

PENALA NADA ALAT MUSIK MENGGUNAKAN ALIHRAGAM FOURIER

Oleh : Andi Kurnia (L2F000574)
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H Sudarto S. H., Tembalang, Semarang
e-mail : Katrosid@Yahoo.com

Abstrak - Melalui peristiwa resonansi, alat musik akustik dapat menghasilkan gelombang bunyi dengan berbagai jenis nada. Tinggi-rendahnya nada ditentukan oleh frekuensi dasar gelombang bunyi. Semakin besar frekuensi dasar gelombang bunyi, maka semakin tinggi pula nada yang dihasilkan, demikian pula sebaliknya.

Indera pendengaran manusia dapat membedakan tinggi-rendahnya nada, namun tidak dapat mengetahui secara pasti jenis nada apa yang didengar olehnya. Hal ini sangatlah penting bagi seorang pemusik untuk mengetahui apakah alat musiknya sudah menghasilkan nada-nada yang tepat.

Suatu penala nada alat musik dapat membantu manusia untuk mengetahui jenis nada apa yang didengar olehnya, sehingga para pemusik dapat menala alat musiknya dengan benar sebelum bermain musik. Dengan menggunakan alihragam Fourier, frekuensi dasar suatu nada dapat diketahui sehingga dari frekuensi dasar ini dapat diketahui pula jenis nadanya.

Kata kunci : frekuensi dasar, penalaan nada, jenis nada, alihragam Fourier.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Musik merupakan ekspresi yang timbul dari dalam jiwa manusia yang diwujudkan dalam bentuk karya seni. Musik terbentuk dari kumpulan nada-nada yang tersusun secara harmonis sehingga menghasilkan “sesuatu yang indah” menurut indera pendengaran yang dimiliki manusia.

Alat musik alami maupun pita suara manusia dapat menghasilkan gelombang bunyi dengan berbagai jenis nada. Tinggi rendahnya nada ditentukan oleh frekuensi dasar gelombang bunyi. Semakin besar frekuensi dasar gelombang bunyi, maka semakin tinggi nada yang dihasilkan. Semakin kecil frekuensi dasar gelombang bunyi, maka semakin rendah pula nada yang dihasilkan.

Indera pendengaran manusia tidak dapat mengetahui secara pasti jenis nada apa yang didengar olehnya, terkecuali bagi para pemusik profesional. Hal ini amatlah penting bagi seorang pemusik untuk mengetahui apakah alat musiknya sudah menghasilkan nada-nada yang tepat.

Program komputer dapat melakukan penalaan nada alat musik dengan menghitung frekuensi dasar gelombang bunyi alat musik tersebut dari hasil alihragam Fourier dan mencocokkan frekuensi dasar tersebut dengan frekuensi dasar nada referensi yang baku. Dengan demikian jenis nada alat musik dapat diketahui secara pasti untuk melakukan penalaan nada alat musik.

1.2 Tujuan

Tujuan pembuatan Tugas Akhir ini adalah menyusun program simulasi penala nada alat musik dengan program bantu MATLAB untuk mencari nilai frekuensi dasar suatu gelombang suara alat musik dengan menggunakan alihragam Fourier. Kemudian frekuensi dasar yang diperoleh dicocokkan dengan frekuensi dasar baku tiap nada dan menampilkan teks notasi nada alat musik yang akan ditala.

1.3 Batasan Masalah

1 Data yang diolah program adalah suara yang dihasilkan oleh alat musik petik yaitu gitar akustik.

- 2 Metode yang digunakan adalah pencocokan frekuensi dasar gelombang suara alat musik dari hasil alihragam Fourier dengan frekuensi dasar baku tiap nada.
- 3 Program simulasi ditulis dengan bahasa pemrograman MATLAB versi 6.5.

II. PENGGUNAAN ALIHRAGAM FOURIER UNTUK PENALAAN NADA

2.1 Teori Nilai Frekuensi Nada ^[7]

Ada tujuh jenis nada pokok yang dikenal yaitu nada C, D, E, F, G, A dan B. Tiap nada ini memiliki nilai frekuensi dengan perbandingan tertentu sehingga tiap nada dapat berulang dengan nilai frekuensi dua kali lebih besar yang disebut dengan oktaf. Berikut ini adalah nilai frekuensi dasar tujuh nada pada oktaf ke-tiga.

Nada	Jarak 2 Nada	Frekuensi (Hz)	Perbandingan
C		264	24 : 24
D	1	297	27 : 24
E	1	330	30 : 24
F	1/2	352	32 : 24
G	1	396	36 : 24
A	1	440	40 : 24
B	1	495	45 : 24
C'	1/2	528	48 : 24

Sebagai contoh, nilai frekuensi nada D = $(27/24) \times 264 \text{ Hz} = 297 \text{ Hz}$. Suatu nada memiliki frekuensi dua kali lebih besar dari nada yang sama pada oktaf berikutnya atau memiliki frekuensi dua kali lebih kecil dari nada yang sama pada oktaf sebelumnya, contoh nada C' = 2 nada C ($528 \text{ Hz} = 2 \times 264 \text{ Hz}$). Nilai frekuensi tujuh nada pokok dalam 8 oktaf berbeda dapat diperoleh dengan cara tersebut yang ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Nilai frekuensi 7 nada pokok dalam 8 oktaf.

