857	857	1714	857
	3	8	1273	1273	2546	1273
	4	9	2103	2103	4206	2103

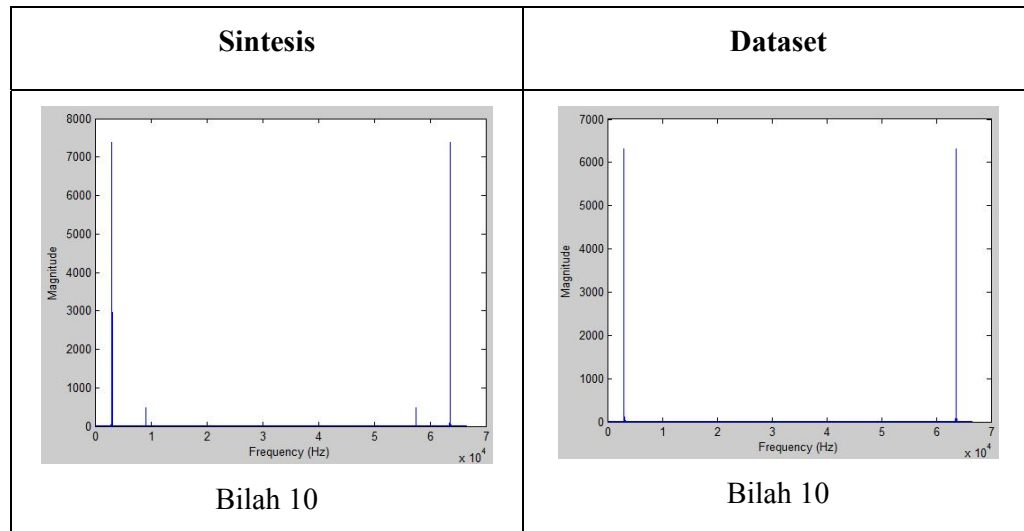
Bilah ke-	Perbandingan		Selisih Nilai Frekuensi Harmoni		Jumlah Selisish Seluruh Harmoni	Rata-Rata Selisih Seluruh Harmoni
	fc	fm	1	2		
10	1	1	1349	1349	2698	1349
	1	2	2631	2631	5262	2631
	1	3	2113	2113	4226	2113
	1	4	1595	1595	3190	1595
	1	5	1078	1078	2156	1078
	1	6	560	560	1120	560
	1	7	42	42	84	42
	1	8	476	476	952	476
	1	9	993	993	1986	993
	2	5	560	560	1120	560
	2	7	476	476	952	476
	2	9	1511	1511	3022	1511
	3	7	993	993	1986	993
	3	8	1511	1511	3022	1511
	4	9	2547	2547	5094	2547

Lampiran 5
Perbandingan Grafik Domain Frekuensi Hasil Sintesis dengan
Dataset Gamelan Gangsa Kantil Pengumbang

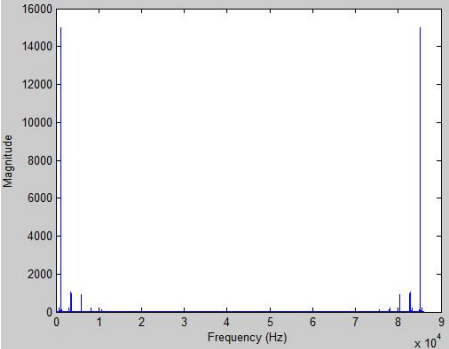
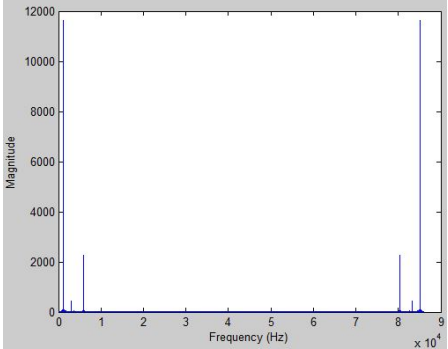
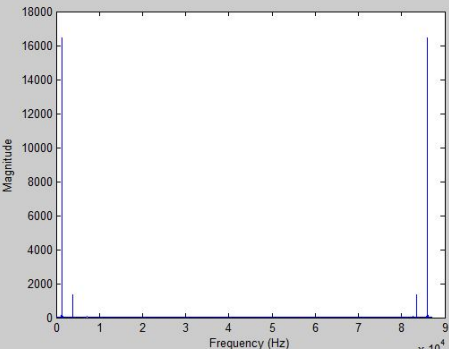
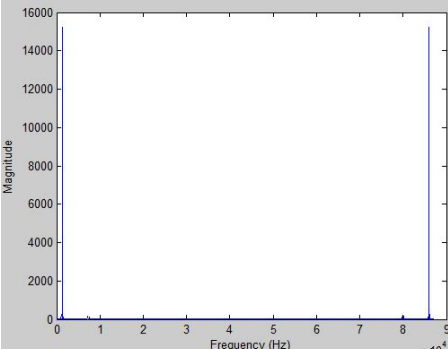
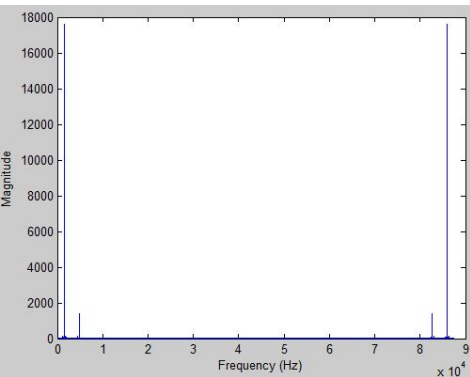
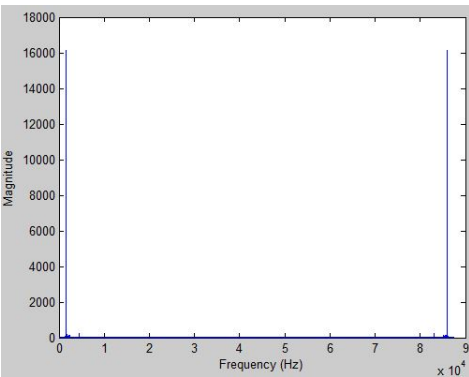
Sintesis	Dataset
 <p>Bilah 1</p>	 <p>Bilah 1</p>
 <p>Bilah 2</p>	 <p>Bilah 2</p>
 <p>Bilah 3</p>	 <p>Bilah 3</p>

