

# Estimasi Nada pada Isyarat Klarinet

Bondhan Winduratna

Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, FT UGM

Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281

windurat@ugm.ac.id

**Abstract**—Score estimation on music signals has been playing an important role in many areas such as music transcription, music synthesizing, tuning on musical instruments and etc. The methods of estimation music score on music signal has been developed in time or frequency domain. The proposed method works on frequency domain and based on fundamental frequency. Traditionally, the similar methods use fourier transform to estimate the frequency components of signal. In this research, the frequency estimation is performed sequentially using an accurate single frequency estimation. The proposed method works in the frequency domain and has three cascaded main processes, namely sinusoid components extraction, fundamental frequency estimation and score estimation. The simulation results show the proposed method is successful to represent Clarinet music signal in score note.

**Keywords:** score, fundamental frequency, harmonics, frequency estimation

**Intisari**—Estimasi nada pada isyarat musik berperan penting dalam berbagai bidang, seperti transkripsi musik, sintesis musik, penalaan alat musik dan sebagainya. Metode estimasi nada pada isyarat musik sudah berkembang jauh dan bekerja di ranah waktu atau frekuensi. Metode yang diusulkan disini merupakan metode yang bekerja di ranah frekuensi dan penentuan nada berbasis pada frekuensi dasar. Sementara secara tradisional, metode yang sejenis memperkejakan tranformasi Fourier untuk mengestimasi frekuensi penyusun isyarat. Pada penelitian ini, dicoba dengan menggunakan metode estimasi frekuensi yang mempunyai akurasi lebih baik. Metode yang diusulkan bekerja di ranah frekuensi dan mempunyai tiga langkah pokok, yaitu ekstraksi komponen harmonik, estimasi frekuensi dasar dan estimasi nada. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan telah berhasil dengan baik menampilkan nada isyarat musik klarinet.

**Kata kunci:** nada, frekuensi dasar, harmonik, estimasi frekuensi

## I. PENDAHULUAN

Untuk berbagai keperluan seperti sintesis musik, transkripsi musik, kalibrasi nada pada alat musik atau analisis isyarat musik secara umum, estimasi nada pada isyarat musik merupakan topik penelitian menarik selama beberapa dekade belakangan ini. Representasi isyarat musik dalam nada-nada pada transkrip memerlukan langkah estimasi nada.

Anatomi frekuensi isyarat musik memperlihatkan bahwa mayoritas isyarat musik mempunyai spektrum frekuensi harmonis, yaitu spektrum yang tersusun atas frekuensi dasar dan frekuensi harmonik yang merupakan kelipatan bulat frekuensi dasar. Komponen frekuensi harmonik disebut sebagai *partial tones* dan merupakan salah satu komponen yang menentukan *timbre* (warna

suara) [1]. Komponen frekuensi dasar disebut *pitch* dan frekuensi dasar menentukan nada. Di ranah waktu, nada dapat direpresentasikan oleh periode dasar isyarat musik. Di ranah frekuensi, nada dikenal sebagai frekuensi dasar  $f_0$ . Dengan demikian nada isyarat musik dapat diestimasi baik dari periode dasar maupun frekuensi dasar [2].

Meskipun secara mayoritas isyarat musik bersifat harmonis, tetapi pada realitanya frekuensi-frekuensi harmonik (*partial tone*) tidak secara bulat utuh sebagai kelipatan frekuensi dasar. Pergeseran letak frekuensi harmonik terhadap kelipatan bulat frekuensi dasar dapat terjadi secara linear, eksponensial atau acak dan sangat tergantung pada jenis alat musik yang menghasilkan isyarat musik. Ketidak sempurnaan letak frekuensi harmonik yang tergeser menyebabkan tantangan dalam pengembangan metode estimasi frekuensi dasar. Sebagai akibatnya metode estimasi frekuensi dasar berkembang secara beragam. Diantaranya adalah sebagai berikut: metode yang berbasis pada perhitungan autokorelasi [3], metode yang berbasis AMDF (*Average Magnitude Difference Function*) [4], metode yang berdasar hitungan cepstrum [5] atau di ranah frekuensi [6][7][8].

