SIMULASI *FEEDBACK* PADA PERMAINAN BIOLA UNTUK PEMULA MENGGUNAKAN METODE HPS

Feedback Simulation on Violin Performance for Beginner Using Harmonic Product Spectrum Method

Sayidia Rizki Arfina[1], Ir. Rita Magdalena, M.T.[2], Nur Andini S.T., M.T.[3]

[1,2,3]Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University
[1]srarfina@students.telkomuniversity.ac.id, [2]ritamagdalena@telkomuniversity.ac.id,
[3]nurandini@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Biola adalah salah satu alat musik gesek, untuk menghasilkan permainan biola dengan suara yang indah membutuhkan ketepatan pada penekanan jari di senar biola atau disebut *fingering*. Pada pemula yang belum terbiasa dengan *fingering* membutuhkan latihan yang tekun dan waktu yang lama. Pada saat latihan, pemula yang tidak didampingi oleh guru seringkali kebingungan untuk memainkan nada yang tepat. Pemula tidak tahu apakah nada yang dimainkan sudah benar sesuai harapan. Untuk itu, pemula membutuhkan alat bantu yang menampilkan *feedback* dari letak kesalahan pada saat bermain biola. Kesalahan yang dimaksud adalah nada yang kurang tepat, atau terlalu tinggi/rendah dari yang diharapkan. Agar lebih efisien, *feedback* ini ditampilkan secara *realtime* untuk memudahkan pemula menganalisis kesalahan permainannya. Pada saat pemula bermain, *dibutuhkan* algoritma untuk mendeteksi nada yang dimainkan. Algoritma yang digunakan adalah *Harmonic Product Spectrum* (*HPS)*, karena metode ini cocok digunakan di berbagai kondisi. Pada akhir simulasi akan ada *feedback* yang menampilkan nada yang dimainkan, apakah nada tersebut lebih tinggi atau lebih rendah atau sudah tepat seperti yang diharapkan. Hasil akhir yang diharapkan pada tugas akhir ini adalah simulasi *feedback* yang dapat mengevaluasi permainan biola. Evaluasi ini berupa keakuratan pitch nada yang dimainkan sesuai dengan nada yang diharapkan. Hasil akurasi terhadap tuner Joyo sebesar 77%.
Kata kunci : Biola, *Harmonic Product Spectrum, Realtime feedback.*

Abstract

Violin is one of the string instruments and to produces beautiful sound needs perfect fingering on the strings. In order to do so, beginners in violin need to practice hard and take a long time to be perfect at fingering. It is difficult to practice with no expert watching them. They confuse for the right and exact pitch. So they need a tool that can show the mistakes for their practice in home. The feedback could show their performance mistakes such as too high pitch or too low pitch. And this feedback will show it in real time. The feedback needs alghoritm to show the pitch frequency. And Harmonic Product Spectrum (HPS) is the right alghorithm because it's perfect in any condition. This frequency will lead the feedback to show the evaluation. The evalution shows the note and the performance. This should show their accuracy on playing violin. The final accuracy of this system after took some testing with Tuner JOYO, the result is around 77%.
Keywords : *Violin, Harmonic Product Spectrum, Realtime feedback*

1. Pendahuluan

Biola termasuk salah satu dari jenis alat musik gesek, cara memainkan biola yaitu dengan menekan bagian dari senar. Untuk menghasilkan nada dengan *pitch* yang akurat dibutuhkan penekanan senar pada tempat yang benar. Bagi para pemula dalam memainkan alat musik, seringnya mengalami kesulitan dalam mendengarkan *pitch* nada yang tepat. Di dalam latihan memainkan nada pada biola, dibutuhkan posisi jari yang tepat agar menghasilkan *pitch* nada yang tepat. Ketika latihan secara mandiri (tanpa didampingi pengajar), sulit bagi pemula untuk menentukan *pitch* yang benar. Untuk itu, pemula harus sering latihan dalam mendengarkan nada yang tepat. Namun saat sedang latihan mandiri, pemula butuh alat bantu dalam mendampingi latihan. Penelitian ini menggunakan metode *Short Time Fourier*

Transform (STFT) sebagai *converter* ke dalam domain frekuensi kemudian menggunakan metode *Harmonic Product Spectrum* (HPS) sebagai algoritma mendeteksi nada yang dimainkan. Lama waktu rekaman pada sistem ini 10 detik hingga 15 detik.

