

Pemodelan Isyarat Musik Berbasis pada Modulasi Frekuensi (FM)

Bondhan Winduratna, Adhi Susanto, Risanuri Hidayat
 Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, FT UGM
 Jl. Grafika 2, Yogyakarta 5281
 windurat@ugm.ac.id

Abstract—Music signal modelling has been playing an important role in many areas such as music transcription, music synthesizing, music signal quality enhancement and especially source coding related to our research context. The success of signal modeling is highly dependent on the use of assumptions that represent the important signal properties. Based on the togetherness in having harmonical components between the music signals and frequency modulated signals, a modelling music signal based on frequency modulation is adopted and developed. The proposed method works in the frequency domain and has three cascaded main processes, namely harmonic components extraction, FM parameters estimation and signal synthesis. The simulation results show the proposed method is successful to represent some music signal types in FM parameters.

Keywords: *signal, harmonic, modelling, frequency modulation*

Intisari—Pemodelan isyarat musik berperan penting dalam berbagai bidang, seperti transkripsi musik, sintesis musik, peningkatan kualitas isyarat musik dan khususnya penyandian sumber yang sangat erat berkaitan dengan kegiatan riset kita. Keberhasilan sebuah pemodelan sangat tergantung pada pemakaian asumsi-asumsi yang mewakili sifat-sifat penting isyarat. Berdasar kebersamaan sifat harmonis antara isyarat musik dan isyarat termodulasi frekuensi, sebuah metode pemodelan berbasis modulasi frekuensi diadopsi dan dikembangkan untuk mengestimasi dan mengekstrak parameter FM dari isyarat musik. Metode yang diusulkan bekerja di ranah frekuensi dan mempunyai tiga langkah pokok, yaitu, ekstraksi komponen harmonik, estimasi parameter FM dan sintesis isyarat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan telah berhasil dengan baik merepresentasikan berbagai jenis isyarat musik dalam parameter-parameter FM.

I. PENDAHULUAN

Untuk berbagai keperluan seperti penyandian sumber, modifikasi isyarat, pengolahan dan sintesis, representasi isyarat musik dalam sebuah fungsi atau isyarat lain dengan jumlah parameter yang efisien merupakan topik penelitian menarik selama beberapa dekade belakangan ini. Representasi isyarat secara parametris sering disebut juga pemodelan isyarat. Tingkat kesempurnaan dan efisiensi sebuah model isyarat sangat bergantung pada asumsi-asumsi yang dipakai dalam proses pemodelan. Asumsi-asumsi tersebut harus terkait erat dengan sifat-sifat penting isyarat. Melihat kesamaan sifat harmonis alami yang dimiliki isyarat musik dan isyarat termodulasi frekuensi, yaitu isyarat musik tersusun atas sinusoida-sinusoida yang frekuensinya mayoritas terstruktur secara harmonis [1] dan modulasi frekuensi juga mempunyai spektrum yang harmonis pula, penulis mencoba dalam penelitian ini untuk

memodelkan isyarat musik sebagai isyarat termodulasi frekuensi.

Penggunaan teknik modulasi frekuensi untuk menirukan isyarat musik pertama kali diusulkan oleh Chowling [2]. Hanya dengan menggunakan beberapa perangkat parameter FM yang disusun secara serial maupun paralel, Chowling telah berhasil mendemonstrasikan teknik sintesis isyarat audio yang baru. Seperangkat parameter FM yang sering disebut operator FM dan tersusun atas parameter amplitudo A_c , frekuensi modulator f_m , frekuensi pembawa f_c dan indeks modulasi I . Untuk menghargai penemuannya dan sekaligus melihat aspek ekonomi yang menjanjikan, Yamaha telah memproduksi *synthesizer DX7* yang berbasis pada teknik modulasi frekuensi. *Synthesizer DX7* sangat legendaris di dekade 70-an dan 80-an. Teknik sintesis musik dengan FM juga digunakan pada setiap PC sampai awal 2000-an. Lebih lanjut dalam rangka untuk mendapatkan tingkat kemiripan yang lebih baik dengan suara instrumen aslinya, teknik sintesis dengan modulasi frekuensi telah dikembangkan, seperti *complex frequency modulation* [3], *asymmetric frequency modulation* [4], *double frequency modulation* [5] dan *asymmetrical modulation waveform* [6]. Pengembangan-pengembangan tersebut berfokus pada meningkatkan kompleksitas pola sebaran spektrum untuk menambah warna suara yang dapat diperoleh. Secara umum teknik-teknik sintesis berbasis FM tersebut dikerjakan dengan mengatur nilai-nilai parameter FM secara coba-coba dan mengevaluasi hasil sintesis berdasar kemiripan pada persepsi telinga. Perkembangan teknik sintesis berbasis FM berikutnya berkonsentrasi pada metode untuk memilih nilai parameter FM yang sesuai. Secara prinsip optimasi penentuan parameter FM tetap dilakukan secara iteratif di ranah waktu. Perbedaan dengan metode sebelumnya adalah dalam teknik pengaturan parameter FM yang dikerjakan dengan algoritma komputasi iteratif sampai bentuk gelombang isyarat audio hasil sintesis mirip dengan isyarat audio asli. Terdapat berbagai algoritma iteratif yang dipakai, diantaranya adalah *Genetic Algorithm* [7] dan *Fuzzy Clustering Evolution* [8].