Nada	Oktaf ke-							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	66,00	132,0	264	528	1056	2112	4224	8448
D	74,25	148,5	297	594	1188	2376	4752	9504
E	82,50	165,0	330	660	1320	2640	5280	10560
F	88,00	176,0	352	704	1408	2816	5632	11264
G	99,00	198,0	396	792	1584	3168	6336	12672
A	110,00	220,0	440	880	1760	3520	7040	14080
B	123,75	247,5	495	990	1980	3960	7920	15840

Jarak antara dua nada yang berdekatan disebut *interval*. Jarak nada C–D, D–E, F–G, G–A, dan A–B memiliki jarak sebesar 1, sedangkan jarak nada E–F dan B–C memiliki jarak sebesar 1/2. Di antara dua nada yang berjarak 1 terdapat sebuah nada yang berjarak 1/2 dari kedua nada yang mengapitnya, yang diberi notasi # (kruis). Dengan kata lain, pada ketujuh nada pokok di atas terdapat nada C#, D#, F#, G# dan A#. Nilai frekuensi tiap nada (#) dapat dicari dengan pola interval dan perbandingan nilai frekuensi ketujuh nada pokok di atas yang ditunjukkan sebagai berikut.

Nada	Jarak 2 Nada	Frekuensi (Hz)	Perbandingan
C#	1	275,00	24 : 24
D#		309,38	27 : 24
E	1	352,00	30 : 24
F#	1/2	366,67	32 : 24
G#	1	412,50	36 : 24
A#	1	469,33	40 : 24
B	1	528,00	45 : 24
C#'	1/2	550,00	48 : 24

Sebagai contoh, nilai frekuensi nada F# = (32/30) × nada F = (32/30) × 352 Hz = 366,67 Hz. Nilai frekuensi tiap nada (#) dalam 8 oktaf berbeda dapat diperoleh dengan cara tersebut yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Nilai frekuensi 12 jenis nada dalam 8 oktaf.

Nada	Oktaf ke-							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	66,00	132,0	264	528	1056	2112	4224	8448
C#	68,75	137,5	275	550	1100	2200	4400	8800
D	74,25	148,5	297	594	1188	2376	4752	9504
D#	77,34	154,0	309	618	1237	2475	4950	9900
E	82,50	165,0	330	660	1320	2640	5280	10560
F	88,00	176,0	352	704	1408	2816	5632	11264
F#	91,67	183,3	367	733	1467	2933	5867	11733
G	99,00	198,0	396	792	1584	3168	6336	12672
G#	103,1	206,2	412	825	1650	3300	6600	13200
A	110,00	220,0	440	880	1760	3520	7040	14080
A#	117,3	234,7	469	939	1877	3755	7509	15019
B	123,75	247,5	495	990	1980	3960	7920	15840

2.2 Deret Fourier [1]

Suatu spektrum sinyal umumnya memiliki tiga buah komponen yaitu komponen DC, *fundamental* (dasar) dan harmonisa. Hal ini dapat dilihat dalam persamaan deret Fourier pada Persamaan (1) yang dijabarkan dalam bentuk trigonometri.

$$v(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1)$$

$$v(t) = \underbrace{c_0}_{\text{komponen DC}} + \underbrace{a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t}_{\text{komponen dasar}} + \underbrace{a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + a_n \cos n\omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + \dots + b_n \sin n\omega_0 t}_{\text{komponen harmonisa}}$$

c_0 , a_n dan b_n merupakan koefisien deret Fourier. c_0 adalah komponen DC yang dirumuskan dengan

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2)$$

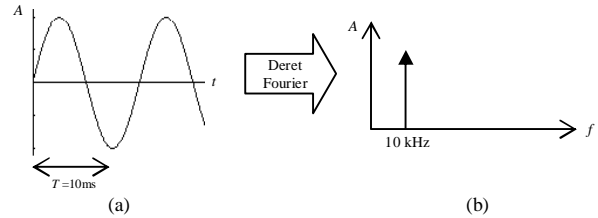
a_n merupakan koefisien kosinus yang dirumuskan dengan

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (3)$$

sedangkan b_n merupakan koefisien sinus yang dirumuskan sebagai

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (4)$$

Sebagai contoh, sebuah sinyal sinus memiliki periode $T_0 = 10$ ms, maka spektrum sinyal sinus tersebut hanya akan memiliki sebuah komponen dasar yaitu $f_0 = 1/T_0 = 10$ kHz yang ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Sinyal sinus dengan periode $T = 10$ ms dalam: (a) kawasan waktu, (b) kawasan frekuensi.

Pada Gambar 1 di atas, komponen dasar $f_0 = 10$ kHz merupakan frekuensi dasar yang menentukan tinggi-rendahnya nada sinyal sinus tersebut.

Pada sinyal periodik bukan sinus, misalnya sinyal gelombang kotak dengan persamaan

$$v(t) = \begin{cases} +A & 0 < t < T_0/2 \\ -A & T_0/2 < t < T_0 \end{cases}$$

dengan amplitudo A dan periode $T_0 = 10$ ms, memiliki koefisien deret Fourier sebagai berikut.

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} A dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T (-A) dt \\ &= \frac{At}{T} \Big|_0^{T/2} - \frac{At}{T} \Big|_{T/2}^T \\ &= 0 \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos n\omega_0 t dt \\ &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} A \cos n\omega_0 t dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T (-A \cos n\omega_0 t) dt \\ &= \frac{2}{T} \frac{A}{n\omega} \left[\sin n\omega \Big|_0^{T/2} + \sin n\omega \Big|_{T/2}^T \right] \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin n\omega_0 t dt \\ &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} A \sin n\omega_0 t dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T (-A \sin n\omega_0 t) dt \end{aligned}$$