2. Dasar Teori

2.1. *Produksi Suara*[1]

Lingkungan dari gelombang sinyal audio mempunyai 4 struktur yaitu *Attack, Decay, Sustain, and Release (*ADSR*).* ADSR parameter sering digunakan untuk menentukan awal dan akhir dari sebuah nada. Karakteristika permainan biola memiliki gelombang yang lebih besar. Dan tidak terlihatnya bagian dari *Decay* dan *Sustain* pada permainan biola. Gambar tersebut juga menunjukkan celah energy antara dua nada dapat terlihat jelas.[1]

2.2. *Pitch Detection Algorithm* (PDA)[10]

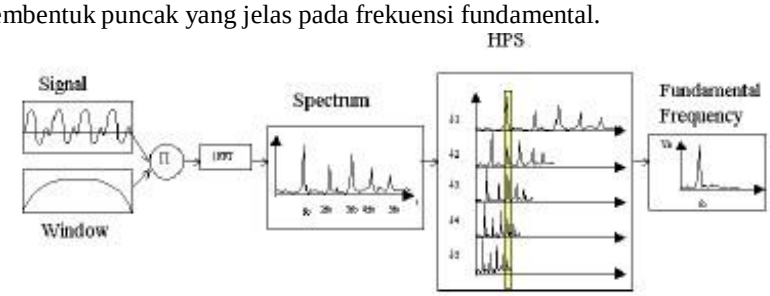
Hasil akhir dari penelitian berupa frekuensi dari permainan biola. Sehingga membutuhkan metode yang dapat merubah sinyal dalam domain waktu ke domain frekuensi. Untuk itu digunakan metode Short Time Fourier Transform (STFT). Bila sinyal berupa sinyal periodik maka Fourier Transform akan menunjukkan peak-peak yang berulang dari frekuensi fundamentalnya. Persamaan dari STFT[10] yaitu:

$$\text{[illegible]} = \sum^{\infty} \text{[illegible]} \qquad (2.1)$$

Masalah pada metode ini bahwa STFT membagi Bandwidth audio ke satu set kanal frekuensi dengan spasi yang sama di mana masing-masing saluran adalah n Hz terpisah dari tetangganya. Pitch rendah kurang akurat menggunakan metode ini dibandingkan dengan pitch yang lebih tinggi.

2.3. *Harmonic Product Spectrum* (HPS)[5]

HPS Algoritma merupakan teknik sederhana yang dapat bertahan di berbagai kondisi. Algoritma ini bekerja dengan baik pada *realtime* dengan 200Mhz prosesor[4]. [5]Bila sinyal input berupa musik, maka spektrum terdiri dari serangkaian puncak, sesuai dengan frekuensi dasar dengan komponen harmonik pada kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar. Karena itu ketika spektrum dikompres beberapa kali (*downsampling*), dan dibandingkan dengan spektrum asli, dapat dilihat bahwa puncak harmonik terkuat berbaris. Puncak pertama dalam spektrum asli bertepatan dengan puncak kedua dalam spektrum terkompresi dengan faktor dua, yang bertepatan dengan puncak ketiga dalam spektrum terkompresi dengan faktor tiga. Oleh karena itu, ketika berbagai spektrum yang dikalikan bersama-sama, hasilnya akan membentuk puncak yang jelas pada frekuensi fundamental.