Di ranah frekuensi, frekuensi dasar diestimasi dari spektrum isyarat. Komponen frekuensi dari spektrum dapat diperoleh dengan berbagai cara. Secara tradisional, estimasi frekuensi dikerjakan dengan pertolongan transformasi Fourier diskret (DFT) dan derivatnya. Metode tradisional ini selain mempunyai kemampuan untuk mengestimasi frekuensi-frekuensi yang dipunyai isyarat secara serentak, juga mempunyai kelemahan pada aspek resolusi di ranah frekuensi. Pada metode ini terdapat adanya *trade off* antara resolusi di ranah frekuensi dan di ranah waktu. Terdapat banyak metode yang telah dikembangkan untuk mendapatkan hasil estimasi frekuensi yang lebih baik dibanding sekedar menggunakan hasil perhitungan DFT dengan panjang data terbatas. Di antaranya adalah metode-metode yang berbasis hitungan matriks dan statistik. Pisarenko [9] memperlihatkan penentuan frekuensi-frekuensi isyarat melalui pertolongan *eigenvector* dari matriks autokorelasi. PHD (*Pisarenko Harmonic Decomposition*) yang sangat sensitif terhadap derau diperbaiki pada aspek akurasi dan keandalan oleh Schmidt [10] dengan MUSIC, oleh Johnson dan DeGraaf [11] dengan metode EV (*EigenVector*) dan oleh Kumaresan dan Tufts [12] dengan metode MNA (*Minimum Norm Algorithm*). Ketiga metode perbaikan untuk PHD mengeksplorasi fakta bahwa isyarat dan *subspace* derau saling orthogonal. Hal yang membedakan antar ketiganya adalah cara mendistribusikan derau di *subspace*. Terdapat dua alasan teknis yang menyebabkan PHD, MUSIC, EV dan MNA tidak digunakan dalam penelitian ini. Pertama

jumlah frekuensi pada spektrum isyarat harus sudah diketahui terlebih dahulu, sedang isyarat musik mempunyai spektrum dengan dinamika jumlah frekuensi yang sangat tinggi. Selain itu metode-metode tersebut juga memerlukan beban komputasi yang berat. Pada penelitian ini digunakan metode estimasi frekuensi spektrum tidak serentak alias satu persatu secara *heterodyne* [13][14]. Metode estimasi frekuensi tunggal [15] yang cepat dan mempunyai akurasi yang tinggi dipakai secara iteratif pada estimasi frekuensi spektrum dalam penelitian ini. Hal inilah yang membedakan penelitian ini dengan metode-metode yang sejenis, seperti pada [16][17]. Melalui penggunaan estimator frekuensi yang akurat diharapkan hasil estimasi nada akan akurat, sehingga hasil penelitian ini dapat berguna selain untuk transkripsi isyarat musik juga untuk bidang penalaan alat musik.

A. Landasan Teori

1.1 Isyarat Suara dan Isyarat Musik:

Secara umum isyarat suara (audio) dapat diformulasikan dengan persamaan (1). Isyarat suara  $x(t)$  tersusun dari komponen-komponen sinusoid dengan amplitude  $A_n$ , frekuensi  $f_n$  dan fase  $\theta_n$  yang berbeda. Frekuensi  $f_n$  tersebar sembarang di sepanjang sumbu frekuensi.

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \tag{1}$$

Isyarat musik termasuk dalam bagian dari isyarat suara (audio). Secara garis besar, yang membedakan isyarat isyarat suara dengan isyarat musik adalah struktur letak frekuensi  $f_n$ . Sementara isyarat suara dapat mempunyai frekuensi  $f_n$  yang sembarang, mayoritas isyarat musik mempunyai frekuensi yang tersusun rapi secara harmonis. Frekuensi-frekuensi isyarat musik terletak dengan jarak yang sama di sepanjang sumbu frekuensi. Jarak yang memisahkan frekuensi-frekuensi tersebut dikenal sebagai frekuensi dasar  $f_0$  dan menentukan tinggi dan rendah dari sebuah nada yang dihasilkan oleh alat musik. Isyarat music  $x_m(t)$  dapat direpresentasikan melalui persamaan (2) dengan  $n$  adalah bilangan bulat positif.

$$x_m(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n) \tag{2}$$

1.2 Ekstraksi Komponen Sinusoid:

Ekstraksi komponen sinusoid dikerjakan dengan dua tahapan berdasar pada [13]. Pada tahapan pertama estimasi spektrum frekuensi dikerjakan dengan metode *heterodyne* dan pada tahapan kedua estimasi amplitude dan phase dilaksanakan dengan metode korelasi silang.