Pada penelitian ini, proses estimasi parameter FM dilakukan juga secara otomatis tetapi dikerjakan di ranah frekuensi. Estimasi dan penentuan parameter FM dilakukan dengan mencocokkan dan membandingkan spektrum komponen harmonik isyarat asli dan spektrum hasil sintesis untuk setiap *frame* waktu isyarat. Dengan demikian metode pemodelan yang diusulkan ini akan dapat mereplikasi isyarat musik asli di ranah frekuensi maupun diranah waktu secara baik.

A. Landasan Teori

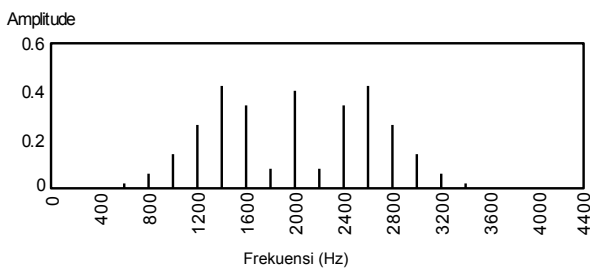
Teknik modulasi frekuensi pada awalnya digunakan dalam telekomunikasi oleh Amstron [9] untuk memperbaiki kualitas suara pada teknik modulasi sebelumnya, yaitu modulasi amplitude. Isyarat termodulasi frekuensi (FM) dapat dideskripsikan melalui persamaan (1),

$$x(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + I \cos(2\pi f_m t)) \quad (1)$$

dengan amplitude A_c , frekuensi pembawa f_c , frekuensi modulasi f_m dan indeks modulasi I . Selanjutnya isyarat FM dengan pertolongan fungsi Bessel jenis pertama $J_n(I)$ dapat dirumuskan sebagai deret Fourier (2)

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(I) A_c \sin[(2\pi f_c + n2\pi f_m)t] \quad (2)$$

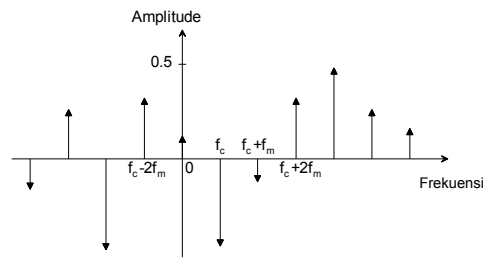
Pada persamaan (2) dapat diamati bahwa isyarat FM dapat mempunyai lebar spektrum yang tidak terbatas, sehingga dalam implementasinya pada telekomunikasi terdapat pembatasan lebar bidang melalui teknik *narrow band* FM. Gambar 1 memperlihatkan spektrum isyarat FM yang berbentuk simetris terhadap frekuensi pembawa f_c .



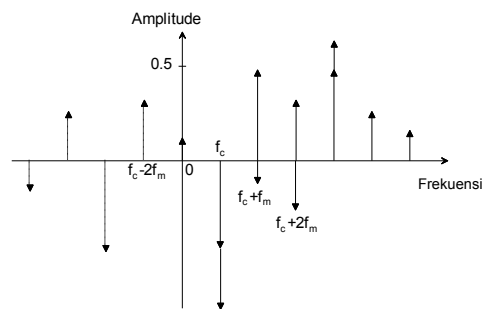
Gambar 1. Spektrum FM dengan $f_c = 2000$ Hz dan $f_m = 200$ Hz.