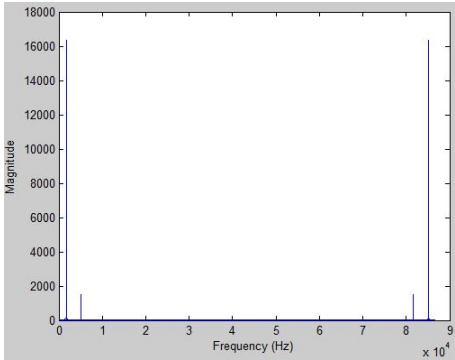
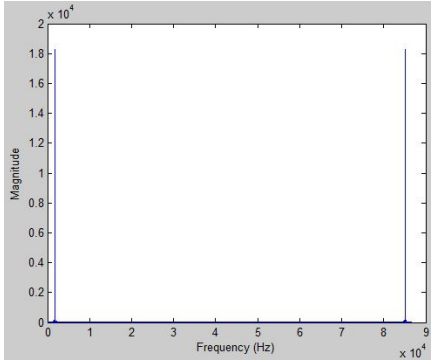
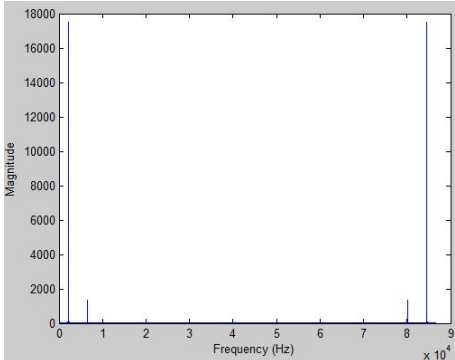
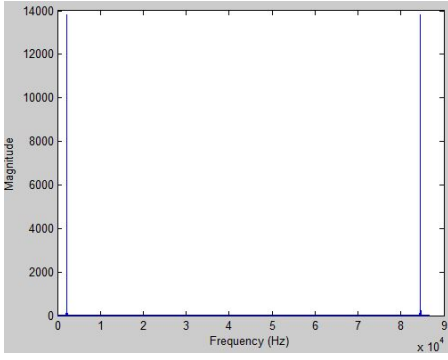
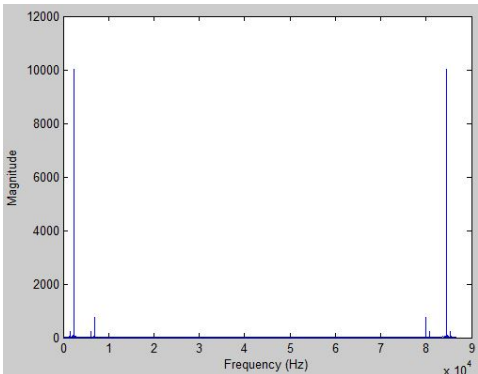
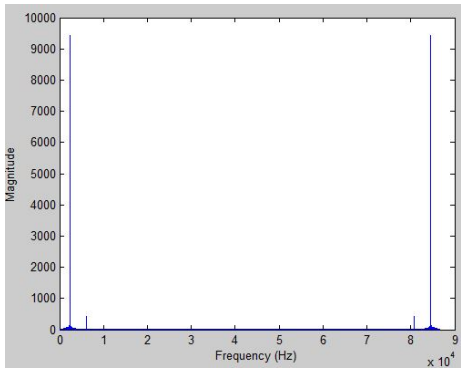
Sintesis	Dataset
 <p>Bilah 4</p>	 <p>Bilah 4</p>
 <p>Bilah 5</p>	 <p>Bilah 5</p>
 <p>Bilah 6</p>	 <p>Bilah 6</p>