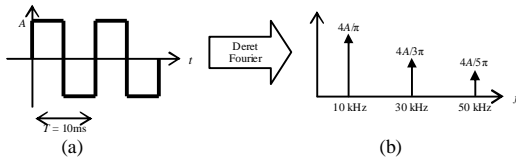
$$= \frac{A}{n\pi} [1 - 2\cos n\pi + \cos 2n\pi]$$

$$\begin{aligned} n = 1 &\rightarrow b_1 = 4/\pi \\ n = 2 &\rightarrow b_2 = 0 \\ n = 3 &\rightarrow b_3 = 4A/3\pi \\ n = 4 &\rightarrow b_4 = 0 \\ n = 5 &\rightarrow b_5 = 4A/5\pi \\ &\text{dan seterusnya} \dots \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan koefisien deret Fourier di atas, maka persamaan sinyal kotak dengan amplitudo A dan periode $T_0 = 10$ ms dapat ditulis dalam bentuk Persamaan (1) di atas, yaitu

$$v(t) = \frac{4A}{\pi} \sin \omega t + \frac{4A}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{4A}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots$$

Sinyal kotak tersebut memiliki komponen dasar yaitu spektrum $f_0 = 1/T_0 = 10$ kHz dan komponen harmonisa yaitu spektrum $3f_0 = 30$ kHz, $5f_0 = 50$ kHz, $7f_0 = 70$ kHz dan seterusnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Sinyal kotak dengan periode $T = 10$ ms dalam: (a) kawasan waktu, (b) kawasan frekuensi.

Dari Gambar 2.3 di atas, tampak bahwa komponen dasar yaitu spektrum 10 kHz memiliki amplitudo tertinggi, sehingga sinyal kotak di atas memiliki nada dengan frekuensi dasar sebesar 10 kHz.

2.3 Alihragam Fourier ^{[1] [4] [6]}

Alihragam Fourier digunakan untuk mendapatkan penggambaran sinyal bukan periodik dalam kawasan frekuensi. Persamaan alihragam Fourier diperoleh dari persamaan deret Fourier suatu sinyal periodik pada Persamaan (5), yaitu

$$v(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(nf_0) e^{j2\pi n f_0 t} \quad (5)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt \right] e^{j2\pi n f_0 t} \quad (6)$$

Persamaan (6) di atas hampir sama bentuknya dengan persamaan integral Fourier untuk sinyal bukan periodik, yaitu

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j2\pi f t} dt \right] e^{j2\pi f t} df \quad (7)$$

Integral dalam tanda kurung pada Persamaan (7) di atas merupakan alihragam Fourier pada $v(t)$ yang ditulis dengan $V(f)$ atau $F[v(t)]$, yaitu

$$V(f) = F[v(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (8)$$

Persamaan (8) di atas merupakan pengintegralan sepanjang waktu yang menghasilkan sebuah fungsi dengan variabel f yang kontinyu.

Fungsi $v(t)$ dapat diperoleh kembali dari $V(f)$ dengan alihragam Fourier balik, yaitu pengintegralan sepanjang frekuensi f .

$$v(t) = F^{-1}[V(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} V(f) e^{j2\pi f t} df \quad (9)$$

Persamaan (8) dan (9) merupakan pasangan integral Fourier. Jika $v(t)$ diketahui, maka $V(f)$ dapat dicari, begitu pula sebaliknya. $V(f)$ merupakan spektrum sinyal bukan periodik, namun $V(f)$ adalah fungsi kontinyu di semua nilai frekuensi. Sedangkan $c(nf_0)$ didefinisikan hanya untuk nilai frekuensi diskrit. Oleh karena itu sebuah sinyal bukan periodik akan memiliki spektrum kontinyu. Berikut ini adalah tiga sifat penting $V(f)$.

1. Alihragam Fourier merupakan fungsi yang kompleks, jadi $|V(f)|$ merupakan spektrum amplitudo dan $\arg V(f)$ merupakan spektrum frekuensi.
2. Nilai $V(f)$ pada saat $f = 0$ merupakan integral $v(t)$ dari $-\infty$ sampai $+\infty$.

$$V(0) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) dt \quad (10)$$

3. Jika $v(t)$ riil, maka

$$V(-f) = V^*(f) \quad (11a)$$

dan

$$|V(-f)| = |V(f)| \quad \arg V(-f) = -\arg V(f) \quad (11b)$$

sehingga sama seperti pada deret Fourier, alihragam Fourier juga memiliki simetri genap pada spektrum amplitudo dan simetri ganjil pada spektrum fasanya.

Sebagai contoh, akan dicari $V(f)$ dari sebuah pulsa kotak yang merupakan sinyal bukan periodik dengan persamaan

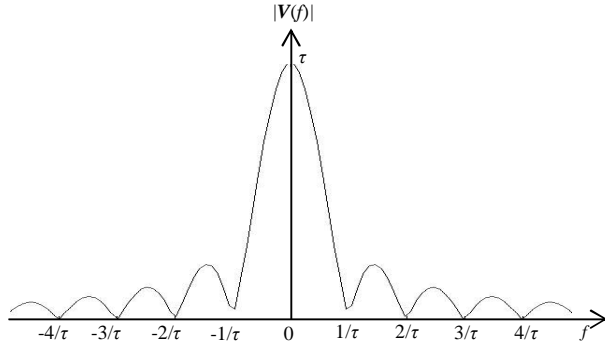
$$\Pi(t/\tau) = \begin{cases} 1 & |t| < \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

Dengan menggunakan Persamaan (7) didapat

$$\begin{aligned} V(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \int_{-\tau/2}^{\tau/2} 1 \cdot e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \frac{1}{j2\pi f} e^{-j2\pi f t} \Big|_{-\tau/2}^{\tau/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{j2\pi f} \left[e^{j\pi f \tau} - e^{-j\pi f \tau} \right] \\
&= \frac{2}{2\pi f} \sin\left(\frac{2\pi f \tau}{2}\right) \\
&= \frac{1}{\pi f} \sin(\pi f \tau) \\
&= \tau \operatorname{sinc} \pi f \tau
\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, sinyal impuls kotak bukan periodik memiliki spektrum amplitudo berupa fungsi sinc kontinyu yang ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Spektrum sinyal impuls kotak berupa fungsi sinc kontinyu.