Kalau lebar bidang spektrum isyarat FM yang tidak terbatas dianggap mengganggu dalam dunia telekomunikasi, lain hal hanya dalam pandangan Chowing [2]. Lebarnya bidang spektrum isyarat FM yang luas justru menawarkan alternatif yang sangat menarik untuk sintesis isyarat musik. Spektrum isyarat musik yang kompleks dapat diproduksi hanya dengan sejumlah parameter FM yang relatif sedikit. Untuk meraih derajat kompleksitas spektrum yang tinggi, Chowing menempatkan frekuensi pembawa f_c sama atau lebih rendah dibanding frekuensi modulasi f_m . Hal ini tentunya berkebalikan dengan penggunaan teknik modulasi frekuensi pada telekomunikasi. Karena frekuensi pembawa f_c terletak dekat dengan sumbu vertikal, maka sebagian spektrum FM sebelah kiri akan tersebar di sisi negatif sumbu frekuensi. Oleh sumbu vertikal, bagian spektrum yang terletak di sisi negatif akan dicerminkan kembali kearah sisi positif sumbu frekuensi. Gambar 2.a. merupakan ilustrasi pembangkitan spektrum isyarat FM menurut persamaan (2) dengan frekuensi pembawa f_c yang sama tinggi dengan frekuensi modulasi f_m . Pada Gambar 2.b. dapat dilihat bahwa garis spektrum frekuensi negatif akan direfleksikan balik dengan polaritas magnitude yang terbalik ke arah frekuensi positif. Selain mengalami proses pencerminan, komponen spektrum frekuensi negatif juga akan dijumlah dengan komponen spektrum positif pada frekuensi yang sama.

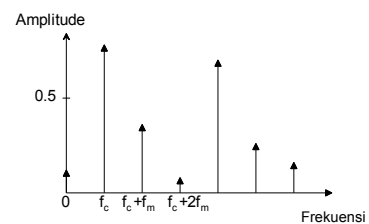
Gambar 2.c. memperlihatkan spektrum garis hasil modulasi frekuensi yang diusulkan Chowing.



Gambar 2.a. Spektrum garis modulasi frekuensi dengan garis spektrum negatif.



Gambar 2.b. Garis spektrum negatif direfleksikan ke arah frekuensi positif.



Gambar 2.c. Spektrum garis modulasi frekuensi.

II. METODE PENELITIAN

A. Bahan

Isyarat audio monoaural yang dicuplik dengan frekuensi 8 kHz dan dikuantisasi secara tidak seragam 8 bit/cuplikan atau seragam 16 bit/cuplikan.

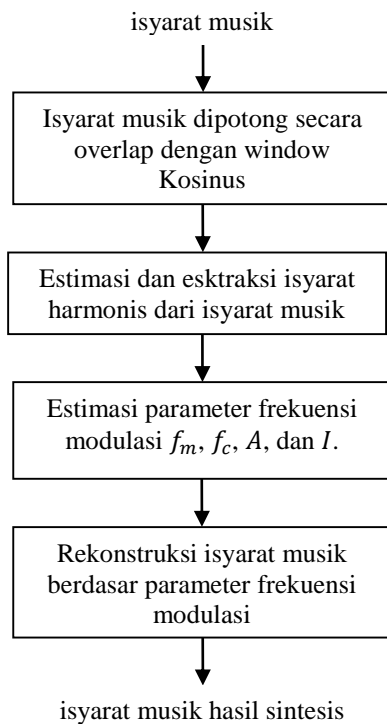
B. Alat

- Komputer dengan sistem operasi Linux atau derivatnya
- Software : GNU C compiler , Octave

C. Pelaksanaan Penelitian

Analisis isyarat musik berbasis modulasi frekuensi dikerjakan dalam empat tahapan. Secara garis besar estimasi parameter FM dapat digambarkan diagram blok seperti dalam gambar 3.

Langkah pertama adalah pemotongan isyarat input dengan jendela kosinus sepanjang 32 ms atau setara dengan 256 cuplikan. Jendela kosinus diletakkan secara *overlapped* setengah panjang jendela untuk mengurangi *block effect* akibat proses pemotongan isyarat.

