

**ANALISIS PRODUKSI SUARA ALAT MUSIK TIUP
MENGUNAKAN METODE *FAST FOURIER TRANSFORM*
(FFT) DAN SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*
(CFD)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

**Nama : Dzaki Ulwan
No. Mahasiswa : 20525119
NIRM : 2009070001**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2024

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

Analisis Produksi Suara Alat Musik Tiup Menggunakan Metode *Fast Fourier Transform (FFT)* dan Simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Dzaki Ulwan
No. Mahasiswa : 20525119
NIRM : 2009070001

Yogyakarta, 13 September 2024

Pembimbing I,



Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng.,
Ph.D.

Pembimbing II,



Dr. Ir. Paryana Puspaputra, M.Eng.

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

Analisis Produksi Suara Alat Musik Tiup Menggunakan Metode Fast Fourier Transform (FFT) dan Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD)

TUGAS AKHIR


Disusun Oleh :

Nama : Dzaki Ulwan
No. Mahasiswa : 20525119
NIRM : 2009070001

Tim Penguji


Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D.

Ketua


Tanggal : 08-10-2024

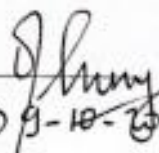
Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

Anggota I


Tanggal : 10-10-2024

Finny Pratama Putera, S.T., M.Eng.

Anggota II


Tanggal : 09-10-2024

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

PERNYATAAN KEASLIAN

Demi Allah Yang Maha Segalanya, dengan ini saya menyatakan bahwa karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang telah saya cantumkan sumbernya sebagai referensi. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pengakuan saya tidak benar serta melanggar peraturan yang sah dalam hak kekayaan intelektual maka saya bersedia mengikuti hukuman maupun sanksi apapun sesuai hukum yang diberlakukan Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 7 Oktober 2024



Dzaki Ulwan

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan nikmat berupa ilmu pengetahuan, kesehatan, kesempatan, serta doa dan dukungan yang diberikan orang-orang tercinta sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

Orang tua, Kakak, Adik dan keluarga yang selalu senantiasa memberikan doa dan dukungan kepada penulis, sehingga terciptalah dan terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Bapak Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Dr. Ir. Paryana Puspaputra, M.Eng. selaku dosen pembimbing, penguji, dan dosen pengajar. Selain itu juga seluruh dosen dan staf program studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang telah membimbing dan membagikan ilmunya kepada penulis secara ikhlas.

Rekan-rekan dari jurusan Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang senantiasa memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis. Dan semua orang-orang yang ada di lingkungan kehidupan penulis yang selalu memberi dukungan yaitu, Teman-Teman Kost Putra Anugrah, Teman-Teman Penghuni Lab KE, dan Teman-Teman KKN.

Besar harapan penulis semoga Tugas Akhir ini dapat berguna serta bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang yang sesuai dengan topik penulis pada masa yang akan mendatang kelak.

HALAMAN MOTTO

“Impian ada di tengah peluh bagai bunga yang mekar secara perlahan usaha keras itu tak akan mengkhianati, Impian ada di tengah peluh selalu menunggu agar ia menguncup suatu hari pasti sampai harapan terkabul”

(JKT48)

"Cukuplah Allah menjadi Penolong kami dan Allah adalah sebaik-baik Pelindung."

(QS. Al-Imran: 173)

"One Piece itu ada!"

(Shirohige)

"Life is like a pencil that will surely run out, but will leave the beautiful writing of life."

(Nami)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'alamin, puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) Dan Fabrikasi Alat Peraga Abdominal Aorta Berbasis Rekonstruksi Data CT-Scan/MRI” dengan lancar.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini tentunya penulis banyak mendapatkan doa dan dukungan dari berbagai pihak, sehingga penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menjalankan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua, Bapak Djuharmin P Sophian dan Ibu Tri Aminah yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis, sehingga penulis dapat menjalankan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP, selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Irfan Aditya Dharma S.T., M.Eng., Ph.D. dan Dr. Ir. Paryana Puspaputra, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang selalu memberikan bimbingan dan ilmu yang sangat bermanfaat kepada penulis selama pelaksanaan Tugas Akhir dan selama penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staf program studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
6. Rekan-rekan seperjuangan Kost Putra Anugrah dan semua rekan-rekan Teknik Mesin 2020 yang telah memberikan dukungan.
7. Semua pihak yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.viii

Dalam penulisan laporan tugas akhir ini penulis telah berusaha Menyusun dengan sebaik-baiknya. Penulis menyadari bahwa di dalam penulisan laporan ini masih banyak terdapat kesalahan sehingga jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan segala macam kritik dan saran yang membangun untuk mencapai hasil yang lebih baik. Penulis berharap agar laporan ini dapat berguna bagi semua yang membacanya dan khususnya bagi penulis sendiri.