Pada sinyal periodik, penggambaran dalam kawasan waktu diperoleh kembali dengan menjumlahkan fasor frekuensi diskrit. Sedangkan pada sinyal bukan periodik, penggambaran dalam kawasan waktu diperoleh kembali dengan mengintegalkan fungsi frekuensi kontinyu.

2.4 Alihragam Fourier Diskrit [4][6]

Pada pembuatan program penala nada alat musik, komputer digunakan sebagai alat bantu pemrograman. Sinyal suara alat musik yang masuk ke kartu suara komputer mengalami proses yang disebut *sampling* atau pencuplikan. Pada proses pencuplikan, data kontinyu dicuplik pada titik-titik tertentu dengan periode pencuplikan tertentu sehingga diperoleh data diskrit dengan nilai-nilai amplitudo pada titik-titik tersebut.

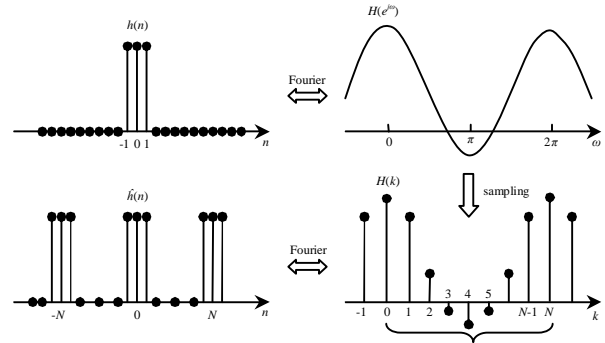
Alihragam Fourier Diskrit atau *Discrete Fourier Transform* (DFT) digunakan untuk menghitung spektrum frekuensi sinyal suara diskrit yang telah dicuplik. DFT merupakan runtun frekuensi diskrit dalam durasi tertentu yang diperoleh dengan mencuplik satu periode alihragam Fourier $H(e^{j\omega})$.

Pencuplikan $H(e^{j\omega})$ dilakukan pada sejumlah titik N dalam periode $0 \leq \omega < 2\pi$, atau pada $\omega_k = 2\pi k/N$ dengan $0 \leq k \leq (N-1)$. Jika $\{h(n)\}$ merupakan runtun sinyal diskrit dengan alihragam Fourier $H(e^{j\omega})$, maka DFT dinotasikan $\{H(k)\}$ dan dirumuskan dengan

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi nk/N} \quad 0 \leq k \leq (N-1) \quad (12)$$

Alihragam Fourier $H(e^{j\omega})$ bersifat periodik dengan periode $\omega = 2\pi$, maka perluasan deret Fourier-nya memiliki koefisien yang sama dengan runtun sinyal diskrit $\{h(n)\}$. Jika suatu fungsi kawasan waktu kontinyu dicuplik

dengan periode cuplik T_s , maka hasilnya berupa fungsi kawasan waktu diskrit yang bilamana dialihragamkan akan menghasilkan sebuah fungsi periodik kontinyu dalam kawasan frekuensi dengan periode $2\pi/T_s$. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Pembentukan $\{\hat{h}(n)\}$ yang bersifat periodik dengan mencuplik spektrum $H(e^{j\omega})$ menjadi $H(k)$ pada $N=8$.

Gambar 4 di atas menunjukkan $H(e^{j\omega})$ yang dicuplik dengan periode $\omega_s = 2\pi/N$ dengan hasil pencuplikan berupa $H(k)$. Bila $H(k)$ dialihragam Fourier balik, maka $H(k)$ menjadi $\{\hat{h}(n)\}$ yang bersifat periodik dengan periode $2\pi/\omega_s = N$.

Alihragam Fourier diskrit balik atau *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT) ditentukan dengan cara menghitung runtun waktu diskrit dari runtun DFT pada Persamaan (12), yaitu

$$h(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) e^{j2\pi nk/N} \quad 0 \leq n \leq (N-1) \quad (13)$$

Persamaan (12) dan (13) merupakan algoritma dasar bagi suatu komputer untuk menghitung DFT dan IDFT. Jumlah N titik frekuensi dalam satu periode DFT sama dengan jumlah elemen pada runtun waktu diskrit. Untuk mendapatkan jumlah titik yang lebih banyak pada runtun DFT, dilakukan penambahan durasi $\{h(n)\}$ dengan menambah jumlah elemen bernilai nol. Elemen bernilai nol tersebut tidak mempengaruhi penjumlahan pada Persamaan (12), namun mengurangi lebar tiap titik frekuensi $e^{j2\pi nk/N}$.

