

KARAKTERISASI PARAMETER AKUSTIK PADA SUARA YANG DIPRODUKSI OLEH PITA SUARA BUATAN

CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC PARAMETERS SOUND PRODUCED BY ARTIFICIAL VOCAL CORDS

Orienta Sebayang¹, Drs. Suwandi., M.Si.², Hertiana Bethaningtyas D.K., M.T.³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Telkom Bandung

¹ orientasebayang@yahoo.com, ² swi@ittelkom.ac.id, ³ bethaningtyas23@gmail.com

Abstrak

Model biomekanik merupakan suatu alat yang berfungsi untuk menghasilkan suara yang diproduksi oleh pita suara buatan. Rancangan dari model biomekanik dibangun dengan 2 jenis, yaitu: model biomekanik pria dan model biomekanik wanita. Proses yang dilakukan untuk membuat model biomekanik meliputi: pembuatan model laring, model pita suara buatan, dan model resonator. Karakterisasi parameter akustik pada suara yang diproduksi oleh pita suara buatan bertujuan untuk menganalisis nilai performansi suara yang dihasilkan oleh pita suara. Tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter akustik meliputi normalisasi data suara, *Fast Fourier Transform* (FFT), analisis frekuensi dasar (F_0), *jitter*, *shimmer*, dan *Harmonic-to-Noise Ratio* (HNR). Berdasarkan hasil pengujian pita suara buatan yang telah dilakukan, didapatkan bahwa rentang nilai frekuensi dasar yang dihasilkan dari model biomekanik pria bernilai 129.88 Hz – 158 Hz dengan nilai rata-rata *jitter*, *shimmer*, HNR bernilai 0.9773 %, 0.70595 dB, 27.601 dB. Sedangkan pada model biomekanik wanita rentang frekuensi dasar bernilai 195.87 Hz – 230.87 Hz dengan nilai rata-rata *jitter*, *shimmer*, dan HNR bernilai 0.9325 %, 0.57175 dB, 36.680 dB.

Kata Kunci : Pita Suara, *Fast Fourier Transform* (FFT), frekuensi dasar (F_0), *jitter*, *shimmer*, *Harmonic-to-Noise Ratio* (HNR)

Abstract

Biomechanical models is a tool that serves to produce a sound that is produced by artificial vocal cords. The draft of biomechanical models built with 2 types, namely: biomechanical models men and biomechanical model women. Process undertaken to create biomechanical models include: the modeling of the larynx, models vocal cords artificial, and models resonance. Characterization of acoustic parameters sound produced by artificial vocal cords aims to analyze the performance value of the sounds produced by the vocal cords. Steps being taken to get the value of the acoustic parameters include normalization of sound data, Fast Fourier Transform (FFT), analysis of the fundamental frequency (F_0), jitter, shimmer, and Harmonic-to-Noise Ratio (HNR). Based on the test result of artificial vocal cords that had been done, it was found that range of the values of the fundamental frequency generated from male biomechanical models is 129.88 Hz – 158 Hz with an average value of jitter, shimmer, and HNR 0.9773 %, 0.70595 dB, 27.601 dB. While in women biomechanical models basic frequency range is 195.87 Hz – 230.87 Hz with an average value of jitter, shimmer, and HNR is 0.9325 %, 0.57175 dB, 36.680 dB.

Keywords : *Vocal Cords, Fast Fourier Transform (FFT), fundamental frequency (F_0), jitter, shimmer, Harmonic-to-Noise Ratio (HNR)*

1. Pendahuluan

Percakapan merupakan proses komunikasi untuk menyampaikan informasi dari pembicara kepada pendengar. Dalam proses komunikasi, suara merupakan bagian yang paling penting. Proses produksi suara manusia terjadi di dalam laring. Pada laring terdapat pita suara yang akan bergetar akibat aliran udara dari paru-paru. Gangguan fisiologis sementara maupun permanen yang terjadi pada fungsi organ penghasil suara manusia dapat mengakibatkan kesulitan berkomunikasi. Gangguan pada fungsi organ penghasil suara manusia umumnya terjadi pada pita suara. Gangguan pada fungsi kerja pita suara manusia dapat dianalisis dengan cara melakukan karakterisasi suara manusia. Hasil dari karakterisasi suara manusia ini digunakan sebagai perbandingan nilai karakterisasi parameter akustik dari suara yang dihasilkan pada percobaan pita suara buatan.

Model biomekanik merupakan salah satu solusi alternatif yang ditawarkan oleh penulis untuk menjawab permasalahan di atas. Model biomekanik digunakan untuk membantu menganalisis karakterisasi parameter akustik pada pita suara. Prinsip kerja dari model biomekanik ini dengan cara memberikan respon aliran udara dari paru-paru mekanik sehingga pita suara akan bergetar menghasilkan bunyi. Hasil suara yang dihasilkan oleh model biomekanik ini nantinya akan dicocokkan dengan parameter akustik pada suara manusia normal (sehat). Perancangan pada model biomekanik ini terdiri dari model biomekanik dan sistem *software (tool)*. Perancangan sistem model biomekanik berupa model laring, model pita suara buatan, dan model resonator. Pada perancangan sistem *software* berupa *interface* antara *user* yang berfungsi sebagai validasi suara yang dihasilkan oleh pita suara buatan.