Yogyakarta, 7 Oktober 2024

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized letter 'D' with a vertical line through it and a horizontal line at the bottom, followed by a flourish.

Dzaki Ulwan

ABSTRAK

Alat musik tiup merupakan kelompok alat musik yang memanfaatkan aliran udara untuk menghasilkan suara. Dua contoh alat musik tiup yang umum digunakan adalah suling dan rekorder. Penelitian ini menganalisis proses produksi suara pada alat musik tiup menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Fast Fourier Transform (FFT). Simulasi CFD digunakan untuk mengamati pola aliran udara dengan variasi laju aliran yang berbeda, sementara FFT digunakan untuk menganalisis karakteristik spektral suara yang dihasilkan, seperti distribusi frekuensi dan amplitudo. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa perubahan laju aliran udara dalam alat musik tiup memengaruhi frekuensi suara yang dihasilkan. Pada alat musik seruling, pada tangga nada Do, kecepatan aliran maksimum sebesar 2,06 m/s dengan kecepatan udara masuk 2 m/s menghasilkan frekuensi sebesar 984,33 Hz dengan amplitudo 0,0017. Pada tangga nada Mi, kecepatan aliran 2,06 m/s menghasilkan frekuensi 1221,68 Hz dan amplitudo 0,0499. Pada tangga nada Sol, frekuensi yang dihasilkan sebesar 2492,76 Hz dengan amplitudo 0,0492 pada kecepatan aliran 2,06 m/s. Pada alat musik rekorder, frekuensi yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan suling karena perbedaan bentuk geometri dan material. Pada tangga nada Do, kecepatan aliran 2,01 m/s dengan kecepatan udara masuk 2 m/s menghasilkan frekuensi 2401,59 Hz dan amplitudo 0,0576. Pada tangga nada Mi, kecepatan aliran 1,93 m/s menghasilkan frekuensi 3979,26 Hz dengan amplitudo 0,0412. Pada tangga nada Sol, kecepatan aliran 1,95 m/s menghasilkan frekuensi 2623,15 Hz dan amplitudo 0,0439. Dari hasil penelitian ini, diketahui bahwa material rekorder yang terbuat dari Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) menghasilkan frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan suling yang terbuat dari kayu. Hal ini dikarenakan ABS lebih keras dan kaku, memungkinkan getaran udara bergerak lebih cepat dan efisien. Sifat kayu yang alami dan berpori cenderung menyerap energi getaran, sementara ABS yang padat lebih efektif memantulkan getaran udara di dalam alat musik. Selain itu, bentuk geometri instrumen juga memengaruhi suara yang dihasilkan.

Kata kunci: Suling, Rekorder, CFD, FFT, Frekuensi.

ABSTRACT

Wind instruments are a group of musical instruments that utilize air flow to produce sound. Two examples of wind instruments that are commonly used are the flute and recorder. This research analyzes the sound production process on wind instruments using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Fast Fourier Transform (FFT) simulations. CFD simulation is used to observe air flow patterns with different flow rate variations, while FFT is used to analyze the spectral characteristics of the sound produced, such as frequency distribution and amplitude. The CFD simulation results show that changes in the air flow rate in a wind instrument affect the frequency of the sound produced. On a flute musical instrument, on the Do scale, the maximum flow velocity is 2.06 m/s with an inlet air velocity of 2 m/s producing a frequency of 984.33 Hz with an amplitude of 0.0017. On the Mi scale, a flow velocity of 2.06 m/s produces a frequency of 1221.68 Hz and an amplitude of 0.0499. On the Sol scale, the resulting frequency is 2492.76 Hz with an amplitude of 0.0492 at a flow speed of 2.06 m/s. In recorder musical instruments, the frequency produced is higher than in flutes due to differences in geometric shape and material. On the Do scale, a flow velocity of 2.01 m/s with an inlet air velocity of 2 m/s produces a frequency of 2401.59 Hz and an amplitude of 0.0576. On the Mi scale, a flow velocity of 1.93 m/s produces a frequency of 3979.26 Hz with an amplitude of 0.0412. On the Sol scale, a flow velocity of 1.95 m/s produces a frequency of 2623.15 Hz and an amplitude of 0.0439. From the results of this research, it is known that recorder materials made from Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) produce higher frequencies than flutes made from wood. This is because ABS is harder and stiffer, allowing air vibrations to move more quickly and efficiently. The natural, porous nature of wood tends to absorb vibration energy, while dense ABS more effectively reflects air vibrations inside the musical instrument. Apart from that, the geometric shape of the instrument also influences the sound produced.