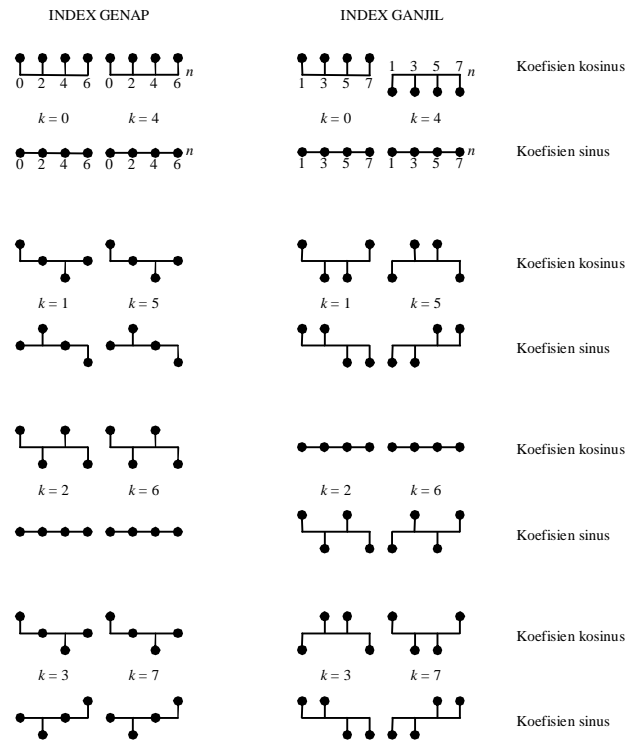
2.5 Algoritma Alihragam Fourier Cepat [4][6]

Algoritma Alihragam Fourier Cepat atau *Fast Fourier Transform* (FFT) merupakan prosedur penghitungan DFT yang efisien sehingga akan mempercepat proses penghitungan DFT. Algoritma FFT memanfaatkan sifat simetri pada rutun eksponensial kompleks dengan mengurangi jumlah perkalian pada penghitungan DFT. Untuk mengevaluasi N -titik DFT, algoritma FFT akan efisien jika N merupakan bilangan dasar 2, artinya jumlah elemen masukan yang dibutuhkan sebanyak $N = 2^{\text{NLOG}2}$.

Untuk masukan diskrit yang riil, definisi DFT pada Persamaan (12) dapat ditulis dalam bentuk trigonometri menjadi

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cos(2\pi nk/N) - j \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \sin(2\pi nk/N)$$

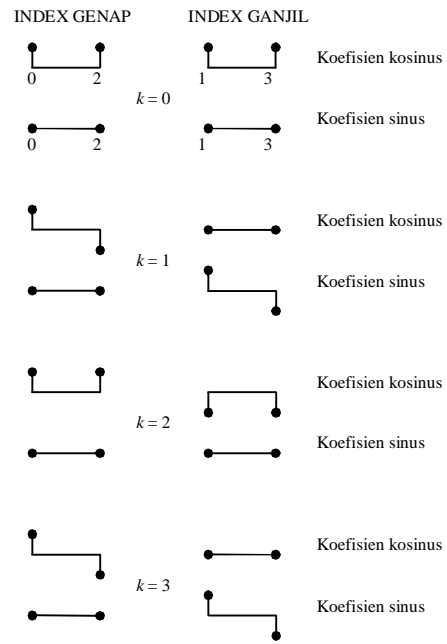
Untuk menghitung runtun masukan N -titik DFT ini diperlukan perkalian $2N^2$ yang riil. Koefisien sinus dan kosinus diperlukan dalam menghitung $H(k)$ untuk $N = 8$. Koefisien untuk menghitung batas nilai k dan $\{(N/2) + k\}$ pada $0 \leq n \leq \{(N/2)-1\}$ menunjukkan kesamaan yang menarik, yaitu koefisien untuk nilai n genap adalah sama, sedangkan untuk n ganjil memiliki besar yang sama namun berlawanan tanda. Untuk membahas kesamaan ini, runtun masukan $\{h(n)\}$ dibagi menjadi dua yaitu $\{h_E(n)\}$ yang terdiri dari elemen berindeks n genap dan $\{h_O(n)\}$ yang terdiri dari elemen berindeks n ganjil. Pasangan koefisien ini ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5 Koefisien kosinus dan sinus untuk perhitungan elemen ke- k 8 titik DFT.

Berikut ini adalah dua sifat yang diamati pada pemisahan indeks DFT. Pertama, koefisien pada titik frekuensi k identik dengan $\{(N/2) + k\}$ untuk $0 \leq k \leq \{(N/2)-1\}$, maka pengaruhnya pada $H(k)$ dan $H(N/2 + k)$ akan sama juga. Kedua, koefisien-koefisien ini diperlukan untuk menghitung $N/2$ titik DFT berindeks genap atau $\{h_E(n)\}$. Untuk menghitungnya, diperlukan perkalian riil pada $2(N/2)^2 = N^2/2$ sehingga akan didapat hasil yang sama, kecuali untuk indeks ganjil yang mengalami perubahan tanda. Penghitungan $N/2$ titik alihragam untuk indeks genap dan ganjil memerlukan perkalian N^2 yang nilainya lebih kecil dari jumlah perkalian semula yaitu $2N^2$. Oleh karena itu, dengan memisahkan atau mengurangi jumlah indeks akan mengurangi jumlah perhitungan dalam mengevaluasi DFT.

Untuk lebih lagi mengurangi jumlah perkalian, anggap $\{h_E(n)\}$ merupakan data masukan yang akan diubah menjadi $N/2$ titik DFT. Kemudian $\{h_E(n)\}$ dipisah lagi ke dalam indeks genap dan ganjil yang ditunjukkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6 Koefisien kosinus dan sinus untuk perhitungan elemen ke- k 4 titik DFT.

Dua sifat yang muncul dalam pemisahan indeks pada Gambar 6 di atas sama seperti pada pemisahan indeks sebelumnya (Gambar 5), yaitu koefisien pada titik frekuensi k identik dengan $\{(N/2) + k\}$ untuk $0 \leq k \leq \{(N/4)-1\}$, dan koefisien ini diperlukan dalam penghitungan sebuah $N/4$ titik DFT. Pada tingkat pengurangan indeks ini, diperoleh empat sub-deret dengan panjang $N/4$, masing-masing sub-deret memerlukan $2(N/4)^2 = N^2/8$ perkalian untuk menghitung $N/4$ titik DFT. Pada pengurangan indeks sebelumnya diperlukan $N^2/2$ perkalian, dengan kata lain terjadi pengurangan jumlah perkalian dari $N^2/2$ menjadi $N^2/8$.