2. Dasar Teori

2.1 Proses Produksi Suara Manusia

Proses produksi suara pada manusia dapat dibagi menjadi tiga bagian proses fisiologis, yaitu: pembentukan aliran udara dari paru-paru, perubahan aliran udara dari paru-paru menjadi suara, baik pada saat bersuara (*voiced*) maupun tidak bersuara (*unvoiced*) yang lebih dikenal dengan istilah fonasi (*phonation*), dan proses modulasi atau pengaturan suara menjadi bunyi yang spesifik (artikulasi). Organ tubuh yang terlibat pada proses produksi suara manusia meliputi: paru-paru (*lung*), tenggorokan (*trachea*), laring (*larynx*), faring (*pharynx*), pita suara (*vocal cord*), rongga mulut (*oral cavity*), lidah (*tongue*), dan bibir (*lips*).

Laring (*larynx*) merupakan organ yang memproduksi suara dan melindungi masuknya benda asing ke dalam saluran pernapasan. Setiap manusia mempunyai ukuran yang berbeda-beda. Laring pria mempunyai panjang 44 mm dan laring wanita 36 mm dengan ukuran diameter *transversal* pada pria 43 mm dan 41 mm pada wanita.^[4] Pada laring terdapat pita suara yang berfungsi untuk menghasilkan suara. Suara yang dihasilkan pada laring terjadi karena pita suara bergetar sesuai dengan laju aliran udara yang dipompa oleh paru-paru.

Pita suara bergetar pada frekuensi 80-100 Hz pada pria, 180-220 Hz pada wanita, dan sekitar 300 Hz pada anak-anak.^[8] Volume suara dapat disesuaikan dengan meningkatkan tekanan di pita suara selama getaran. Gerakan dari kartilago tiroid bergerak membentang anterior, sehingga suara yang ingin dihasilkan sesuai dengan tekanan yang diatur oleh *pitch*. Volume suara yang dihasilkan dimanipulasi dengan cara mengalirkan aliran udara dari paru-paru yang menyebabkan pita suara bergetar pada amplitudo tinggi.

2.2 Parameter Akustik

Jitter, *shimmer*, dan *Harmonic-to-Noise Ratio* (HNR) merupakan variasi dari frekuensi dasar (F_0) dan amplitudo yang digunakan untuk mendeskripsikan kualitas patologi suara manusia. Nilai yang digunakan merupakan salah satu aspek karakterisasi suara tertentu.

2.2.1 Jitter

Jitter (relatif) adalah perbedaan rata-rata nilai mutlak dari periode ke periode yang berturut-turut, dibagi dengan periode rata-rata.

Persamaan *jitter* (relatif)^[10]:

$$Jitter \text{ (relatif)} = 100\% \times \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |T_{i+1} - T_i|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i} \quad (2.1)$$

Dengan T_i merupakan panjang periode frekuensi dasar (F_0) yang diekstraksi, N merupakan jumlah periode frekuensi dasar (F_0) yang diekstraksi.

2.2.2 Shimmer

Shimmer (dB) adalah modulasi amplitudo suara yang dinyatakan sebagai perubahan amplitudo dari *peak to peak* atau dari periode ke periode pada frekuensi dasar yang dinyatakan dalam desibel (dB).

Persamaan *shimmer* (dB)^[10]:

$$Shimmer \text{ (dB)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| 20 \times \log \left(\frac{A_i}{A_{i+1}} \right) \right| \quad (2.2)$$

Dengan A_i merupakan jumlah amplitudo *peak to peak* yang diekstraksi, N merupakan jumlah periode frekuensi dasar (F_0) yang diekstraksi.

2.2.3 Harmonic-to-Noise Ratio (HNR)

Harmonic-to-Noise Ratio (HNR) digunakan untuk mengetahui tingkat kejelasan dari sinyal suara yang diukur. Dengan cara mencari nilai harmonisasi amplitudo sinyal dalam desibel (dB). Ada beberapa variasi perhitungan parameter dalam menentukan *Harmonic-to-Noise Ratio* (HNR). Namun pada identifikasi sinyal suara biasanya penentuan HNR didapatkan dari parameter spektrogram berupa NFFT.^[7]

$$HNR = 10 \log \left\{ \frac{\sum_i^{NFFT/2} |S_i|}{\sum_i^{NFFT/2} |N_i|} \right\} \quad (2.3)$$

Dengan S_i adalah nilai-nilai harmonik yang diperoleh dari spektrum daya yang dihasilkan, N_i adalah nilai-nilai noise yang terdapat pada daerah harmonik yang didapat dari estimasi *noise floor*.

Semakin besar nilai HNR yang diperoleh, maka semakin harmonis sinyal yang digunakan.

2.3 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan teknik yang digunakan untuk menghasilkan spektrum frekuensi. FFT merupakan teknik yang biasa digunakan untuk menganalisis suara. FFT dapat mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. FFT merupakan suatu algoritma yang dapat mengefisienkan fungsi dari *Discrete Fourier Transform* (DFT). Kelebihan FFT dibandingkan dengan DFT adalah FFT dapat melakukan kalkulasi yang cepat dibandingkan dengan DFT. Dengan menggunakan FFT jumlah DFT yang sebanyak 1.024 titik, dapat dihitung dengan menggunakan 512 titik.