1.2.1 Estimasi Frekuensi

Pelaksanaan estimasi frekuensi secara iteratif dengan cara *heterodyne* memakai estimator frekuensi tunggal dengan akurasi tinggi dari Kay [15]. Estimator ini bekerja dengan prinsip regresi linier di ranah waktu. Isyarat diskret  $x(n)$  mengandung sebuah sinusoid kompleks dengan frekuensi yang tidak diketahui dan derau gaussian putih dengan varians  $[z(n)] = E\{[z(n)]^2\} = \sigma_z^2$ .

$$x(n) = A e^{j(\omega_0 n + \theta)} + z(n) \tag{2}$$

dengan  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

Parameter-parameter penyusun sinusoid kompleks tunggal  $x(n)$  adalah amplitude  $A$ , frekuensi  $\omega_0$ , dan fase  $\theta$ . Sedang derau  $z(n)$  mempunyai komponen magnitude  $b(n)$  dan argumen fase  $u(n)$ . Pada SNR yang tinggi,  $b(n)$  dapat diabaikan dan persamaan (2) dapat ditulis menjadi persamaan (3).

$$x(n) = A e^{j(\omega_0 n + \theta + u(n))} \tag{3}$$

dengan

$$\phi(n) = \omega_0 n + \theta + u(n) \tag{4}$$

yang merupakan argumen fase runtun data  $x(n)$ . Meskipun pengaruh magnitude derau  $z(n)$  sudah dapat diabaikan, tetapi argumen fase  $u(n)$  dari derau  $z(n)$  masih mempunyai peranan pada isyarat  $x(n)$ . Melalui manipulasi aljabar pada persamaan (4) dapat diperoleh estimator frekuensi  $\hat{\omega}_0$  dan fase  $\hat{\theta}$  seperti pada persamaan (5) dan (6) dari Tretter [18]

$$\hat{\omega}_0 = \frac{12}{TN(N^2)} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} n \phi(n) \tag{5}$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \phi(n) \tag{6}$$

Tampak pada persamaan (5) dan (6) bahwa estimasi frekuensi  $\omega_0$  dan fase  $\theta$  hanya membutuhkan perhitungan arkus tangen, *phase unwrapping* dan operasi penjumlahan. Untuk menghemat kebutuhan komputasi, *warpped phase* dihilangkan dengan menggunakan beda fase ( $\Delta(n)$ ) antar sampel isyarat  $x(n)$  yang berurutan.

$$\Delta(n) = \phi(n + 1) - \phi(n) \tag{7}$$

$$\Delta(n) = \omega_0 + u(n + 1) - u(n) \tag{8}$$

Pada persamaan (8) tidak terdapat lagi fase  $\theta$ , sehingga pada persamaan (8) hanya dapat diestimasi frekuensi  $\omega_0$ . Estimator frekuensi  $\hat{\omega}_0$  dari Kay [15] ditulis dalam persamaan (9).

$$\hat{\omega}_0 = \sum_{n=0}^{N-2} w(n) \Delta(n) \tag{9}$$

dengan

$$w(n) = \frac{\frac{3}{2}N}{N^2 - 1} \left\{ 1 - \left[ \frac{n - \left(\frac{N}{2} - 1\right)}{\frac{N}{2}} \right]^2 \right\} \tag{10}$$

1.2.2 Estimasi Amplitude dan Fase

Selain parameter frekuensi, sebuah sinusoid mempunyai parameter amplitude dan fase. Kedua parameter ini baru dapat diestimasi setelah parameter frekuensi selesai diestimasi. Jika frekuensi hasil estimasi adalah  $\hat{\omega}_0$  dan hasil estimasi fase adalah  $\hat{\theta}_0 = 0$ , maka amplitude  $A_0$  untuk sinusoid  $x(n)$  dengan frekuensi  $\omega_0$  dapat diestimasi dengan hitungan *least squares* yang sederhana. Isyarat  $e(n)$  adalah galat antara sinusoid dengan hasil estimasinya

$$e(n) = x(n) - \hat{A}_0 e^{-j\hat{\omega}_0 n} \tag{11}$$

Jumlah galat kuadrat adalah

$$e^2(n) = \sum_{n=0}^{N-1} [|x(n)|^2 - 2\text{Re}\{x(n)\hat{A}_0 e^{-j\hat{\omega}_0 n}\} + \hat{A}_0^2] \quad (12)$$

dan kuadratis terhadap  $\hat{A}_0$ . Salah satu cara sederhana untuk menentukan  $\hat{A}_0$  adalah dengan menyamakan derivatif  $e^2(n)$  terhadap  $\hat{A}_0$  ke nol dan menyelesaikannya untuk  $\hat{A}_0$ .