Gambar 1. *Flow Chart* HPS[1]

Teknik awalnya yaitu dengan memecah sinyal input ke beberapa segmen dengan menggunakan Hanning window. Ukuran window dan hop akan menjadi input. Setiap window, dilakukan STFT untuk merubah sinyal input yang berada dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. Kemudian setiap window akan diterapkan teknik HPS. HPS melibatkan 2 langkah yaitu *downsampling* dan *multiplication*. Untuk mensampel, spectrum terlebih dahulu dikompresi sebanyak dua kali di setiap window. Kompres pertama, spektrum awal dikompres dengan dua dan kompres kedua dengan tiga. Kemudia ketiga spectra tersebut dikalikan dan temukan frekuensi yang mendekati dengan nilai puncak atau nilai maksimum. Frekuensi ini merupakan frekuensi dasar dari bagian tertentu window. Algoritma HPS menghitung nilai maksimum dari harmonic dengan persamaan untuk setiap spectral :

$$\text{[illegible]}) = \prod_{\text{[illegible]}=1}^{\text{[illegible]}} |\text{[illegible]}(\text{[illegible]})| \quad (2.2)$$

$$\hat{\text{[illegible]}} = \text{[illegible]}\{\text{[illegible]}\} \quad (2.3)$$

dimana R adalah jumlah harmonic, frekuensi w_i berada dalam kisaran nilai frekuensi dasar yang mendekati nilai yang benar. Hasil dari [illegible]) digunakan untuk mengitung nilai maksimum $\hat{\text{[illegible]}}$ seperti pada persamaan di atas. Pada Gambar 2.3. menunjukkan skema HPS. Fungsi Y(w) ditunjukkan di paling kanan gambar dengan nilai maksimal $\hat{\text{[illegible]}}$ dimana nilai tersebut adalah nilai yang paling mendekati *pitch* yang sebenarnya. Frekuensi di bawah 50Hz diabaikan karena dianggap sebagai noise. [6]

Error pada oktaf sering terjadi pada teknik HPS ini. *Pitch* terdeteksi satu oktaf lebih tinggi dari sebenarnya. Untuk mengatasi masalah ini, setelah proses dilaksanakan, dilakukan hal berikut : Jika amplitudo *pitch* yang tertinggi kedua kira-kira setengah dari *pitch* yang terpilih , dan ratio dari amplitudo diatas batas (contoh 0.2 untuk 5 harmonik), maka pilih satu oktaf dibawah oktaf yang terpilih. [7]

2.4. *G Mayor Scale*

Tangga nada G mayor memiliki 1 tanda # (sharp atau kres). Hal ini menunjukkan bahwa pada tangga nada G mayor, nada F memilik kres. Maka susunan lengkap nada pada tangga nada G mayor adalah G, A, B, C, D, E, F#, G'. Dimana ketujuh nada tersebut memiliki frekuensi dan interval nada yang berbeda.

3. Parameter Pengujian

Beberapa parameter yang akan digunakan sebagai acuan pengujian yaitu :

3.1 *Akurasi Frekuensi*

Dibutuhkan akurasi yang tinggi dalam mendeteksi nada. Hal ini dibutuhkan sebagai catuan dalam memberikan *feedback* yang efektif. Dimana pengujian dilakukan menggunakan 3 perbandingan yaitu :

a. Perbandingan dengan Aplikasi Android
Pengujian ini dibutuhkan sebuah pembanding sabagai acuan akurasi. Aplikasi Android digunakan sebagai acuan tersebut. Sehingga aka nada dua hasil yaitu hasil dari sistem dan hasil dari aplikasi. Nilai akurasi yang didapatkan menggunakan rumus :

$$\text{[illegible]}(\%) = 100\ \text{[illegible]}\left(1 - \frac{\text{[illegible]}(Hz) - \text{[illegible]}(Hz)}{\text{[illegible]}(Hz)}\right) \quad (3.1)$$

b. Perbandingan dengan Tuner
Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan hasil dari Turner dan hasil dari sistem. Dimana bila hasil keduanya berada dalam kategori yang sama maka pengujian tersebut tergolong ke dalam *match* atau tepat. Kemudian jumlah pengujian yang tepat sebagai acuan untuk mencari nilai akurasi. Nilai akurasi tersebut didapatkan dari perhitungan dengan rumus :

$$\text{[illegible]}(\%) = \frac{\text{[illegible]}}{\text{[illegible]}}\ \text{[illegible]}100\% \quad (3.2)$$