Persamaan *Fast Fourier Transform*^[11]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_n^{-kn} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.4)$$

3. Perancangan Sistem

Perancangan dan implementasi sistem dari model biomekanik yang dibuat merupakan sebuah rancangan yang berfungsi untuk menampilkan bentuk pita suara pada saat bergetar dan menampilkan spektrum frekuensi dari sinyal suara yang dihasilkan. Implementasi dari sistem bersifat *real time*, sehingga setiap masukan yang diterima langsung diproses oleh PC untuk menghasilkan spektrum warna, nilai *jitter*, nilai *shimmer*, dan nilai *Harmonic-to-Noise Ratio* (HNR). Selanjutnya, hasil dari nilai parameter akustik tersebut ditampilkan pada *Graphical User Interface* (GUI). Proses pengolahan sinyal suara membutuhkan alat bantu, yaitu *soundcard* yang berfungsi sebagai *Analog/Digital Converter* (A/D Converter).

3.1 Perancangan dan Pembuatan Model Mekanik

Proses perancangan dan pembuatan model biomekanik terbagi menjadi 3 bagian, yaitu: suplai udara, proses mekanik (model laring, pita suara buatan, resonator), dan pengambilan data/sinyal suara. Pada penelitian yang dilakukan, suplai udara berasal dari kompresor yang dapat mensuplai udara sesuai dengan tekanan udara yang dibutuhkan.

3.1.1 Suplai Udara

Suplai udara pada model biomekanik berasal dari kompresor yang berfungsi sebagai paru-paru. Udara dari kompresor dialirkan agar pita suara dapat bergetar dan menghasilkan bunyi. Pada model biomekanik, bunyi yang dihasilkan dapat diatur sesuai dengan tekanan udara yang melewati *valve*. Tekanan udara paru-paru manusia untuk menghasilkan bunyi pada pita suara berkisar antara 0,3 kPa-1,2 kPa.^[8] Nilai tekanan udara yang diberikan akan mengubah besar volume suara yang didengar oleh manusia. Suplai udara model biomekanik diberikan secara berkala dengan rentang waktu 10 detik. Bagian input dari model biomekanik terhubung dengan pipa PVC yang mempunyai diameter dalam 1,25 inch.

3.1.2 Model Laring

Model laring merupakan salah satu bagian yang berfungsi sebagai proses pembentukan suara. Bentuk dan ukuran laring yang digunakan menentukan karakteristik suara yang akan dihasilkan. Pembuatan model laring terbagi menjadi 2 jenis, yaitu: model laring pria dan model laring wanita. Dimensi laring yang digunakan pada model mekanik sama seperti dimensi laring pada manusia. Ukuran model laring pria mempunyai panjang 15,4 cm dengan diameter 4,1 cm. Sedangkan ukuran model laring wanita mempunyai panjang 14,6 cm dengan diameter 4,1 cm. Pada Gambar 3.1 menunjukkan model laring yang digunakan pada model mekanik.



Gambar 3.1 Model Laring pada Model Mekanik

3.1.3 Model Pita Suara Buatan

Pita suara merupakan komponen utama untuk menghasilkan suara pada model biomekanik. Model pita suara buatan ini nantinya akan bergetar pada saat diberikan aliran udara dari kompresor. Komponen bahan pita suara yang digunakan akan menentukan frekuensi suara yang dihasilkan. Tingkat kekerasan dari bahan yang digunakan sebagai pita suara buatan ini berkisar antara 25-40.^[7]

Tabel 3.1 Nilai Karakteristik Bahan *Silicone Rubber RTV 586*

Bahan	Hardness	Specific Gravity	Viscosity (cP)	Operating time (Minutes)	Tensile Strength (kg/cm^2)	Elongation (%)
RTV-585	23	1.22	35000	50	35.16	440
RTV-586	25	1.2	45000	30	32.35	650

Pada perancangan model pita suara buatan, bahan yang akan digunakan untuk membuat pita suara terbuat dari karet silikon RTV 586. Bahan karet silikon RTV 586 merupakan material yang mempunyai tingkat kekerasan yang paling sesuai (Tabel 3.1) dan banyak dijual di Indonesia.



Gambar 3.2 Hasil Pita Suara Buatan (a) Kondisi Sehat, (b) Kondisi Sakit

3.1.4 Model Resonator

Model resonator merupakan bagian yang berfungsi untuk menguatkan suara yang dihasilkan oleh getaran pita suara. Pada manusia bagian resonator terdiri dari saluran *vocal tract* (tenggorokan, rongga hidung, dan rongga mulut). Resonator pada sistem model mekanik mempunyai prinsip kerja sama seperti sistem pipa organa terbuka. Penentuan nilai frekuensi yang dihasilkan oleh resonansi dari model mekanik ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan pipa organa terbuka.

$$f_r = n \times \frac{v}{2 \times L} \tag{3.1}$$

Dengan f_r merupakan frekuensi resonansi (Hz), v merupakan kecepatan aliran udara dalam pipa (m/s), L merupakan panjang pipa resonator (m), n bernilai 1,2,3,..

Jenis pipa yang digunakan pada model resonator merupakan pipa PVC. Penentuan ukuran pada model resonator yang digunakan pada model mekanik berdasarkan ukuran dari saluran *vocal tract* pada manusia. Ukuran model resonator yang digunakan memiliki panjang masing-masing 16,9 cm (pria) dan 14,1 cm (wanita) dengan diameter 3,81 cm. Pada Gambar 3.3 menunjukkan model resonator yang digunakan.