Keywords: Flute, Recorder, CFD, FFT, Frequency

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	Error! Bookmark not defined.
Pernyataan Kaslian	iv
Halaman Persembahan	1
Halaman Motto	2
Kata Pengantar.....	3
Abstrak	5
<i>Abstract</i>	6
Daftar Isi	7
Daftar Tabel.....	9
Daftar Gambar	10
Daftar Notasi	14
Bab 1 Pendahuluan	15
1.1 Latar Belakang.....	15
1.2 Rumusan Masalah	16
1.3 Batasan Masalah.....	17
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan.....	17
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan.....	17
1.6 Sistematika Penulisan	18
Bab 2 Tinjauan Pustaka	19
2.1 Kajian Pustaka	19
2.2 Dasar Teori	21
2.2.1 Akustik	22
2.2.2 Alat Musik Tiup	23
2.2.3 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	24
2.2.4 <i>Computer Aided Design (CAD)</i>	31
2.2.5 <i>Fast Fourier Transform (FFT)</i>	31
Bab 3 Metode Penelitian.....	33

3.1	Alur Penelitian.....	33
3.2	Peralatan dan Bahan	34
3.3	Proses Perancangan	35
3.3.1	Model Suling Bambu.....	35
3.3.2	Model Rekorder.....	36
3.4	Proses Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	37
3.4.1	Pendefinisian Model.....	37
3.4.2	Pre-processing	39
3.4.3	<i>Processing</i>	43
3.4.4	<i>Post-processing</i>	47
3.5	Proses Pengambilan Data	53
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	56
4.1	Hasil <i>Mesh Dependency</i>	56
4.2	Hasil Rekaman.....	61
4.2.1	Alat Musik Suling.....	61
4.2.2	Alat Musik Rekorder	64
4.2.3	Hasil Seluruh Rekaman	67
4.3	Hasil Simulasi.....	71
4.3.1	Alat Musik Suling.....	71
4.3.2	Alat Musik Rekorder	77
4.4	Analisis dan Pembahasan	83
Bab 5	Penutup.....	87
5.1	Kesimpulan.....	87
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya	87
Daftar Pustaka	89
LAMPIRAN	92

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Alat	34
Tabel 3. 2 Bahan.....	34
Tabel 3. 3 <i>Properties Material</i>	37
Tabel 3. 4 Sifat Aliran	38
Tabel 3. 5 Jenis Aliran.....	38
Tabel 3. 6 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Suling Tangga Nada Do	48
Tabel 3. 7 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Suling Tangga Nada Mi.....	49
Tabel 3. 8 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Suling Tangga Nada Sol	50
Tabel 3. 9 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Rekorder Tangga Nada Do	51
Tabel 3. 10 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Rekorder Tangga Nada Mi ..	51
Tabel 3. 11 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Rekorder Tangga Nada Sol .	52
Tabel 4. 1 Selisih Data <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Suling Tangga Nada Do.	56
Tabel 4. 2 Selisih Data <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Suling Tangga Nada Mi	57
Tabel 4. 3 Selisih Data <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Suling Tangga Nada Sol	57
Tabel 4. 4 Data Frekuensi.....	67
Tabel 4. 5 Data Amplitudo	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gambar <i>Turkish Treble Recorder</i> dan Desain 3D	19
Gambar 2. 2 Data Hasil Pengukuran	20
Gambar 2. 3 Tampilan skema corong klarinet	21
Gambar 2. 4 Bunyi Merupakan Penjalaran Dari Gelombang Sinusoidal.....	23
Gambar 2. 5 Proses Aliran <i>fully-developed</i>	28
Gambar 2. 6 Computer Aided Design	31
Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	33
Gambar 3. 2 Drawing Suling Bambu	35
Gambar 3. 3 3D Suling Bambu	36
Gambar 3. 4 Drawing Rekorder	36
Gambar 3. 5 3D Rekorder	36
Gambar 3. 6 <i>Import Geometry</i> Suling Tangga Nada Do.....	39
Gambar 3. 7 <i>Import Geometry</i> Suling Tangga Nada Mi.....	40
Gambar 3. 8 <i>Import Geometry</i> Suling Tangga Nada Sol	40
Gambar 3. 9 <i>Import Geometry</i> Rekorder Tangga Nada Do	40
Gambar 3. 10 <i>Import Geometry</i> Rekorder Tangga Nada Mi.....	40
Gambar 3. 11 <i>Import Geometry</i> Rekorder Tangga Nada Sol.....	40
Gambar 3. 12 Desain Suling Tangga Nada Do Setelah <i>Meshing</i>	41
Gambar 3. 13 Desain Suling Tangga Nada Mi Setelah <i>Meshing</i>	41
Gambar 3. 14 Desain Suling Tangga Nada Sol Setelah <i>Meshing</i>	42
Gambar 3. 15 Desain Rekorder Tangga Nada Do Setelah <i>Meshing</i>	42
Gambar 3. 16 Desain Rekorder Tangga Nada Mi Setelah <i>Meshing</i>	42
Gambar 3. 17 Desain Rekorder Tangga Nada Sol Setelah <i>Meshing</i>	43
Gambar 3. 18 <i>Input Solver</i>	44
Gambar 3. 19 <i>Input Models</i>	45
Gambar 3. 20 Input Material Udara	45
Gambar 3. 21 <i>Input Material</i> Bambu.....	45
Gambar 3. 22 <i>Input Material Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>	45
Gambar 3. 23 Input Velocity Inlet.....	46
Gambar 3. 24 <i>Input Pressure Outlet</i>	46