Operasi pengurangan indeks dapat terus dilakukan sampai data masukan menjadi sub-deret yang hanya terdiri dari 2 buah titik saja. Pada tingkat ini, semua koefisien merupakan 0 atau ± 1 , dan tidak memerlukan operasi perkalian. Hal ini dapat dibuktikan dengan memasukkan $N = 2$ dan $k = 0$ atau 1 ke dalam Persamaan (14). Oleh sebab itu, 2-titik DFT dapat dihitung dengan menambah dan mengurangi jumlah elemen pada tingkat pengurangan yang serendah mungkin. Karena data masukan awal memiliki elemen sebanyak $N = 2^{\text{NLOG}2}$, maka jumlah elemennya dapat dikurangi sebanyak $\text{NLOG}2 - 1$ kali menjadi $2^{\text{NLOG}2 - 1}$ sub-deret yang terdiri dari 2 titik DFT. Tabel 3 berikut ini menunjukkan perbandingan jumlah perkalian yang diperlukan antara DFT dengan FFT.

Tabel 3 Perbandingan jumlah perkalian riil untuk N -titik DFT ($N = 2^k$) dengan FFT.

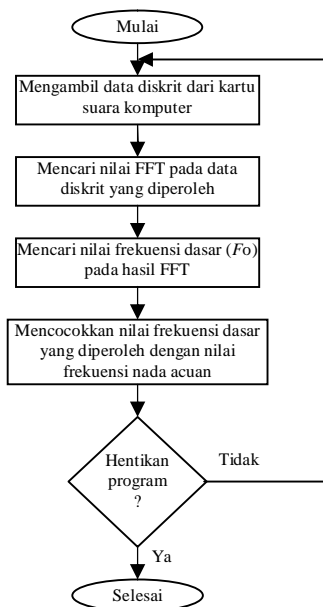
NLOG2	N	DFT ($4N^2$)	FFT ($4 N \log_2 N$)
5	32	4 096	640
6	64	16 384	1 536
7	128	65 536	3 584
8	256	262 144	8 192
9	512	1 048 576	18 432
10	1 024	4 194 304	40 960

Dari Tabel 3 di atas tampak bahwa algoritma FFT memiliki jumlah perkalian yang lebih sedikit dari DFT untuk menghitung alihragam Fourier suatu data masukan diskrit. Hal ini akan mempercepat proses perhitungan yang

dilakukan komputer dalam mencari alihragam Fourier suatu sinyal masukan.

III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PROGRAM

Diagram alir program penala nada alat musik ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7 Diagram alir rancangan program penala nada alat musik.

Proses pada diagram alir di atas dilakukan secara berulang tiap 0,1 detik agar program dapat menala nada secara langsung (*rel-time*).

3.1 Pengambilan Sinyal Masukan Diskrit

Frekuensi yang dapat didengar oleh telinga manusia adalah 20 Hz sampai 20000 Hz. Sesuai dengan kriteria Nyquist, besar frekuensi cuplik minimal dua kali frekuensi maksimum, maka sinyal masukan dicuplik dengan frekuensi 44100 Hz. Artinya dalam 1 detik terdapat 44100 *sample*. Pengambilan data dilakukan tiap 1024 *sample* / 0,1 detik dengan perintah `peekdata`.

3.2 Penghitungan FFT dan Pencarian Nilai Frekuensi Dasar Sinyal Masukan

Penghitungan FFT dilakukan pada 1024 *sample* suara yang telah diambil dengan perintah `fft`. Untuk mencari frekuensi dasar sinyal masukan, maka dilakukan pencarian frekuensi yang memiliki *magnitude* terbesar pada spektrum FFT. Pencarian frekuensi dasar ini dilakukan dengan perintah `find`.

3.3 Pencocokan Frekuensi Dasar Sinyal Masukan dengan Frekuensi Nada Acuan

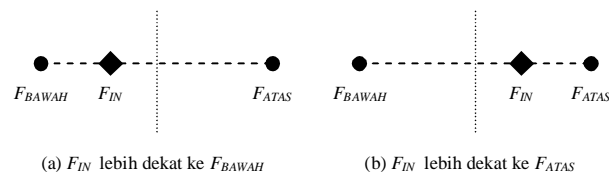
Untuk memudahkan pencocokan, nilai frekuensi nada acuan pada Tabel 2 disimpan ke dalam bentuk indeks mutlak pada matriks [kunci,oktaf] yang ditunjukkan pada Gambar 8 berikut.

F_1	F_{13}	F_{25}	F_{37}	F_{49}	F_{61}	F_{73}	F_{85}	$\rightarrow C$
F_2	F_{14}	F_{26}	F_{38}	F_{50}	F_{62}	F_{74}	F_{86}	$\rightarrow C\#$
F_3	F_{15}	F_{27}	F_{39}	F_{51}	F_{63}	F_{75}	F_{87}	$\rightarrow D$
F_4	F_{16}	F_{28}	F_{40}	F_{52}	F_{64}	F_{76}	F_{88}	$\rightarrow D\#$
F_5	F_{17}	F_{29}	F_{41}	F_{53}	F_{65}	F_{77}	F_{89}	$\rightarrow E$
F_6	F_{18}	F_{30}	F_{42}	F_{54}	F_{66}	F_{78}	F_{90}	$\rightarrow F$
F_7	F_{19}	F_{31}	F_{43}	F_{55}	F_{67}	F_{79}	F_{91}	$\rightarrow F\#$
F_8	F_{20}	F_{32}	F_{44}	F_{56}	F_{68}	F_{80}	F_{92}	$\rightarrow G$
F_9	F_{21}	F_{33}	F_{45}	F_{57}	F_{69}	F_{81}	F_{93}	$\rightarrow G\#$
F_{10}	F_{22}	F_{34}	F_{46}	F_{58}	F_{70}	F_{82}	F_{94}	$\rightarrow A$
F_{11}	F_{23}	F_{35}	F_{47}	F_{59}	F_{71}	F_{83}	F_{95}	$\rightarrow A\#$
F_{12}	F_{24}	F_{36}	F_{48}	F_{60}	F_{72}	F_{84}	F_{96}	$\rightarrow B$
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1	2	3	4	5	6	7	8	

Oktaf

Gambar 8 Indeks mutlak elemen matriks [kunci, oktaf].