Gambar 3.3 Hasil Model Resonator pada Model Mekanik

4. Pengujian dan Analisis

4.1 Pengujian Model Mekanik

Proses pengujian mekanik dilakukan untuk membandingkan suara yang dihasilkan oleh pita suara buatan dengan hasil suara pita suara manusia. Prosedur pengujian model mekanik ini meliputi teknik perekaman suara, pengolahan data suara, dan pengecekan data suara yang dihasilkan.

4.1.1 Teknik Perekaman Suara

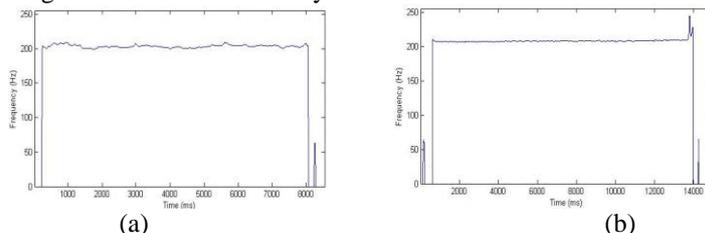
Prosedur perekaman suara dilakukan untuk menguji hasil suara yang dihasilkan dari model biomekanik. Teknik perekaman dilakukan secara langsung yaitu dengan menggunakan *microphone* dan *Analog Digital Converter (ADC)*. Suara yang dihasilkan dari model biomekanik direkam menggunakan *software* Goldwave dan disimpan dalam format *.wav. Proses perekaman data suara berlangsung selama 10 detik pada frekuensi sampling 44100 Hz dan resolusi 16 bit. Jumlah data suara yang direkam dari model biomekanik sebanyak 500 data suara yang terdiri dari 250 data suara model biomekanik pria dan 250 data suara model biomekanik wanita.

4.1.2 Pengolahan Data Suara

Proses pengolahan data suara dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter-parameter sinyal suara yang diinginkan. Proses awal dari pengolahan data suara yaitu normalisasi sinyal suara. Normalisasi sinyal suara dilakukan untuk menyamakan rentang amplitudo suara dengan cara membagi nilai-nilai amplitudo dengan nilai amplitudo tertinggi sehingga diperoleh nilai hasil harmonisasi suara dengan rentang nilai maksimum 1 dan nilai minimum -1. Selanjutnya hasil normalisasi sinyal suara diproses dengan FFT untuk mendapatkan nilai dari parameter akustik yang diinginkan. Hasil akhir dari tampilan data suara yang ditampilkan pada GUI meliputi grafik sinyal suara, grafik *frequency power spectrum*, spektrogram, serta parameter akustik seperti frekuensi dasar, nilai *jitter*, nilai *shimmer*, dan HNR.

4.1.3 Pengecekan Data Suara

Proses pengecekan data suara bertujuan untuk memastikan hasil sinyal suara yang dihasilkan oleh model biomekanik dalam kondisi normal. Untuk mengetahui kualitas sinyal suara yang dihasilkan dari model biomekanik, terlebih dahulu dilihat bentuk grafik frekuensi dasar dan karakteristik suara yang dihasilkan. Pada Gambar 4.1 menunjukkan grafik frekuensi dasar sinyal suara dari model biomekanik dan manusia normal.



Gambar 4.1 Frekuensi Dasar Sinyal Suara (a) Manusia, (b) Model Biomekanik

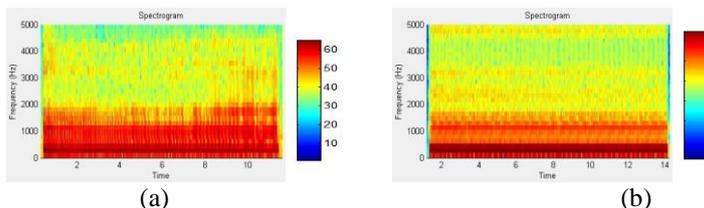
Dari grafik sinyal suara yang dihasilkan pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa grafik frekuensi dasar pada manusia normal mempunyai bentuk yang cenderung datar.

4.2 Analisis Karakterisasi Data Suara Berdasarkan Parameter Akustik

4.2.1 Analisis Spektrogram

Spektrogram merupakan suatu bentuk representasi visual dari analisis suara dalam bentuk dua dimensi yang menggambarkan hubungan dari frekuensi terhadap waktu. Spektrogram digunakan untuk melihat suatu gambaran pola dari perubahan spektrum sinyal suara dalam rentang waktu yang singkat. Proses yang digunakan untuk menghasilkan spektrogram adalah dengan proses *Fast Fourier Transform* (FFT). Proses ini digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi.

Dalam sebuah spektrogram, sumbu horisontal mempresentasikan waktu sedangkan sumbu vertikal mempresentasikan nilai frekuensi. Untuk mengidentifikasi nilai spektrogram dapat menggunakan warna atau nilai skala. Warna yang terdapat dalam spektrogram mempresentasikan amplitudo sesuai dengan frekuensi yang dihasilkan. Pada Gambar 4.2 menunjukkan hasil spektrogram dari data suara model biomekanik dan data suara manusia.



Gambar 4.2 Hasil Spektrogram Suara (a) Manusia, (b) Model Biomekanik

Gambar 4.2 merupakan diagram perubahan spektrum suara dalam rentang waktu tertentu. Pada gambar 4.2 juga dapat dilihat bahwa nilai frekuensi dasar yang dihasilkan dari masing-masing sumber berada pada daerah yang berwarna merah tua. Daerah yang berwarna gelap merupakan daerah yang mempunyai nilai amplitudo paling besar.