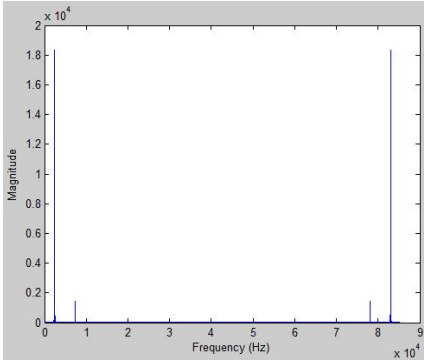
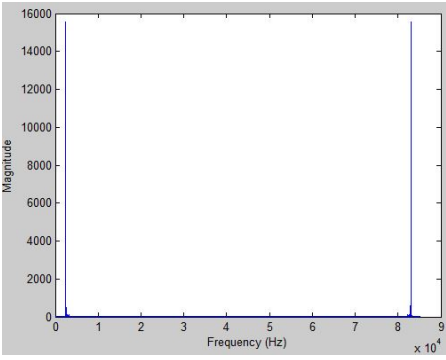
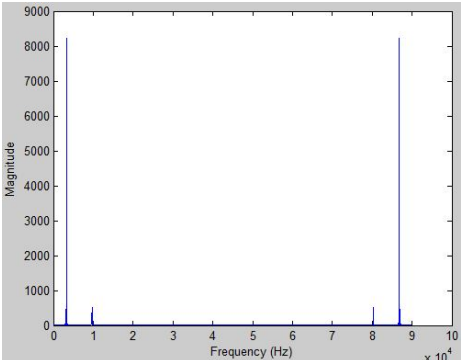
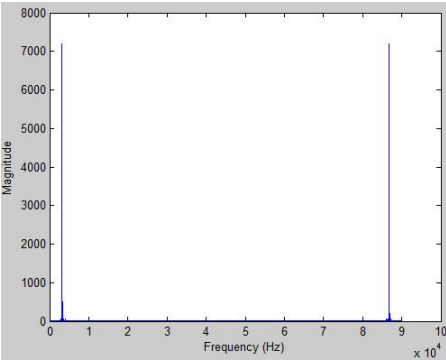
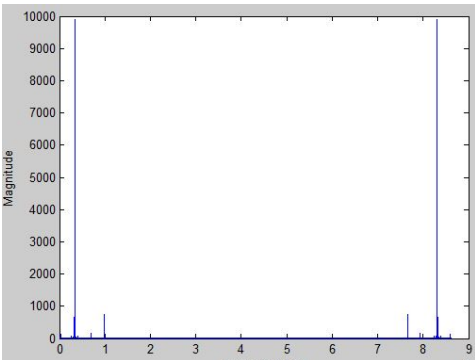
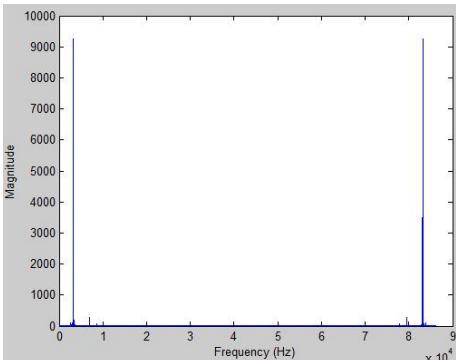
Sintesis	Dataset
 <p>Bilah 7</p>	 <p>Bilah 7</p>
 <p>Bilah 8</p>	 <p>Bilah 8</p>
 <p>Bilah 9</p>	 <p>Bilah 9</p>



Lampiran 6
Perbandingan Grafik Domain Frekuensi Hasil Sintesis dengan
Dataset Gamelan Gangsa Kantil Pengisep

Sintesis	Dataset
 <p>Bilah 1</p>	 <p>Bilah 1</p>
 <p>Bilah 2</p>	 <p>Bilah 2</p>
 <p>Bilah 3</p>	 <p>Bilah 3</p>

Sintesis	Dataset
 <p>Bilah 4</p>	 <p>Bilah 4</p>
 <p>Bilah 5</p>	 <p>Bilah 5</p>
 <p>Bilah 6</p>	 <p>Bilah 6</p>

Sintesis	Dataset
 <p>Bilah 7</p>	 <p>Bilah 7</p>
 <p>Bilah 8</p>	 <p>Bilah 8</p>
 <p>Bilah 9</p>	 <p>Bilah 9</p>