Pencocokan nilai frekuensi dasar sinyal masukan dengan frekuensi nada acuan dilakukan dengan mencari dua buah indeks mutlak frekuensi nada acuan yang mengapit frekuensi dasar sinyal masukan tersebut. Jika frekuensi dasar sinyal masukan lebih dekat ke salah satu dari dua frekuensi nada acuan yang mengapitnya, maka jenis nada sinyal masukan tersebut sama dengan jenis nada acuan yang didekatinya. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 9 berikut.



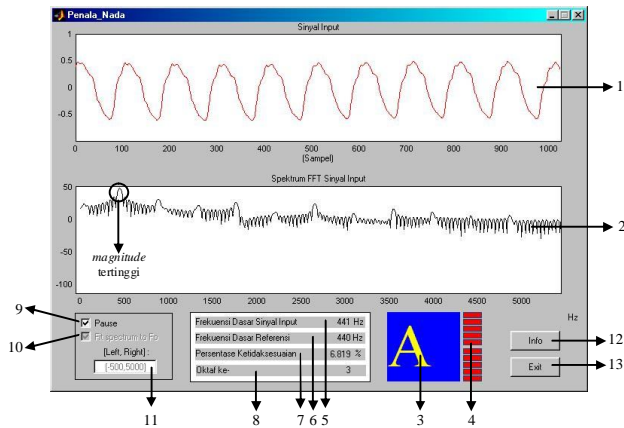
Gambar 9 Letak nilai frekuensi dasar sinyal masukan di antara dua buah frekuensi nada acuan yang mengapitnya.

IV. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Jendela Program Penala Nada

Jendela program penala nadayang ditunjukkan pada Gambar 10 berisi:

1. Grafik sinyal masukan;
2. Grafik spektrum FFT sinyal masukan;
3. Simbol nada yang ditala;
4. Penanda ketepatan nada yang ditala;
5. Nilai frekuensi dasar sinyal masukan;
6. Nilai frekuensi nada acuan yang didekati;
7. Persentase ketidaksesuaian nada yang ditala;
8. Urutan oktaf nada yang ditala;
9. Tombol sela;
10. Tombol penyesuai spektrum FFT;
11. Kolom pengisian batas sumbu x spektrum FFT yang diperiksa;
12. Tombol keterangan;
13. Tombol keluar dari program penala nada.



Gambar 10 Jendela program penala nada alat musik.

Pada Gambar 10 di atas, sinyal masukan yang berasal dari gitar akustik memiliki nilai frekuensi dasar sebesar 441 Hz. Frekuensi ini terletak di antara frekuensi nada acuan 440 Hz (nada A oktaf ke-3) dan 469,33 Hz (nada A# oktaf ke-3). Karena frekuensi dasar sinyal masukan lebih dekat ke frekuensi nada acuan 440 Hz, maka sinyal masukan tersebut memiliki jenis nada yaitu nada A pada oktaf ke-3.

Persentase ketidakesesuaian nada sinyal masukan tersebut adalah 6,819 % yang dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase} &= \frac{441 \text{ Hz} - 440 \text{ Hz}}{(469,33 \text{ Hz} - 440 \text{ Hz}) / 2} \times 100 \% \\
 &= \frac{1}{14,665} \times 100 \% \\
 &= 6,819 \%
 \end{aligned}$$

Dari penghitungan di atas, nada sinyal masukan yang ditala lebih tinggi dari nada acuan sebesar 6,819 %.

Karena persentase ketidakesesuaian nada yang ditala lebih kecil dari batas toleransi yang diberikan yaitu 10 %, maka nada sinyal masukan di atas dianggap sudah tepat dengan nada acuan, sehingga semua lampu penanda terlihat menyala.

4.2 Penalaan Nada Secara Tidak Langsung

Pada pengujian penalaan nada secara tidak langsung, digunakan berkas rekaman suara gitar akustik yang berisi tangga nada C Mayor dengan urutan nada C, D, E, F, G, A, B dan C', pada dua buah oktaf yang berbeda yaitu oktaf ke-3, dan 4. Hasil Penalaannya ditunjukkan dalam Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Hasil Penalaan Rekaman Suara Tangga Nada C Mayor dengan Gitar Akustik.