4.2.2 Frekuensi Dasar Pada Model Biomekanik dan Manusia

Proses pembentukan suara pada model biomekanik dimulai dari aliran udara kompresor yang mengetarkan pita suara. Getaran yang dihasilkan dari pita suara tersebut menghasilkan gelombang periodik. Frekuensi dasar merupakan nilai frekuensi terendah dari suatu gelombang periodik. Nilai frekuensi dasar yang dihasilkan mempunyai nilai yang berbeda. Pada manusia, frekuensi dasar dibedakan berdasarkan jenis kelamin dan usia. Rata-rata nilai frekuensi dasar pada wanita memiliki nilai frekuensi yang lebih besar daripada pria. Perbedaan nilai frekuensi ini disebabkan oleh banyak faktor, yaitu mulai dari ukuran pita suara sampai dengan ukuran *vocal tract* yang berbeda. Dimensi pita suara pada pria memiliki ukuran 20% lebih besar daripada pita suara wanita. Sedangkan ukuran *vocal tract* pada wanita memiliki panjang yang lebih pendek dari pria. Hal ini mengakibatkan frekuensi suara yang dihasilkan pada wanita memiliki nilai frekuensi yang lebih besar dari pria.

Tabel 4.1 merupakan hasil perbandingan nilai frekuensi dasar pada manusia dan model biomekanik. Data sinyal suara manusia yang digunakan berasal dari *database* yang diunduh dari *Saarbrücken Voice Database* (SVD). Data yang diambil merupakan data suara manusia dewasa dalam kondisi normal. Pada model biomekanik data suara yang direkam dilakukan secara langsung dalam format *.wav*. Suara yang direkam merupakan suara yang dihasilkan oleh getaran pita suara buatan dan melewati tabung resonansi.

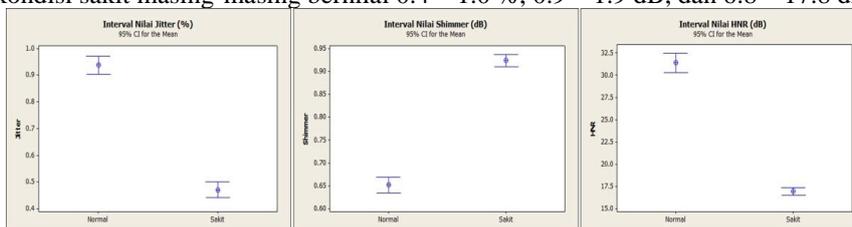
Tabel 4.1 Hasil Frekuensi Dasar Pria pada Manusia dan Biomekanik

Frekuensi Dasar (Fo)	Minimum	Maksimum	Rata-rata
Manusia Pria	88.67	171.4	123.7
Biomekanik Pria RTV-585	129.88	132.38	131.11
Biomekanik Pria RTV-586	153	158	154.12

Tabel 4.2 merupakan hasil perbandingan nilai frekuensi dasar manusia dengan model biomekanik. Dari Tabel 4.2 dapat terlihat nilai rata-rata frekuensi dasar dari manusia wanita sebesar 230.37 Hz sedangkan untuk model biomekanik RTV-585 sebesar 205.01 Hz dan model biomekanik RTV-586 sebesar 206.01 Hz. Sama seperti pada model biomekanik pria, hasil frekuensi dasar pada model biomekanik RTV-586 cenderung lebih tinggi daripada frekuensi dasar model biomekanik RTV-585.

4.2.3 Analisis Nilai Parameter Akustik pada Suara Manusia

Parameter akustik merupakan salah satu metode untuk menentukan kualitas suara yang dihasilkan pita suara manusia. Pada Gambar 4.3 ditampilkan nilai interval dari nilai rata-rata parameter akustik pada suara manusia dalam kondisi sehat dan kondisi sakit. Nilai interval dari *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada kondisi normal masing-masing bernilai 0.4 – 1.3 %, 0.4 – 0.9 dB, dan 20 – 31 dB. Sedangkan nilai interval dari *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada kondisi sakit masing-masing bernilai 0.4 – 1.0 %, 0.9 – 1.9 dB, dan 6.8 – 17.8 dB.



Gambar 4.3 Nilai Interval Parameter Akustik pada Manusia

Hasil dari perbandingan nilai parameter akustik pada manusia pria dengan kondisi sehat dan kondisi sakit ditampilkan pada Tabel 4.3. Nilai variabel yang diukur meliputi nilai minimum, nilai maksimum, dan nilai rata-rata data suara manusia.

Tabel 4.2 Nilai Parameter Akustik pada Manusia Pria

Parameter	Manusia Pria Sehat			Manusia Pria Sakit		
	<i>Jitter</i> (%)	<i>Shimmer</i> (dB)	HNR (dB)	<i>Jitter</i> (%)	<i>Shimmer</i> (dB)	HNR (dB)
Minimum	0.4023	0.478	20.154	0.3644	0.49	4.956
Maksimum	1.3122	0.90926	31.65	0.9611	1.5691	19.951
Rata-rata	0.9955	0.70694	24.227	0.8241	1.1826	11.451

Dari Tabel 4.3 dapat terlihat bahwa nilai rata-rata *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada kondisi sehat sebesar 0.9955 %, 0.70694 dB, dan 24.227 dB. Sedangkan dalam kondisi sakit nilai rata-rata *jitter*, *shimmer*, dan HNR sebesar 0.8241 %, 1.1826 dB, dan 11.451 dB. Hasil nilai rata-rata *jitter* dan HNR dari suara pria dalam kondisi sehat lebih tinggi dari suara pria kondisi sakit. Sedangkan nilai *shimmer* pada kondisi sehat memiliki nilai rata-rata yang lebih rendah dari kondisi sakit.