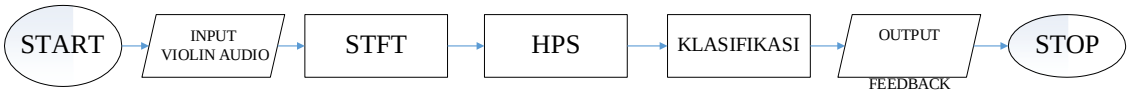
c. Perbandingan jumlah *downsampling* HPS
Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan penggunaan jumlah *downsampling* HPS yang berbeda. Jumlah yang diterapkan yaitu 3, 4, dan 5 kali *downsampling* HPS.

3.2 *Delay*

Sebagai sistem simulasi *feedback* yang baik, dibutuhkan lama waktu proses (*delay)* yang rendah. Hal ini berfungsi sebagai alat bantu para pemain dalam mengevaluasi nilai performansi masing-masing latihan.

4. Blok Diagram Sistem

Pada Gambar 2 digambarkan langkah – langkah yang dilakukan sistem untuk mendeteksi frekuensi dan mengklasifikasi ke dalam nada.



Gambar 2. *Flow Chart* Sistem

Input dari sistem ini berupa suara biola yang telah direkam. Lamanya suara biola yang direkam berbeda-beda, hal ini agar menguji pemain untuk berlatih dengan tempo yang akan dimainkan. Kemudian hasil rekaman suara ini disimpan ke dalam bentuk *.wav agar dapat diolah ke dalam tahap selanjutnya. Kemudian suara yang telah direkam ke dalam *.wav diberikan window yaitu Hanning Window periodik. Setelah itu suara yang telah direkam dalam domain waktu diubah ke dalam bentuk domain frekuensi menggunakan FFT dengan frekuensi sampling sebesar 8000Hz. Sehingga dapat terlihat frekuensi fundamental suara yang direkam tersebut. Setelah sinyal suara input diubah ke domain frekuensi, maka selanjutnya mengambil frekuensi fundamental pada nada tersebut. Langkah awal yaitu dengan melakukan *downsampling* sebanyak 4 kali. *Downsampling* dilakukan agar frekuensi harmonik berkurang dan pada akhirnya akan meninggalkan frekuensi fundamental saja. Kemudian dari setiap hasil *downsampling* tersebut dilakukan multiplikasi sehingga didapat hasil akhir yaitu nilai maksimum. Nilai maksimum ini merupakan frekuensi fundamental dari sinyal tersebut. Pada beberapa kasus terdapat sinyal harmonik di sekitar frekuensi fundamental tersebut. Namun pada sistem ini sinyal harmonik tersebut tidak banyak bahkan tidak kelihatan sama sekali.

Bila suatu frekuensi fundamental yang dideteksi yaitu 196 Hz maka nada tersebut digolongkan ke dalam nada G3. Sedangkan bila frekuensi fundamental yang didapat senilai 215 Hz maka digolongkan ke dalam nada A3. Karena frekuensi nada A3 yaitu 220 Hz dan selisih di antara nada A3 dan frekuensi yang didapat yaitu 5 Hz, dimana nilai ini masih dalam batasan interval sebesar 12 Hz, maka frekuensi tersebut tergolong ke dalam nada A3. Kemudian pada setiap performansi terdapat 5 kategori untuk menjelaskan permainan yang dimainkan oleh pemain biola. 5 kategori ini yaitu Benar, Sedikit Rendah, Terlalu Rendah, Sedikit Tinggi, Terlalu Tinggi.