Jenis Nada	Oktaf ke-	F ₀ Input (Hz)	F Nada Acuan (Hz)	Persentase Ketidakesesuaian (%)	Indikator Menyala
C	3	264,60	264,00	10,19	1 atas 1 bawah
	4	524,79	528,00	-19,45	
D	3	295,47	297,00	-13,91	1 bawah
	4	590,94	594,00	-13,91	
E	3	330,75	330,00	6,82	semua
	4	661,50	660,00	6,82	
F	3	352,80	352,00	10,91	1 atas 1 bawah
	4	701,19	704,00	-12,77	

Sambungan Tabel 4

Jenis Nada	Oktaf ke-	F ₀ Input (Hz)	F Nada Acuan (Hz)	Persentase Ketidakesesuaian (%)	Indikator Menyala
G	3	392,49	396,00	-23,93	1 bawah
	4	784,98	792,00	-23,93	
A	3	441,00	440,00	6,82	semua
	4	882,00	880,00	6,82	
B	3	493,92	495,00	-8,41	semua
	4	987,84	990,00	-8,14	

4.3 Penalaan Nada Secara Langsung

Untuk melakukan penalaan nada suara gitar akustik secara langsung, digunakan gitar akustik yang dilengkapi mikrofon, sehingga gitar dapat langsung dihubungkan ke lubang mikrofon pada kartu suara komputer. Jika gitar akustik tidak memiliki mikrofon, dapat digunakan mikrofon biasa yang didekatkan pada lubang suara gitar akustik tersebut.

Sinyal suara yang masuk ke program penala harus memiliki nilai amplitudo yang cukup besar agar proses penalaan dapat berjalan dengan baik. Hal ini dilakukan dengan memaksimalkan tingkat kekerasan suara mikrofon dalam pengatur tingkat kekerasan suara pada sistem operasi komputer.

4.4 Analisis Hasil Pengujian

Dari percobaan yang dilakukan pada penalaan nada suara gitar, program penala nada cukup mengalami kesulitan untuk mengenali nada-nada rendah. hal ini ditunjukkan pada tampilan simbol nada yang berubah-ubah sehingga sulit untuk menentukan jenis nada-nada rendah yang ditala tersebut. Sedangkan untuk nada-nada tinggi, program dapat dengan mudah mengenali jenis nada-nada tersebut karena tampilan simbol nada tidak berubah-ubah atau stabil. Hal ini disebabkan karena selisih frekuensi pada nada-nada rendah sangat kecil sedangkan selisih frekuensi pada nada-nada tinggi sangat besar. Namun dapat disimpulkan bahwa program penala nada ini dapat melakukan penalaan nada suara gitar akustik yang sedang dibunyikan dalam waktu yang bersamaan.

Sinyal suara derau dapat mempengaruhi hasil penalaan nada. Sinyal suara derau tersebut dapat berasal dari mikrofon dan kabel penghubung yang digunakan serta dari lingkungan sekitar. Untuk mengurangi derau digunakan mikrofon dan kabel yang memiliki kualitas yang cukup baik dan sebaiknya penalaan dilakukan pada ruangan yang cukup tenang dan bersih dari derau.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Tinggi-rendah nada dan jenisnya ditentukan oleh nilai frekuensi dasar sinyal nada tersebut yang dapat diketahui dengan alihragam Fourier.
2. Program penala nada alat musik ini dapat melakukan penalaan nada secara langsung dari alat musik maupun secara tidak langsung dari berkas rekaman suara alat musik.
3. Nada-nada rendah cukup sulit untuk dikenali karena selisih frekuensi pada nada-nada tersebut sangat kecil, hal ini ditunjukkan oleh simbol nada yang selalu berubah-ubah.

4. Nada-nada tinggi mudah untuk dikenali karena selisih frekuensi pada nada-nada tersebut sangat besar, hal ini ditunjukkan oleh simbol nada yang tetap atau tidak berubah-ubah.
5. Sinyal suara derau dapat mempengaruhi hasil penalaan suatu nada, semakin besar sinyal derau maka nada yang ditala semakin sulit untuk dikenali.

Saran-saran

1. Metode penalaan nada dibuat lebih baik lagi, yaitu dengan menambah parameter-parameter dan prosedur pengenalan nada agar nada-nada rendah mudah untuk dikenali dan ditala dengan baik.
2. Perangkat keras yang digunakan sebaiknya memiliki kualitas yang cukup baik sehingga derau yang dihasilkan tidak terlalu besar serta penalaan nada dilakukan pada ruangan yang cukup bersih dari derau.
3. Alat musik yang digunakan pada pengujian program penala nada dapat lebih bervariasi lagi, misalnya alat musik tiup dan gesek.
4. Aplikasi program ini sebaiknya bukan hanya untuk melakukan penalaan nada, melainkan dapat digunakan untuk mengenali suatu *chord* yang tersusun dari beberapa jenis nada.
5. Program penala nada dibuat dengan menggunakan program bantu lain sehingga program penala nada dapat dijalankan tanpa harus menjalankan program bantu terlebih dahulu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Carlson, A. Bruce, *Communication Systems*, McGraw-Hill Book Company, 1986
- [2]. Hanselman, Duane, and Bruce Littlefield, *MATLAB : Bahasa Komputasi Teknis*, Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2000
- [3]. Ivana, *Pengenalan Ucapan Vokal Bahasa Indonesia Dengan Jaringan Saraf Tiruan Menggunakan linear Predictive Coding*, Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2003
- [4]. Kuc, Roman, *Introduction to Digital Signal Processing*, McGraw-Hill Book Company, 1988
- [5]. Little N.J and Shure I, *Data Acquisition Toolbox*, for use with MATLAB, The MATHWORKS inc.
- [6]. Sitanggang, Doni, *Pengenalan Vokal Bahasa Indonesia Dengan Jaringan Saraf Tiruan Melalui Transformasi Fourier*, Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2002.
- [7]. Surya, Yohanes, *Fisika SMU*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997
- [8]. _____, *Tata Bahasa Indonesia Baku*, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Perum Balai Pustaka, 1992.



ANDI KURNIA
(L2F000574)

Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro dengan konsentrasi di bidang Elektronika Telekomunikasi. Saat ini sedang menyelesaikan studi Strata-1 (S1).

Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing II

Achmad Hidayatno, ST, MT
NIP. 132 137 933