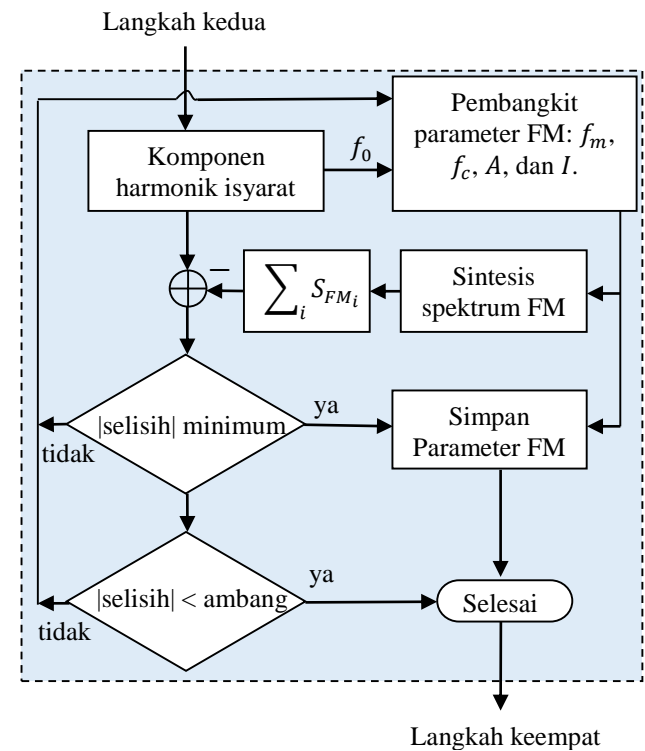


Gambar 3. Prosedur analisis isyarat musik berbasis modulasi frekuensi.

Langkah kedua merupakan langkah pemisahan komponen harmonik dengan komponen inharmonik berdasar pada [10]. Sebelum komponen harmonik dapat diekstraksi, sebuah proses estimasi dan ekstraksi komponen sinusoida isyarat harus dikerjakan seperti pada [11]. Komponen harmonik diestimasi dan dipisahkan dari keseluruhan komponen sinusoida yang telah berhasil diekstraksi. Dalam ekstraksi komponen harmonik diasumsikan bahwa selalu hanya terdapat satu sumber harmonik dalam satu *frame*. Seandainya terdapat lebih dari satu sumber harmonik, tetap diasumsikan bahwa hanya terdapat satu perangkat sumber harmonik saja. Asumsi ini dipakai untuk menyederhakan kompleksitas analisis isyarat dan estimasi parameter FM. Hasil dari tahapan ini berupa komponen harmonik isyarat.

Langkah ketiga merupakan proses estimasi parameter FM dan merupakan inti dari penelitian ini. Strategi yang dibuat untuk keberhasilan estimasi parameter FM yang diusulkan adalah berdasar pada hasil kompromi dari dua realita alami yang bersifat bertolak belakang. Di satu sisi, pola spektrum FM yang diproduksi dengan satu perangkat parameter FM mempunyai keterbatasan vareasinya dan di sisi lain, spektrum isyarat musik mempunyai vareasi pola spektrum yang tidak terbatas. Sehingga secara umum untuk merepresentasikan spektrum isyarat musik diperlukan lebih dari satu operator FM atau seperangkat parameter FM. Untuk menghemat komputasi, operator FM yang satu dengan operator FM yang lain diestimasi secara sekuensial dan dikerjakan dengan metode *analysis by*

sintesis. Proses estimasi parameter FM didiskripsikan oleh diagram alir pada Gambar 4.



Gambar 4. Estimator parameter FM yang diusulkan.

Frekuensi dasar f_0 dari komponen harmonik dipakai untuk menentukan tinggi atau rendahnya frekuensi modulasi f_m dan frekuensi pembawa f_c . Karena teknik modulasi frekuensi akan dipekerjakan sebagai sumber spektrum harmonis, maka perbandingan frekuensi pembawa dan frekuensi modulasi berupa bilangan bulat. Selanjutnya hasil pembangkitan parameter FM digunakan untuk menyintesis spektrum FM. Pada awal estimasi, spektrum FM hasil sintesis langsung dipakai untuk mengurangi spektrum harmonik asli. Parameter FM diatur secara iteratif dan dipilih untuk jumlah nilai selisih garis spektrum yang paling minimum. Seandainya selisih setiap garis spektrum belum berada dibawah nilai ambang yang telah ditentukan, parameter FM berikutnya akan diestimasi dengan cara yang sama, hanya saja spektrum pengurang yang dipakai sekarang berasal dari jumlahan hasil sintesis spektrum FM yang baru dengan spektrum FM hasil sintesis parameter FM yang telah dipilih sebelumnya. Proses estimasi parameter FM ini berulang secara sekuensial sampai sisa selisih setiap garis spektrum berada dibawah nilai ambang yang ditentukan, yaitu 1 dan 0,01.