$$\hat{A}_0 = \frac{1}{N} \text{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\hat{\omega}_0 n} \right\} \quad (13)$$

Untuk  $x(n) = A_0 \cos(\omega_0 n + \theta_0)$  sinusoid riil, hasil estimasi amplitude  $A_0$  adalah

$$\hat{A}_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos(\hat{\omega}_0 n) \quad (14)$$

dan fase  $\hat{\theta}_0$  merupakan geseran fase pada hitungan korelasi silang antara sinusoid riil  $x(n)$  dan sinusoid dengan frekuensi  $\hat{\omega}_0$  pada persamaan (14).

### 1.3 Estimasi Frekuensi Dasar:

Proses ini memperkirakan letak frekuensi dasar berbasis pada pengelompokan komponen harmonik dari komponen-komponen sinusoid yang telah berhasil diekstraksi oleh [13]. Pemilihan metode pengelompokan komponen harmonik untuk menentukan frekuensi dasar mempunyai kebebasan yang dapat dikerjakan sesuai kebutuhan, seperti pada [19] mencoba menetralkan pengaruh kuat dan lemah magnitude harmonik dengan pembobotan magnitude atau pada [20][21][22][23] mempertimbangkan adanya kesalahan pada estimasi frekuensi. Pertimbangan toleransi kesalahan tersebut terakomodasi dalam fungsi objektif  $G(\omega_d)$  berikut

$$G(\omega_d) = \sum_k \sum_m \log[a(m)] W[\omega(m), k\omega_d] \quad (15)$$

dengan

$$W[\omega_1, \omega_2] = \begin{cases} 0 & \text{untuk } |\omega_1 - \omega_2| > \Delta \\ \frac{|\omega_1 - \omega_2|}{\Delta} & \text{untuk } |\omega_1 - \omega_2| < \Delta \end{cases}$$

Frekuensi  $\omega_2$  merupakan frekuensi harmonik dan frekuensi  $\omega_1$  adalah calon frekuensi harmonik yang dipilih. Frekuensi dasar  $\omega_d$  dipilih untuk nilai  $G(\omega_d)$  paling besar dengan  $\Delta$  merupakan nilai ambang yang dipilih bebas. Metode ini diilhami ide untuk mencakup sebanyak mungkin sinusoid-sinusoid yang tersusun secara harmonis dalam suatu spektrum. Agar magnitude  $a(m)$  yang kecil juga cukup mendapat perhatian dalam perhitungan fungsi objektif  $G(\omega_d)$ , maka nilai magnitude  $a(m)$  ditampilkan secara logaritmik dalam persamaan (15). Nilai ambang  $\Delta$  memungkinkan adanya toleransi atas ketidaktepatan lokasi frekuensi harmonik. Metode ini selain menentukan frekuensi dasar juga sekaligus menentukan komponen harmonik yang menjadi kelipatan bulat frekuensi dasar.

### 1.4 Estimasi Nada:

Frekuensi dasar yang berhasil diestimasi selanjutnya dipakai untuk menentukan nada yang sesuai. Penentuan nada dari frekuensi dasar dikerjakan dengan proses

kuantisasi frekuensi dasar ke frekuensi representatif nada. Nilai frekuensi dasar yang berhasil diestimasi tidak selalu tepat menempati frekuensi nada musik. Proses kuantisasi dilakukan berdasar probabilitas yang terbaik agar kesalahan penentuan nada mempunyai kesalahan yang minimal. Proses kuantisasi nada dikerjakan dengan kuantisasi skalar di ranah frekuensi dan dengan nilai representatif sesuai frekuensi nada musik barat.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Bahan

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

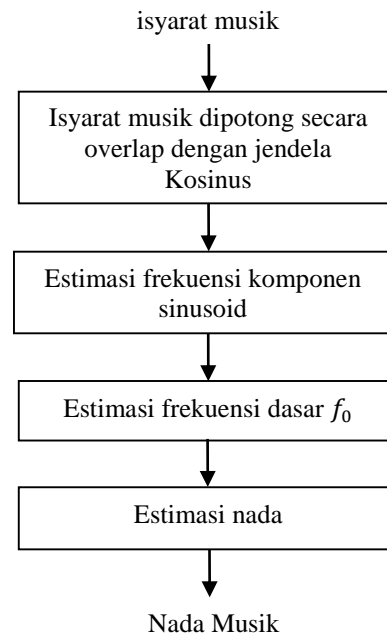
### B. Alat

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

### C. Pelaksanaan Penelitian

Estimasi nada pada isyarat musik Klarinet dikerjakan dalam 4 tahapan proses. Keempat proses tersebut digambarkan oleh diagram blok dalam Gambar 1.