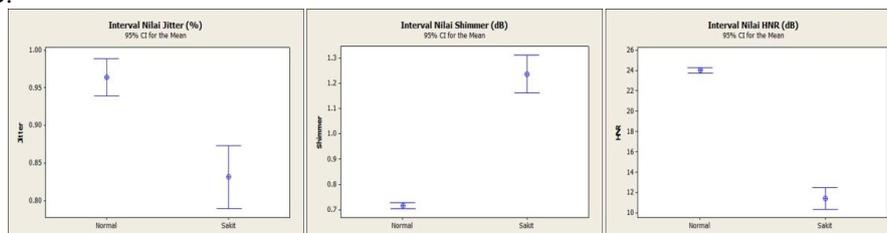
Tabel 4.3 Nilai Parameter Akustik pada Manusia Wanita

Parameter	Manusia Wanita Sehat			Manusia Wanita Sakit		
	<i>Jitter</i> (%)	<i>Shimmer</i> (dB)	HNR (dB)	<i>Jitter</i> (%)	<i>Shimmer</i> (dB)	HNR (dB)
Minimum	0.5145	0.49355	20.139	0.4354	0.9325	6.8
Maksimum	1.3374	0.89234	30.693	1.0138	1.9656	17.862
Rata-rata	0.933	0.72641	23.811	0.8383	1.2812	11.452

Dari Tabel 4.4 dapat terlihat bahwa nilai rata-rata *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada kondisi sehat sebesar 0.933 %, 0.72641 dB, dan 23.811 dB. Sedangkan dalam kondisi sakit nilai rata-rata *jitter*, *shimmer*, dan HNR sebesar 0.8383 %, 1.2812 dB, dan 11.452 dB. Dari hasil nilai rata-rata *jitter* dan HNR dari suara wanita dalam kondisi sehat lebih tinggi dari suara wanita kondisi sakit. Sedangkan nilai *shimmer* pada kondisi sehat memiliki nilai rata-rata yang lebih rendah dari kondisi sakit.

4.2.4 Analisis Nilai Parameter Akustik pada Suara Biomekanik

Analisis parameter akustik pada suara berfungsi untuk mengetahui tingkat kecocokan suara yang dihasilkan dari pita suara buatan. Sama seperti pada analisis pita suara manusia, analisis akustik dari model biomekanik menggunakan nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) sebagai analisis kualitas suara dari pita suara buatan. Gambar 4.4 merupakan nilai interval dari nilai rata-rata parameter akustik pada biomekanik RTV-585 dengan kondisi sehat dan kondisi sakit. Nilai interval dari *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada biomekanik kondisi normal masing-masing bernilai 0.4 – 1.3 %, 0.5 – 0.8 dB, dan 22 – 38 dB. Sedangkan nilai interval dari *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada biomekanik kondisi sakit masing-masing bernilai 0.2 – 0.8 %, 0.7 – 1.2 dB, dan 11.4 – 19.2 dB.



Gambar 4.4 Nilai Interval Parameter Akustik pada Biomekanik RTV-585

Hasil analisis nilai parameter akustik dari suara biomekanik dibandingkan dengan nilai parameter akustik pada suara manusia untuk dilihat seberapa besar nilai *error* dari nilai parameter akustik dari suara yang dihasilkan oleh model biomekanik. Nilai variabel yang diukur meliputi nilai minimum, nilai maksimum, dan nilai rata-rata dari data suara biomekanik. Pada Tabel 4.5 ditampilkan nilai parameter akustik dari model biomekanik pria RTV-585.

Tabel 4.4 Nilai Parameter Akustik pada Biomekanik Pria RTV-585

Parameter	Biomekanik Pria RTV-585 Sehat			Biomekanik Pria RTV-585 Sakit		
	<i>Jitter</i> (%)	<i>Shimmer</i> (dB)	HNR (dB)	<i>Jitter</i> (%)	<i>Shimmer</i> (dB)	HNR (dB)
Minimum	0.6164	0.62941	22.409	0.6164	0.62941	15.422
Maksimum	1.2951	0.83629	30.135	1.2951	0.83629	19.235
Rata-rata	0.9622	0.73373	26.015	0.9622	0.73373	17.568

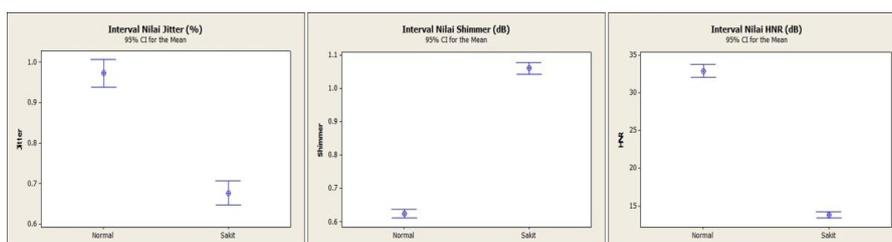
Dari Tabel 4.5 dapat dilihat nilai parameter akustik pada model biomekanik pria RTV-585 kondisi sehat memiliki rata-rata nilai *jitter* dan HNR yang lebih tinggi dari biomekanik pria kondisi sakit sedangkan nilai rata-rata *shimmer* kondisi sehat memiliki nilai yang lebih rendah dari nilai *shimmer* kondisi sakit. Berdasarkan hasil nilai parameter akustik pada manusia pria (Tabel 4.3) dan biomekanik pria RTV-585 (Tabel 4.5) diperoleh nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) pada kondisi sehat sebesar 0.0333 %, 0.02619 dB, dan 1.788 dB. Sedangkan nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) pada kondisi sakit sebesar 0.3757 %, 0.26887 dB, dan 6.117 dB.