Langkah terakhir adalah proses rekonstruksi isyarat dari parameter FM yang telah berhasil diestimasi. Karena estimasi satu set parameter FM berjalan secara sekuensial terhadap parameter FM sebelumnya, maka pada rekonstruksi isyarat operator-operator FM dirangkai secara parallel agar diperoleh kembali akumulasi spektrum seperti pada saat estimasi parameter FM.

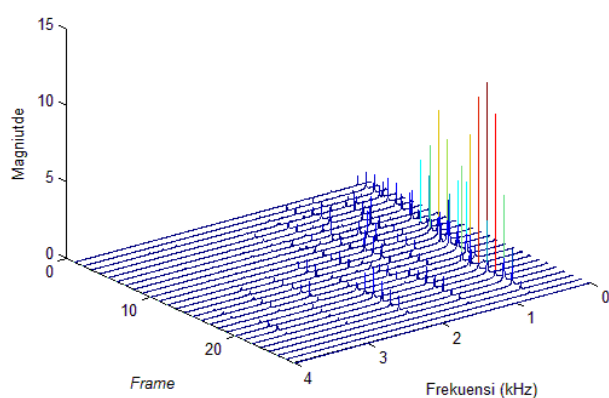
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Isyarat musik yang dipakai dalam simulasi berasal dari instrumen musik tunggal seperti Klarinet, Harp, Trumpet

dan Horn, dan isyarat musik ansambel seperti Haendel dan Gamelan. Keseluruhan isyarat dicuplik dengan frekuensi cuplik 8 kHz dan dikuantisasi dengan resolusi 16 bit/cuplikan. Evaluasi tingkat keberhasilan penelitian dilakukan dengan membandingkan isyarat asli dengan isyarat hasil rekonstruksi pada ranah frekuensi dan waktu. Di ranah frekuensi isyarat ditampilkan dalam spektrum dan diranah waktu dipresentasikan dengan bentuk gelombang dan perbedaan kuantitatif dinyatakan dalam MSE.

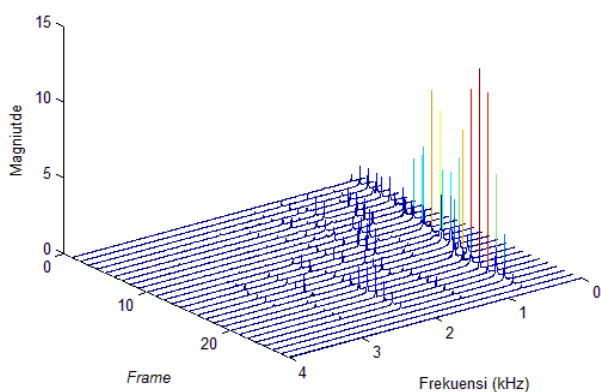
A. Pengamatan di Ranah Frekuensi

Pengamatan di ranah frekuensi dirasa sangat perlu karena keseluruhan analisis isyarat yang dikerjakan dalam ranah frekuensi. Proses evaluasi dikerjakan dengan membandingkan spektrum isyarat asli, komponen harmonik, isyarat hasil rekonstruksi dengan jumlah operator FM yang rendah dan jumlah operator FM yang tinggi.



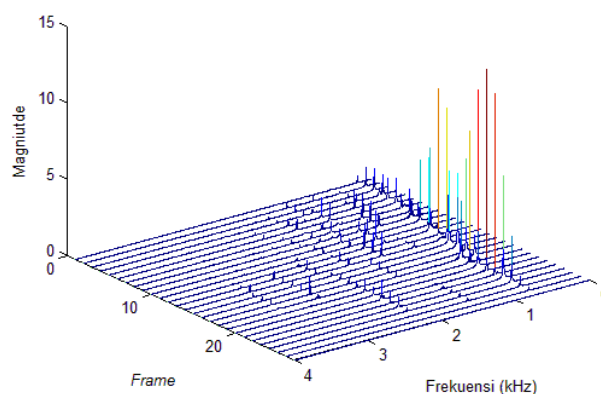
Gambar 5 Spektrum isyarat Klarinet asli.