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



Gambar 1. Prosedur analisis isyarat musik dan estimasi nada.

Langkah kedua merupakan langkah estimasi semua frekuensi yang terkandung dalam isyarat. Proses estimasi frekuensi dikerjakan dengan metode *heterodyne*. Frekuensi diestimasi satu persatu dengan urutan bedasar besar magnitude komponen sinusoid. Komponen sinusoid dengan

frekuensi yang sudah diestimasi selanjutnya diekstrak keluar dari isyarat agar tidak mengganggu proses estimasi frekuensi berikutnya.

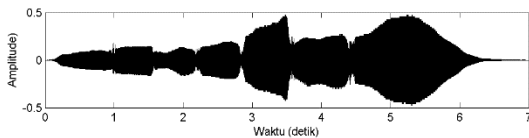
Langkah ketiga adalah proses mengestimasi frekuensi dasar yang dikerjakan dengan metode pengelompokan komponen harmonik dari komponen-komponen sinusoid yang telah berhasil diekstraksi.

Langkah keempat merupakan proses estimasi nada berdasar frekuensi dasar dengan metode kuantisasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

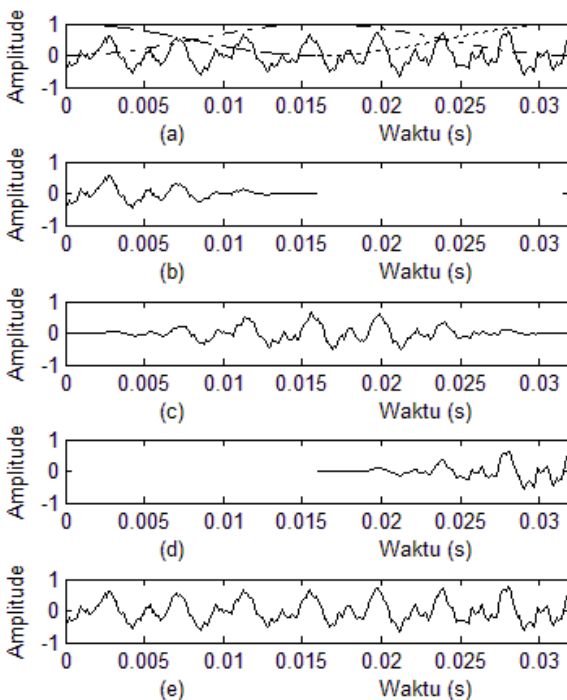
Isyarat musik yang dipakai dalam simulasi berasal dari instrumen musik tunggal Klarinet. Isyarat dicuplik dengan frekuensi cuplik 8 kHz dan dikuantisasi dengan resolusi 16 bit/sampel. Evaluasi tingkat keberhasilan penelitian dilakukan dengan membandingkan nada hasil estimasi dari isyarat musik dengan tabel nada-nada musik. Di ranah frekuensi isyarat ditampilkan dalam spektrum, dalam perjalanan hasil estimasi frekuensi dasar dan sebagai hasil estimasi nada.

Gambar 2 adalah isyarat Klarinet di ranah waktu. Isyarat ini mempunyai durasi sekitar tujuh detik dan dimainkan dengan tujuh nada yang berbeda. Ketujuh nada tersebut yang diestimasi dalam penelitian ini.



Gambar 2. Isyarat Klarinet

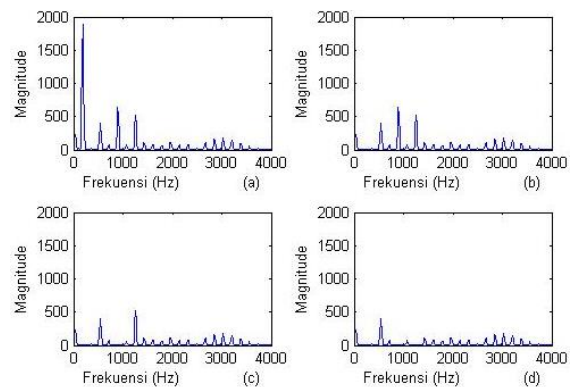
Untuk keperluan penelitian, lebar jendela yang dipakai selebar 256 sampel. Lebar ini sesuai dengan *frame* waktu 32 ms. Gambar 3 menunjukkan proses penjendelaan isyarat audio yang bekerja cukup baik.