Tabel 4.5 Nilai Parameter Akustik pada Biomekanik Wanita RTV-585

Parameter	Biomekanik Wanita RTV-585 Sehat			Biomekanik Wanita RTV-585 Sakit		
	Jitter (%)	Shimmer (dB)	HNR (dB)	Jitter (%)	Shimmer (dB)	HNR (dB)
Minimum	0.439	0.5316	33.2	0.2519	0.80519	11.408
Maksimum	1.3538	0.6982	38.629	0.7699	1.04394	18.968
Rata-rata	0.9125	0.57039	36.723	0.4933	0.93437	16.346

Tabel 4.6 merupakan hasil nilai parameter akustik pada biomekanik wanita RTV-585. Dari hasil nilai parameter akustik pada wanita (Tabel 4.4) dengan hasil nilai akustik pada model biomekanik wanita RTV-585 (Tabel 4.6) dapat diperoleh nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) pada kondisi sehat sebesar 0.0205 %, 0.57039 dB, dan 12.912 dB. Sedangkan hasil nilai *error* pada kondisi sakit sebesar 0.345 %, 0.34683 dB, dan 4.894 dB.

Gambar 4.5 ditampilkan nilai interval dari nilai rata-rata parameter akustik pada biomekanik RTV-586 dengan kondisi sehat dan kondisi sakit. Nilai interval dari *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada biomekanik kondisi normal masing-masing bernilai 0.4 – 1.3 %, 0.5 – 0.8 dB, dan 25 – 40 dB. Sedangkan nilai interval dari *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada biomekanik kondisi sakit masing-masing bernilai 0.4 – 1.0 %, 0.9 – 1.3 dB, dan 7.4 – 17.3 dB.



Gambar 4.5 Nilai Interval Parameter Akustik pada Biomekanik RTV-586

Hasil analisis nilai parameter akustik dari suara biomekanik dibandingkan dengan nilai parameter akustik pada suara manusia untuk dilihat besar nilai *error* dari nilai parameter akustik dari suara yang dihasilkan oleh model biomekanik. Tabel 4.7 merupakan hasil analisis suara dari nilai parameter akustik pada biomekanik pria RTV-586. Nilai variabel yang diukur meliputi nilai minimum, nilai maksimum, dan nilai rata-rata dari data suara biomekanik.

Tabel 4.6 Nilai Parameter Akustik pada Biomekanik Pria RTV-586

Parameter	Biomekanik Pria RTV-586 Sehat			Biomekanik Pria RTV-586 Sakit		
	Jitter (%)	Shimmer (dB)	HNR (dB)	Jitter (%)	Shimmer (dB)	HNR (dB)
Minimum	0.439	0.5316	33.2	0.2519	0.80519	11.408
Maksimum	1.3538	0.6982	38.629	0.7699	1.04394	18.968
Rata-rata	0.9125	0.57039	36.723	0.4933	0.93437	16.346

Pada Tabel 4.7 memperlihatkan rata-rata nilai *jitter* dan nilai HNR pada biomekanik pria RTV-586 kondisi sehat memiliki nilai parameter akustik yang lebih tinggi daripada nilai *jitter* dan nilai HNR pada kondisi sakit. Sedangkan nilai *shimmer* pada kondisi sehat memiliki nilai yang lebih rendah dari nilai *shimmer* pada kondisi sakit. Dari hasil analisis suara manusia pria pada Tabel 4.4 terhadap hasil analisis suara biomekanik pada Tabel 4.7 dapat diperoleh nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) dari model biomekanik RTV-586 pada kondisi sehat sebesar 0.0032 %, 0.02877 dB, dan 4.96 dB. Sedangkan pada kondisi sakit, nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) sebesar 0.1577 %, 0.1203 dB, dan 2.554 dB.

Tabel 4.7 Nilai Parameter Akustik pada Biomekanik Wanita RTV-586

Parameter	Biomekanik Wanita RTV-586 Sehat			Biomekanik Wanita RTV-586 Sakit		
	Jitter (%)	Shimmer (dB)	HNR (dB)	Jitter (%)	Shimmer (dB)	HNR (dB)
Minimum	0.5965	0.52241	30.536	0.4878	0.9526	10.435
Maksimum	1.2496	0.70517	40.19	1.0598	1.2873	17.372
Rata-rata	0.9526	0.57311	36.638	0.688	1.0586	13.656