5. Pembahasan

Untuk mengetahui performansi sistem yang telah dirancang, maka dilakukan pengujian terhadap sistem dengan memainkan biola secara real-time. Pengujian ini menggunakan beberapa parameter, yaitu:

5.1 Akurasi Frekuensi dengan Perbandingan terhadap Aplikasi Android

Dalam skenario ini, dilakukan pengujian antara hasil sistem dengan hasil dari aplikasi tuner android. Aplikasi yang digunakan yaitu Easy Violin Tuner. Aplikasi ini menampilkan frekuensi yang dihasilkan. Hal ini dapat menjadi acuan perbandingan dengan hasil frekuensi dari sistem. Dimana dari kedua hasil tersebut didapat akurasi dengan rumus (3.1) sehingga dari 100 kali pengujian, didapatkan nilai rata-rata akurasi yaitu 99.9113375%.

Tabel 1 Hasil Pengujian Sistem dan Aplikasi

No	Aplikasi (Hz)	Sistem (Hz)	Nada	Performansi	Akurasi (%)
1	477.01	477.266	B4	Terlalu Rendah	99.94633236
2	556.47	556.084	D5	Terlalu Rendah	100.0693658
3	711.86	714.068	F5#	Terlalu Rendah	99.68982665
4	243.24	244.111	B3	Benar	99.64191745
5	399.82	401.343	G4	Terlalu Tinggi	99.61907859

5.2 Akurasi Frekuensi dengan Perbandingan terhadap Tuner

Pengujian ini menggunakan Tuner sebagai pembanding terhadap sistem. Dikarenakan Tuner tidak menampilkan frekuensi yang didapat, maka pengujian ini menggunakan dua kategori yaitu Salah dan Benar sebagai

acuan. Dimana kategori Salah terdapat dua jenis yaitu Tinggi dan Rendah. Sedangkan pada sistem memiliki 5 kategori yaitu Benar, Tinggi Sedikit, Rendah Sedikit, Terlalu Tinggi dan Terlalu Rendah. Berikut contoh beberapa kali pengujian antara Tuner dengan Sistem yang dilakukan secara bersamaan.

Tabel 2 Hasil Pengujian dengan Tuner

No	Nada yang dimainkan	Frekuensi Nada (Hz)	Sistem (Hz)	Tuner	Performansi Sistem
1	G3	196.00	195.289	Benar	Benar
2	D4	293.66	292.951	Benar	Benar
3	A4	440.00	439.888	Benar	Benar
4	E5	659.25	663.981	Tinggi	Tinggi sedikit
5	G4	392.00	390.601	Benar	Benar

Dari tabel 2 terdapat beberapa pengujian digolongkan ke dalam kategori salah yaitu pada nada E5 pengujian ke 4, Dimana selisih frekuensi antara sistem dengan nada E5 yaitu 4.731 Hz. Sedangkan nada lainnya, selisih keduanya berkisar antara 0.7 Hz hingga 1.0 Hz. Pada sistem, kisaran ini dikategorikan ke dalam performansi Benar. Bila dilihat perbandingan antara Tuner dengan sistem, terdapat beberapa perbedaan. Hal ini dikarenakan pada sistem memiliki kategori lebih spesifik. Ketika selisih frekuensi nada yang didapat dengan frekuensi nada sebenarnya melebihi dari 3 Hz, maka nada tersebut dikategorikan ke dalam kategori selain Benar. Perhitungan akurasi pada pengujian ini dilakukan dengan membandingkan performansi antara keduanya. Dimana bila performansi antara keduanya berada pada kategori yang sama maka dinyatakan match atau tepat. Bila tidak maka dinyatakan tidak tepat. Seperti pada pengujian pertama dimana nada G3 pada Tuner dan Sistem berada pada kategori yang sama yaitu Benar, maka pengujian pertama dinyatakan Tepat. Kemudian dari keseluruhan percobaan digunakan rumus (3.2) seingga didapatkan nilai akurasi sebesar 77%.