Gambar 3. Penjendelaan isyarat secara *overlap*

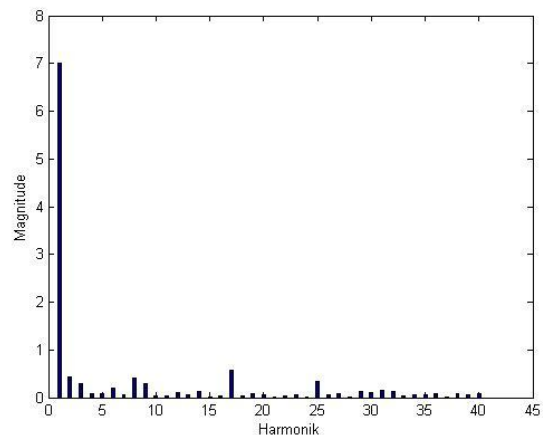
Bagian isyarat audio yang tepat berada di daerah transisi benar-benar terdistribusi baik untuk dua jendela yang berturutan, sehingga isyarat audio dapat direkonstruksi kembali secara sempurna (Gambar 3.e).

Gambar 4 menampilkan proses evolusi terjadinya ekstraksi komponen sinusoid pada isyarat Klarinet pada *frame* ke 20. Proses ekstraksi diawali dengan komponen sinusoid dengan magnitudo yang paling dominan. Proses ini terlihat pada perbedaan antara Gambar 4a dan 4b. Pada awal proses, komponen sinusoid dengan frekuensi sekitar 178 Hz mempunyai magnitudo paling dominan. Setelah komponen sinusoid tersebut berhasil diekstrak, tampak pada Gambar 4.b komponen sinusoid tersebut sudah hilang dari spektrum signal. Gambar 4.c dan Gambar 4.d menunjukkan proses terjadinya ekstraksi komponen sinusoid dengan magnitudo dominan nomor 2 dan 3. Pada *frame* ke 20 telah dapat diekstraksi 19 sinusoid. Jumlah sinusoid ini sesuai dengan jumlah frekuensi yang dipaparkan pada Gambar 4.a.



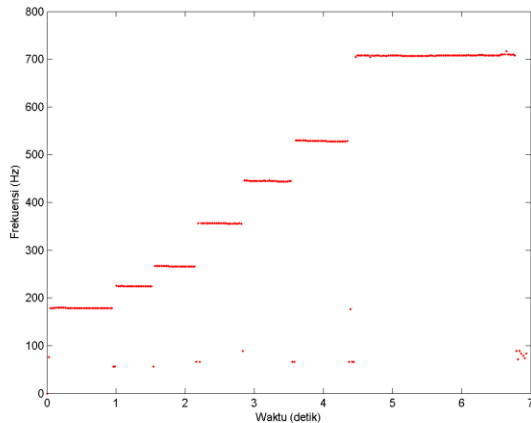
Gambar 4. Evolusi proses ekstraksi sinusoid

Gambar 5 menunjukkan contoh spektrum garis dari hasil ekstraksi komponen sinusoid pada isyarat klarinet pada *frame* ke 41. Keseluruhan komponen 40 sinusoid yang berhasil diekstraksi diletakkan sesuai nomor harmonik. Frekuensi dasar mempunyai magnitudo paling dominan seperti pada *frame* ke 20 pada Gambar 4.a. Dominasi magnitudo dari frekuensi dasar memang menjadi fitur dari isyarat Klarinet.