Gambar 5 merupakan spektrum isyarat Klarinet asli. Struktur letak frekuensi terlihat harmonis. Frekuensi komponen harmonik tertata rapi disetiap kelipatan bulat frekuensi dasar. Frekuensi dasar mempunyai magnitude yang terbesar merupakan ciri khas untuk suara instrumen tiup. Dibanding dengan pada Gambar 6, Konstelasi spektrum komponen harmoniknya secara numeris maupun optis tidak berbeda jauh. Hal ini menunjukkan bahwa isyarat Klarinet mempunyai sifat harmonis yang kuat dan pada saat terjadi penghilangan komponen inharmonik tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap isyarat aslinya.

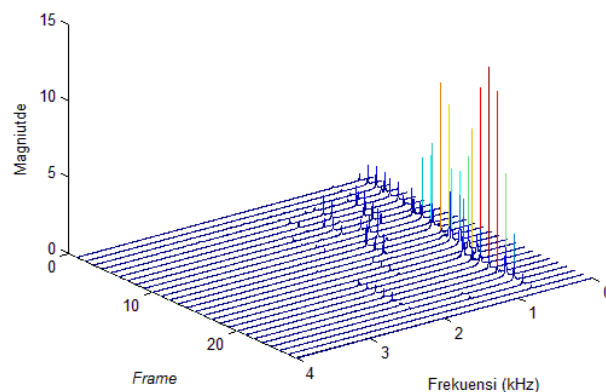


Gambar 6 Spektrum komponen harmonik isyarat Klarinet

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan spektrum isyarat hasil rekonstruksi dari parameter FM yang telah berhasil diestimasi dengan nilai ambang yang berbeda. Untuk Gambar 7 dipakai nilai ambang 1 dan untuk Gambar 8 digunakan nilai ambang 0,01. Perbedaan nilai ambang menyebabkan jumlah operator yang dihasilkan menjadi berbeda dan kesempurnaan spektrum yang berlainan. Perbedaan ketidak lengkapan spektrum hasil sintesis dapat dilihat dengan membandingkan Gambar 7 dan Gambar 8. Jumlah komponen harmonik pada Gambar 8 nampak lebih sedikit dibanding Gambar 7.



Gambar 7. Spektrum isyarat Klarinet hasil rekonstruksi dengan jumlah operator FM yang tinggi.



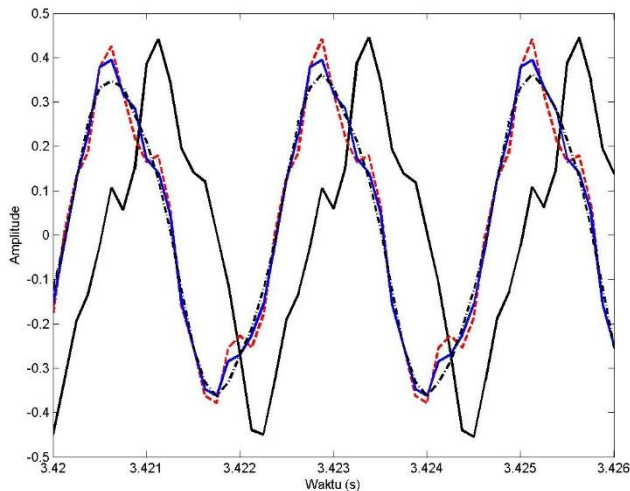
Gambar 8. Spektrum isyarat Klarinet hasil rekonstruksi dengan jumlah operator FM yang rendah.

Untuk isyarat musik tiup yang lain, seperti trumpet dan horn, mempunyai karakter yang mirip dengan isyarat Klarinet. Spektrum frekuensinya terpahat jelas pada alur harmonis di sumbu frekuensinya. Sedangkan isyarat Harp mempunyai komponen inharmonik yang relatif tinggi dibanding isyarat musik tiup. Komponen inharmonik yang muncul pada isyarat harp dikarena isyarat Harp dihasilkan dari proses pemukulan. Sedangkan isyarat Handel dan gamelan mempunyai komponen inharmonik yang tetinggi. Kedua isyarat tersebut merupakan isyarat ensemble dari beberapa musik instrumen. Kadar komponen inharmonik yang tertinggi dikarenakan akibat asumsi yang dipakai dalam penelitian ini, yaitu pada setiap *frame* hanya terdapat satu sumber harmonik. Akibatnya ada beberapa komponen sinusoida dari sumber-sumber harmonik lain yang tidak tercakup dalam representasi sumber harmonik tunggal yang diekstrak.