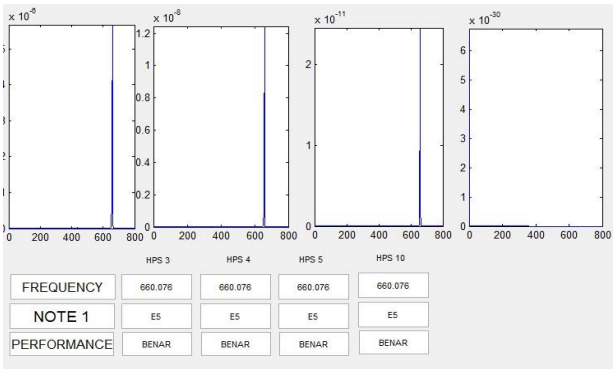
5.3 Pengaruh Jumlah Downsampling HPS

Pada pengujian ini, terdapat tiga skenario percobaan dimana perbedaannya yaitu jumlah downsampling pada HPS. Skenario pertama dengan jumlah 3 HPS, kemudian dengan jumlah 4 HPS, dan dengan 5 HPS. Namun sebagai perbandingan dilakukan 3 percobaan dengan jumlah HPS yang berbeda. Kemudian ketiga hasil tersebut dibandingkan dengan hasil dari aplikasi android. Berikut contoh hasil pengujian dengan 3 skenario. Dari Tabel 3 dapat disimpulkan bahwa hasil yang didapat pada 3HPS, 4HPS, dan 5HPS adalah sama. Sedangkan bila dibandingkan dengan hasil yang didapat dari aplikasi, hasilnya tidak jauh berbeda. Selisih antara keduanya berkisar 0.1-2 Hz. Sehingga didapatkan nilai akurasi dengan rumus (3.1) yang sama untuk ketiganya yaitu 99%.

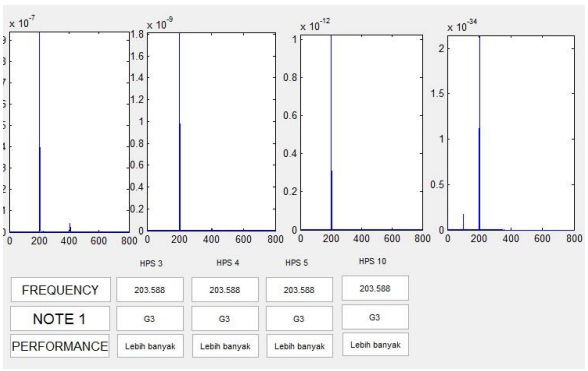
Tabel 3 Hasil Akurasi Pengujian dengan Jumlah downsampling HPS berbeda terhadap Android

No	Nada yang dimainkan	Akurasi Sistem dengan 3HPS (%)	Akurasi Sistem dengan 4HPS (%)	Akurasi Sistem dengan 5HPS (%)
1	G3	99.43406	99.43406	99.43406
2	D4	99.89031	99.89031	99.89031
3	A4	100.3516	100.3516	100.3516
4	E5	100.027	100.027	100.027
5	G4	99.91519	99.91519	99.91519

Gambar 3 (a) merupakan salah satu contoh hasil pengujian jumlah *downsampling* pada HPS. Nilai frekuensi yang didapat pada seluruh pengujian tersebut sama yaitu 203,568 Hz. Frekuensi ini dikategorikan ke dalam nada G3, namun hasil performansi tidak sesuai. Dikarenakan nada yang dimainkan lebih tinggi daripada nada seharusnya yaitu dengan nilai frekuensi 196 Hz. Kemudian dari hasil HPS tersebut didapatkan gambar frekuensi fundamental. Dimana saat jumlah *downsampling* pada HPS 4, dan 5 frekuensi fundamental berdiri sendiri tanpa ada nilai harmonik di sekitarnya. Sedangkan pada *downsampling* HPS berjumlah 3 dan 6 frekuensi fundamental masih mempunyai sedikit harmonik disekitarnya.