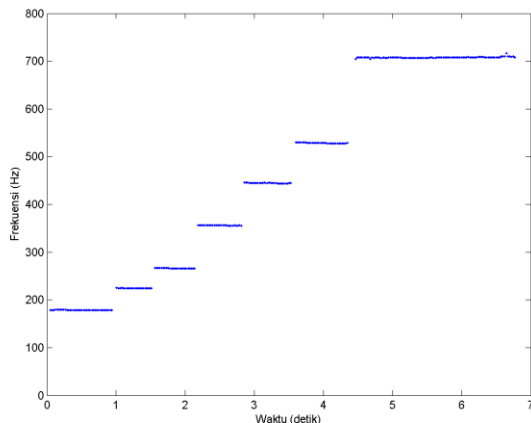
Gambar 5 Spektrum garis isyarat Klarinet pada *frame* ke 40

Hasil estimasi frekuensi dasar isyarat Klarinet dapat dilihat pada Gambar 6. Sebagian besar frekuensi dasar yang berhasil diestimasi terletak di sekitar frekuensi 178 Hz, 224 Hz, 267 Hz, 356 Hz, 445 Hz, 530 Hz dan 708 Hz. Pada saat transisi dua nada, estimasi frekuensi dasar menghasilkan frekuensi yang sangat rendah dari yang seharusnya. Hal ini disebabkan oleh karena adanya dua nada yang berbeda pada saat yang sama. Persamaan (15) sebagai estimator frekuensi dasar memilih frekuensi yang sangat rendah sebagai frekuensi dasar agar dapat mencakup sebanyak mungkin komponen frekuensi dari dua nada tersebut.



Gambar 6 Hasil estimasi frekuensi dasar isyarat Klarinet.

Gambar 7 memperlihatkan hasil eliminasi komponen frekuensi dasar yang dianggap tidak sah sebagai kandidat nada yang akan diestimasi. Eliminasi frekuensi ini diperlukan agar tidak menyebabkan kesalahan dalam proses estimasi nada.



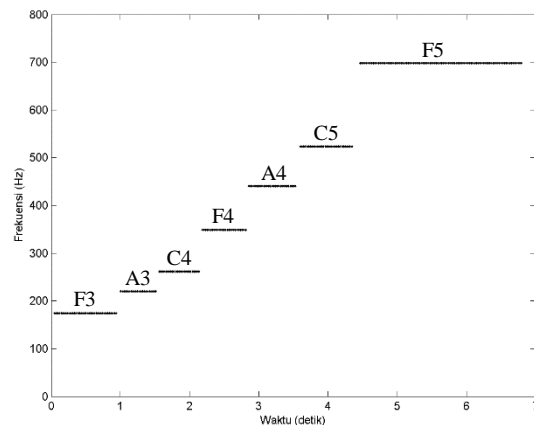
Gambar 7 Hasil koreksi estimasi frekuensi dasar.

Tabel 1 memperlihatkan hasil kuantisasi frekuensi dasar dan estimasi nada isyarat Klarinet. Perbedaan nilai antara frekuensi dasar dan frekuensi nada (frekuensi hasil kuantisasi) dapat disebabkan oleh penalaan alat musik yang tidak tepat dan lebih rendah sedikit dibanding frekuensi nada baku. Hasil estimasi nada menggaris bawahi bahwa hasil penalaan nada pada alat musik yang kurang tepat, walaupun sedikit, dapat diketahui secara baik melalui metode penelitian ini.

Tabel 1 Hasil kuantisasi frekuensi dasar dan estimasi nada

Hasil estimasi frekuensi dasar	Hasil kuantisasi frekuensi dasar	Hasil estimasi nada
178 Hz	174,614 Hz	F3
224 Hz	220 Hz	A3
267 Hz	261,626 Hz	C4
356 Hz	349,228 Hz	F4
445 Hz	440 Hz	A4
530 Hz	523,251 Hz	C5
708 Hz	609,456 Hz	F5

Gambar 8 merupakan merupakan hasil estimasi nada-nada yang dimainkan pada isyarat Klarinet di sepanjang tujuh detik sumbu waktu.



Gambar 8 Hasil estimasi nada pada isyarat Klarinet

Setiap nada mempunyai frekuensi spesifik sesuai aturan musik barat. Garis-garis hitam mendatar yang mempunyai frekuensi konstan dan merupakan nada yang sesuai hasil identifikasi.

#### IV. KESIMPULAN

Sebuah estimasi nada pada isyarat musik Klarinet sudah berhasil dikerjakan dengan baik. Metode yang diusulkan mampu mengestimasi nada dengan tepat. Isyarat Klarinet dianalisis di ranah frekuensi dan diestimasi nada-nada yang terkandung di dalamnya. Isyarat Klarinet selanjutnya berhasil direpresentasikan dalam urutan nada F3, A3, C4, F4, A4, C5 dan F5 di sepanjang sumbu waktu.

Metode estimasi nada yang dikembangkan mampu mengetahui dengan baik kesalahan penalaan nada pada alat musik, khususnya Klarinet pada penelitian ini. Fakta ini mengkonfirmasi manfaat penelitian ini di bidang penalaan alat musik.