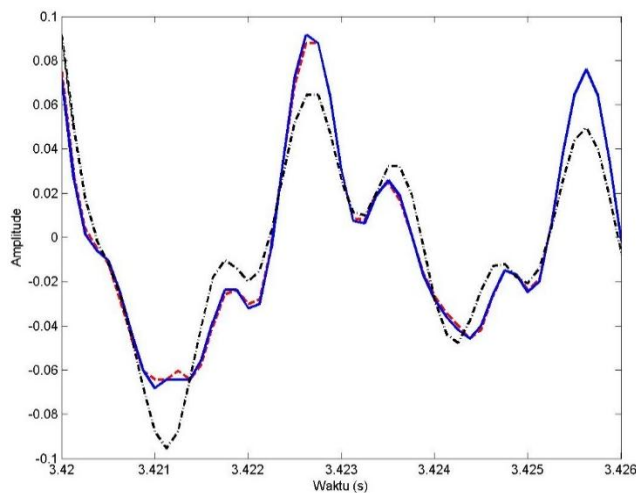
B. Pengamatan di Ranah Waktu

Pengamatan dan evaluasi di ranah waktu dilakukan selain dengan membanding secara optis bentuk gelombang

juga dengan mengukur nilai selisih perbedaan antara isyarat komponen harmonik dengan isyarat hasil rekonstruksi dalam skala MSE. Gambar 9 menunjukkan bentuk gelombang isyarat Klarinet asli, komponen harmonik, hasil rekonstruksi dengan jumlah operator banyak dan jumlah operator FM sedikit. Dalam gambar 9 dapat dilihat bahwa isyarat asli mempunyai beda fase dengan isyarat hasil analisis maupun sintesis. Hal ini menyebabkan pengukuran nilai MSE hanya dilakukan pada isyarat hasil sintesis terhadap komponen harmonik isyarat.



Gambar 9. Bentuk gelombang isyarat Klarinet asli (pejal hitam), komponen harmonik (garis pejal biru), sintesis dengan parameter FM jumlah tinggi (garis putus merah) dan sintesis dengan parameter FM jumlah rendah (garis putus hitam).



Gambar 10. Perbandingan bentuk gelombang: komponen harmonik (garis pejal biru), sintesis dengan parameter FM jumlah tinggi (garis putus merah) dan sintesis dengan parameter FM jumlah rendah (garis putus hitam).

Gambar 10 memperlihatkan bentuk gelombang sesaat dari komponen harmonik, isyarat hasil rekonstruksi dengan jumlah operator tinggi dan dengan jumlah operator rendah. Dengan bentuk gelombang komponen harmonik, hasil sintesis dengan nilai ambang 0,01 mempunyai kemiripan yang lebih baik dibanding dengan hasil sintesis dengan nilai ambang 1. Kemiripan yang lebih baik tersebut tetapi harus dibeli dengan penggunaan jumlah operator FM yang lebih banyak. Selain membandingkan bentuk gelombang,

pengamatan di ranah waktu juga menghasilkan nilai rerata kebutuhan jumlah operator FM dan nilai MSE untuk nilai ambang kesalahan 1 dan 0,01. Tabel 1 memuat hasil pengukuran untuk nilai ambang 1 dan Tabel 2 memperlihatkan hasil pengukuran untuk nilai ambang 0,01.

Tabel 1. Jumlah Operator FM dan nilai MSE untuk nilai ambang 1,0.

Isyarat	Harga ambang = 1,0	
	Jumlah operator FM	MSE
Klarinet	1,2249	4,6652e-04
Harp	2,7785	2,4224e-05
Trumpet	1,8630	0,0014
Gamelan	7,5485	3,0842e-04
Horn	1,1330	8,2550e-04
Haendel	6,7400	2,2998e-05

Tabel 2. Jumlah Operator FM dan nilai MSE untuk nilai ambang 0,01.