(a) Nada G3



(b) Nada E5

Gambar 3(a)(b) Hasil Pengujian Nada G3 dan E5

Kemudian diambil kembali Gambar 3 (b) hasil pengujian nada E5 dimana performansi yang dimainkan sudah dikategorikan tepat dikarenakan frekuensi E5 yang dimainkan yaitu 660,076 Hz sedangkan Frekuensi tepat pada E5 yaitu 659,25 Hz, selisih keduanya hanya 0,826 Hz. Nilai selisih ini masih masuk ke dalam kategori Benar. Sehingga performansinya sudah dapat dikategorikan tepat. Namun pada hasil akhir HPS, frekuensi fundamental yang didapatkan pada jumlah *downsampling* 3, 4, dan 5 tidak memiliki harmonik. Sedangkan pada jumlah *downsampling* 10 tidak terlihat sama sekali nilai harmoniknya. Hal ini dikarenakan jumlah *downsampling* yang terlalu banyak, sehingga hasil dari HPS 10 tidak menyisakan harmonik.Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah *downsampling* yang baik pada HPS yaitu 3, 4, dan 5. Pada pengujian sebelumnya, sistem menggunakan jumlah *downsampling* sebanyak 4 HPS.

5.4 Lama Waktu Proses

Pengujian ini menunjukkan hasil dari lama proses sistem. Lama waktu yang akan diuji hanya bagian setelah rekaman yaitu STFT, HPS, dan klasifikasi. Pada pengujian ini terdapat dua hasil dari pengujian. Pada hasil pertama (Tahap 1) merupakan hasil dari pengujian saat proses rekaman dan pengambilan input data berlangsung, dimana pada kasus ini lama rekaman yaitu selama 10 detik. Namun lama keseluruhan proses rekaman dan pengambilan input data yaitu selama 13 detik. Kemudian pada hasil kedua (Tahap 2 – 4) dari merupakan lama waktu dari proses tahap selanjutnya yaitu proses STFT, HPS, dan klasifikasi.
Tabel

Tabel 4 Hasil Pengujian Delay

Pengujian	Lama Rekaman (s)	Lama Proses Tahap 1 (s)	Lama Proses Tahap 2–4 (s)
1	10	13.033	0.477288
2	10	13.04243	0.315032
3	13	15.02817	0.425682
4	11	14.15341	0.336483
5	12	14.06789	0.429415

Dari Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa lama proses sistem dimana pada sistem terdapat 5 nada yang dapat diolah, yaitu sekitar 0,3 hingga 0,4 detik. Dan untuk lama proses rekaman pada tahap 1, lama proses sekitar 13 hingga 15 detik. Hal ini bergantung pada lama rekaman per nada yang dimunculkan secara acak. Seperti pada pengujian pertama dimana lama rekaman tahap 1 selama 13,033 detik sedangkan lama untuk rekamannya yaitu 10 detik. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat selisih 3 detik untuk pengambilan input data. Keseluruhan selisih keduanya yaitu berkisar antara 2 hingga 3 detik saja.