Kelebihan metode ini dapat bekerja dengan panjang jendela yang relatif lebih pendek di ranah waktu. Sehingga metode ini dapat diharapkan untuk mengestimasi nada pada isyarat musik dengan dinamika *rythme* yang cepat.

Metode ini masih mempunyai keterbatasan, yaitu belum mampu mengestimasi lebih dari satu nada yang terjadi secara bersamaan. Keterbatasan ini akan dapat membuka lahan penelitian selanjutnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Eska, G., "Schall und Klang wie und was wir hören", Birkhäuser Verlag, 1997.
- [2] Müller, M., Ellis, D., Klapuri, A., Richard, G., "Signal Processing for Music Analysis", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 5, No. 6, October 2011
- [3] Brown, J. C., and Zhang, B. "Musical frequency tracking using the methods of conventional and 'narrowed' autocorrelation", J. Acoust. Soc. Am. 89, 2346-2354., 1991.
- [4] Doval, B., and Rodet, X. "Estimation of fundamental frequency of musical sound signals", Proc. ICASSP 5, 3657-3660., 1991.
- [5] Noll, A.M. "Cepstrum pitch determination", J. Acoust. Soc. Am. 41, 293-309., 1966
- [6] Martin, P. "Comparison of pitch detection by cepstrum and Spectral comb analysis", Proc. IEEE ICASSP 1, 180-183., 1982.
- [7] Hess, W., "Pitch Determination of Speech Signals", Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [8] Hess, W., "Algorithms and Devices for Pitch Determination of Musical Sound Signals". Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [9] Pisarenko, V. F., "The retrieval of harmonics from a covariance function", Geophysics J. Roy. Astron. Soc., vol. 33, pp. 347-366, 1973.
- [10] Schmidt, R., "Multiple emitter location and signal parameter estimation", Proc. RADCSpectrum Estimation Workshop, pp. 243-258, 1979.
- [11] Johnson, D. H. and DeGraaf, S. R., "Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays by eigenvalue analysis", IEEE Trans. Acoust., Speech, Sig. Proc., vol. ASSP-30, no. 4, pp. 638-647, Aug. 1982.
- [12] Kumaresan, R., and Tufts, D. W., "Estimating the angles of arrival of multiple plane waves", IEEE Trans. on Aerospace and Elec. Syst., vol. AES-19, vol. 1, pp. 134-139, Jan. 1983.
- [13] Winduratna, B., Susanto, A. dan Hidayat, R., "Ekstraksi Komponen Sinusoida dari Isyarat Audio", Annual Engineering Seminar, FT UGM, Februari 2014
- [14] McAulay, R. J., Quatieri, T. F., "Sinusoidal coding in Speech coding and synthesis" by W. B. Kleijn and K. K. Paliwal (Eds), Amsterdam, Elsevier Science, pp. 121-174., 1995.
- [15] Kay, S.M., "A Fast and Accurate Single Frequency Estimator", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing, Vol. 37, No. 12, p. 1987-1990., 1989.
- [16] Moore, B. C. J., "An Introduction to the Psychology of Hearing", 5th ed., New York: Academic, 2003.
- [17] Brown, J. C. and Puckette, M. S., "An efficient algorithm for the calculation of a constant Q transform", J. Acoust. Soc. America (JASA), vol. 92, pp. 2698-2701, 1992.
- [18] Tretter, S., "Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 31, no. 6, pp. 832 - 835, 1985.
- [19] Mathews, M., "Introduction to timbre in Music, Cognition, and Computerized Sound: An Introduction to Psychoacoustics", MIT Press, 1999, pp. 79-87.
- [20] Tolonen, T., "Methods for separation of harmonic sound sources using sinusoidal modeling", Munich, Germany: AES 106th Convention, May 8-11 1999.
- [21] Virtanen, T. and Klapuri, A., "Separation of harmonic sound sources using sinusoidal", Istanbul, Turkey: IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2000.
- [22] Abe, T., Kobayashi, T., and Imai, S. "Harmonics tracking and pitch extraction based on instantaneous frequency", Proc. IEEE-ICASSP, pp. 756-759., 1995.
- [23] Winduratna, B., Susanto, A. dan Hidayat, R., "Ekstraksi Komponen Harmonik dari Isyarat Audio", Annual Engineering Seminar, FT UGM, Februari 2015