Isyarat	Harga ambang = 0,01	
	Jumlah operator FM	MSE
Klarinet	3,7197	1,7789e-04
Harp	5,3468	2,9034e-06
Trumpet	3,4452	6,4223e-05
Gamelan	11,1520	6,9543e-05
Horn	4,5138	4,1649e-06
Haendel	12,6035	2,9354e-06

Dari Tabel 1 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa isyarat Gamelan dan Haendel memerlukan jumlah operator FM tertinggi untuk setiap nilai ambang yang ditentukan. Hal ini disebabkan karena spektrum komponen harmonik kedua isyarat mempunyai dinamika dan kompleksitas yang tinggi dibanding isyarat instrumen tunggal seperti Klarinet, Harp, Trumpet dan Horn.

IV. KESIMPULAN

Sebuah pemodelan isyarat musik berbasis pada teknik modulasi frekuensi di ranah frekuensi telah berhasil dikerjakan dengan baik. Analisis dan replikasi spektrum isyarat musik di ranah frekuensi untuk setiap *frame* waktu memberikan hasil pemodelan yang akurat di ranah frekuensi dan waktu.

Isyarat musik yang berasal dari satu instrumen direpresentasikan dengan jumlah parameter FM yang lebih sedikit dibanding isyarat musik campuran dari beberapa instrumen. Untuk isyarat musik dengan sifat harmonis yang kuat, seperti Klarinet, Horn dan Trumpet, pemodelan dapat dikerjakan secara baik dan memerlukan jumlah parameter FM yang minimal.

Jumlah parameter FM yang diperlukan dalam pemodelan berbanding lurus dengan tingkat kompleksitas struktur harmonik isyarat dan tingkat kesempurnaan pemodelan. Penentuan jumlah parameter yang optimal untuk suatu kadar kesempurnaan hasil pemodelan yang dirasa cukup, masih problematis, karena sensitivitas telinga terhadap suara tergantung pada nilai kebersamaan bunyi secara relatif antara sinusoida-sinusoida yang

bertetangaan dalam sumbu frekuensi. Sehingga nilai ambang kesalahan untuk setiap garis spektrum harus ditentukan sesuai kondisi garis-garis spektrum disekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Eska, "Schall und Klang: Wie und was wir hören", Birkhäuser Verlag, 1997.
- [2] J. Chowning, , "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation", *Journal of the Audio Engineering Society* **21** (7), 1973
- [3] B. Schottstaedt, "The Simulation of Natural Instrument Tones Using Frequency Modulation with a Complex Modulating Wave", *Computer Music Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 46-50, 1977.
- [4] J.-P. Palamin, P. Palamin, A. Ronveaux, "A Method of Generation and Controlling Musical Asymmetrical Spectra", *Journal Audio Eng. Soc.*, Vol. 36, pp. 671-685, Sept. 1988.
- [5] B.T.G. Tan, S.L. Gan, "Real-Time Implementation of Double Frequency Modulation (DFM) Synthesis", *Journal Audio Eng. Soc.*, 1994.
- [6] P. E. Etchemendy, M. C. Eguia and B. Mesz, "Principal pitch of frequency-modulated tones with asymmetrical modulation waveform: A comparison of model", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135, 2014.
- [7] Tan, B. T. G. and S. M. Lim, "Automated Parameter Optimisation for Double Frequency Modulation Synthesis Using the Genetic Annealing Algorithm", In: *Journal of Audio Engineering Society*, 44, (1/2) pp 3-15. 1996.
- [8] Mitchell, T. J. and Sullivan, C. W. "Frequency Modulation Tone Matching Using a Fuzzy Clustering Evolution", In: *Proceedings of the 118th Convention of the Audio Engineering Society*. Barcelona, Preprint 6366, 2005.
- [9] E. Amstrong, "A method of reducing disturbances in radio signaling by a system of frequency modulation", *Proceeding of the Institute of Radio Engineers*, , vol. 24, number 5, pp. 689-740, May 1936.
- [10] B. Winduratna, A. Susanto dan R. Hidayat, "Ekstraksi Komponen Sinusoida dari Isyarat Audio" ,Annual Engineering Seminar, FT UGM, Februari 2014
- [11] B. Winduratna, A. Susanto dan R. Hidayat, "Ekstraksi Komponen Harmonik dari Isyarat Audio" ,Annual Engineering Seminar, FT UGM, Februari 2015