Tabel 4.8 merupakan hasil nilai analisis parameter akustik dari model biomekanik wanita RTV-586. Dari hasil analisis parameter akustik pada wanita (Tabel 4.4) dengan hasil analisis biomekanik wanita (Tabel 4.8) dapat diperoleh nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) pada kondisi sehat sebesar 0.0196 %, 0.1533 dB, dan 12.827 dB. Pada kondisi sakit, nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter* (%), *shimmer* (dB), dan HNR (dB) sebesar 0.1503 %, 0.2226 dB, dan 2.204 dB.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada tugas akhir yang berjudul Karakterisasi Parameter Akustik Pada Suara Yang Diproduksi Oleh Pita Suara Buatan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai rata-rata dari frekuensi dasar yang dihasilkan dari biomekanik pria RTV-585 sebesar 131.11 Hz dan biomekanik pria RTV-586 sebesar 154.12 Hz sedangkan nilai rata-rata frekuensi dasar pada biomekanik wanita RTV-585 sebesar 205.1 Hz dan biomekanik wanita RTV-586 sebesar 206.1 Hz.
2. Kualitas suara dari model biomekanik terhadap suara manusia memiliki kualitas suara yang cukup baik. Hal tersebut berdasarkan nilai *error* dari rata-rata nilai *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada biomekanik RTV-585 kondisi sehat bernilai 0.0333 %, 0.02619 dB, 1.788 dB dan pada biomekanik RTV-586 pada kondisi sehat bernilai 0.0032 %, 0.02877 dB, 4.96 dB. Sedangkan nilai *error* dari nilai *jitter*, *shimmer*, dan HNR dari biomekanik RTV-585 pada kondisi sakit sebesar 0.3757 %, 0.26887 dB, 6.117 dB dan pada biomekanik RTV-586 kondisi sakit sebesar 0.1577 %, 0.1203 dB, 2.554 dB.
3. Dari hasil perbandingan nilai parameter akustik dari model biomekanik RTV-585 dan RTV-586 terhadap suara manusia diperoleh bahwa nilai persentase *error* dari rata-rata nilai parameter akustik *jitter*, *shimmer*, dan HNR pada model biomekanik dengan bahan *silicone rubber* RTV-586 memiliki nilai persentase *error* paling kecil yaitu pada biomekanik kondisi sehat sebesar 0.843 %, 14.549 %, 27.020 % pada biomekanik kondisi sakit sebesar 22.814 %, 16.493 %, 17.20 %. Dari nilai tersebut menunjukkan bahwa model biomekanik RTV-586 lebih baik dan bisa digunakan untuk pemodelan suara pada manusia.

5.2 Saran

Adapun saran yang bisa dikembangkan berkaitan dengan penelitian yang berjudul Karakterisasi Parameter Akustik Pada Suara Yang Diproduksi Oleh Pita Suara Buatan adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan penelitian dengan mengubah model resonator serta menambahkan sistem motor kontroller pada model resonator sehingga suara yang dihasilkan dari pita suara terdiri dari berbagai macam jenis vokal.
2. Mengembangkan penelitian dengan cara memodelkan sistem model biomekanik dalam bentuk simulasi dengan menggunakan *software*.

5.2 Saran

Adapun saran yang bisa dikembangkan berkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan penelitian dengan menggunakan bahan pita suara buatan yang terbuat dari material karet termoplastik yang dicetak dengan bantuan mesin CNC.
2. Mengembangkan penelitian serupa dengan cara memodifikasi pita suara buatan menjadi kondisi sakit dan melakukan penambahan metode analisis dari pita suara buatan kondisi sakit.
3. Mengembangkan penelitian dengan mengubah model resonator serta menambahkan sistem motor kontroller pada model resonator sehingga suara yang dihasilkan dari pita suara terdiri dari berbagai macam jenis *vowel*.

Daftar Pustaka

- [1] Fukui, Kotaro., dkk. *Development of a Talking Robot with Vocal Cords and Lips Having Human-like Biological Structures*. Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. Agustus 2005.
- [2] Fukui, Kotaro., dkk. *New Anthropomorphic Talking Robot Having Sensory Feedback Mechanism and Vocal Cords based on Human Biomechanical Structure*. Proc. IEEE Int. Conf. Robots and Automations. Februari 2006.
- [3] Fukui, Kotaro., dkk. *New Anthropomorphic Talking Robot Having a Three-dimensional Articulation Mechanism and Improved Pitch Range*. Proc. IEEE Int. Conf. Robots and Automations. April 2007.
- [4] Gray, Henry. 1918. *Anatomy of the Human Body*. Philadelphia: Lea & Febiger. Bartleby.com, 2000. [online], (www.bartleby.com/107/), diakses 12 Mei 2014).
- [5] Kitani, Mitsuki., dkk. *A Talking Robot and Its Human-like Expressive Speech Production*. Proc. IEEE Int. Conf. Human System Interaction. Mei 2011.
- [6] Martini, F.H., Nath, J.L., Bartholomew, E.F. 2012. *Fundamentals of Anatomy & Physiology*. San Fransisco: Pearson Education, Inc.
- [7] Odoemene, O. 2009. *Functioning Model of the Larynx & Voice Analysis System*. Washington DC: The George Washington University.
- [8] Seikel, J.A., King, D.W., dan Drumright, D.G. 2005. *Anatomy & Physiology for Speech, Language, and Hearing*. New York: Thomson Delmar Learning.
- [9] Farrus, Mireia., dkk. *Jitter and Shimmer Measurements for Speaker Recognition*. Proc. IEEE Int. Conf. Signal Processing, IET. Juli 2009.
- [10] Susilawati, Indah. 2009. *Sistem Pengolahan Isyarat*. Yogyakarta: Universitas Mercu Buana.
- [11] Titze, I.R. *Physiologic and Acoustic Differences Between Male and Female Voices*. November 1988.