Tabel 5 Pengujian Lama Waktu per Nada

Pengujian	Lama Rekaman (s)	Lama Proses (s)
1	3	0.094137
2	2	0.08111
3	3	0.091253
4	3	0.114155
5	2	0.084027

Bila Tabel 4 menunjukkan lamanya waktu proses sistem untuk lima nada, maka pada Tabel 5 menunjukkan lamanya waktu proses sistem untuk satu nada saja. Hasil pengujian menunjukkan lama proses per nada sekitar 0,08 hingga 0,1 detik. Untuk lama rekaman selama 2 detik maka lama proses berkisar 0,08 detik. Sedangkan untuk lama rekaman selama 3 detik maka lama proses berkisar 0,09 hingga 0,1 detik.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa Feedback pada sistem yang dirancang untuk pemain biola tingkat pemula dirancang dengan menggunakan STFT dan HPS. Nilai akurasi akhir untuk setiap pengujian yaitu 99% untuk pengujian dengan menggunakan Aplikasi berbasis Android. Sedangkan pengujian dengan Tuner didapatkan akurasi sebesar 77%. Nilai ini didapat dari Dan pada sistem yang dirancang menggunakan jumlah *downsampling* HPS yang berbeda, dapat disimpulkan bahwa jumlah yang tepat untuk sistem yaitu pada jumlah *downsampling* sebanyak 3, 4, atau 5. Pada sistem Feedback yang dirancang didapatkan hasil *delay* waktu proses sekitar 0,08 hingga 0,1 detik. Hal ini bergantung pada lamanya rekaman per nada. Dimana lama nada tersebut dimunclakan secara acak berkisar antara 2 hingga 3 detik. Kelemahan sistem Feedback yaitu adanya kesalahan deteksi pada suatu nada, dimana nada yang dimunculkan lebih tinggi satu oktaf dari sebenernya.

Daftar Pustaka:

[1] Jian-Heng Wang, Siang-An Wang, Wen-Chieh Chen, Ken-Ning Chang, Herng-Yow Chen, "Real-Time Pitch Training System For Violin Learners," *IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops*, 2012.

[2] W. Hess, Pitch Determination of Speech Signals, Berlin: Springer, 1983.

[3] P. d. l. Cuadra, "Center for Computer Research in Music and Acoustics," Stanford, [Online]. Available: https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm. [Diakses 20 November 2014].

[4] M. Noll, "Pitch determination of human speech by the harmonic product spectrum, the harmonic sum spectrum, and a maximum likelihood estimate," dalam *In Proceedings of the Symposium on Computer Processing Communications*, 1969.

[5] G. Middleton, "OpenStax," 2003. [Online]. Available: http://cnx.org/contents/8b900091-908f-42ad-b93d-806415434b46@2/Pitch_Detection_Algorithms. [Diakses 14 November 2014].

[6] Hui Ding, Bo Qian, Yanping Li, and Zhenmin Tang, "A Method Combining LPC-Based Cepstrum and Harmonic Product Spectrum for Pitch Detection," *IEEE International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2006.

[7] De la Cuadra, P, Master, Sapp, C, "Efficient Pitch Detection Techniques for Interactive Music," *Proceedings of ICMC*, 2001.

[8] T. Andersson, "Audio Classification and Content Description," Lulea University of Technology, Sweden, 2004.

[9] H. Subramanian, "Audio Signal Classification," *M.Tech. Credit Seminar Report, Electronic Systems Group, EE. Dept, IIT Bombay*, 2004.

[10] R. W. S. Lawrence R. Rabiner, "Introduction to Digital Speech Processing," Delft, Publishers Inc., 2007, p. 43.

[11] Z. Ozcan, "Note Detection for Saz with Harmonic Product Spectrum Method," 2015.

[12] James Chan, Daniel Chen, Ri Muttukumaru. (2005). *SILENCE OF THE LAMBS 18-551 Digital Communications and Signal Processing Systems Design.*

[13] Tamara, S. (2015). *Music 270a: Signal Analysis.* San Diego: Department of Music, University of California.

[14] Robel, A. (August 2006). *Analysis/resynthesis with the short time Fourier.* Berlin: Institute of communication science TU

[15] G. Heinzel, A. R. (February 2002). *Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-tops windows.* Hannover.