Gambar 3. 25 <i>Input Wall</i>	47
Gambar 3. 26 <i>Input Solution Methods</i>	47
Gambar 3. 27 <i>Detail Meshing Element Size 2 mm Suling Tangga Nada Do</i>	48
Gambar 3. 28 <i>Detail Meshing Element Size 2.5 mm Suling Tangga Nada Do</i>	49
Gambar 3. 29 <i>Detail Meshing Element Size 3 mm Suling Tangga Nada Do</i>	49
Gambar 3. 30 <i>Detail Meshing Element Size 3.5 mm Suling Tangga Nada Do</i>	49
Gambar 3. 31 <i>Detail Meshing Element Size 2 mm Suling Tangga Nada Mi</i>	49
Gambar 3. 32 <i>Detail Meshing Element Size 2.5 mm Suling Tangga Nada Mi</i>	49
Gambar 3. 33 <i>Detail Meshing Element Size 3 mm Suling Tangga Nada Mi</i>	50
Gambar 3. 34 <i>Detail Meshing Element Size 3.5 mm Suling Tangga Nada Mi</i>	50
Gambar 3. 35 <i>Detail Meshing Element Size 2 mm Suling Tangga Nada Sol</i>	50
Gambar 3. 36 <i>Detail Meshing Element Size 2.5 mm Suling Tangga Nada Sol</i>	50
Gambar 3. 37 <i>Detail Meshing Element Size 3 mm Suling Tangga Nada Sol</i>	50
Gambar 3. 38 <i>Detail Meshing Element Size 3.5 mm Suling Tangga Nada Sol</i>	50
Gambar 3. 39 <i>Detail Meshing Element Size 2 mm Rekorder Tangga Nada Do</i> ...	51
Gambar 3. 40 <i>Detail Meshing Element Size 2.5 mm Rekorder Tangga Nada Do</i>	51
Gambar 3. 41 <i>Detail Meshing Element Size 3 mm Rekorder Tangga Nada Do</i> ...	51
Gambar 3. 42 <i>Detail Meshing Element Size 3.5 mm Rekorder Tangga Nada Do</i>	51
Gambar 3. 43 <i>Detail Meshing Element Size 2 mm Rekorder Tangga Nada Mi</i> ...	52
Gambar 3. 44 <i>Detail Meshing Element Size 2.5 mm Rekorder Tangga Nada Mi</i>	52
Gambar 3. 45 <i>Detail Meshing Element Size 3 mm Rekorder Tangga Nada Mi</i> ...	52
Gambar 3. 46 <i>Detail Meshing Element Size 3.5 mm Rekorder Tangga Nada Mi</i>	52
Gambar 3. 47 <i>Detail Meshing Element Size 2 mm Rekorder Tangga Nada Sol</i> ..	53
Gambar 3. 48 <i>Detail Meshing Element Size 2.5 mm Rekorder Tangga Nada Sol</i>	53
Gambar 3. 49 <i>Detail Meshing Element Size 3 mm Rekorder Tangga Nada Sol</i> ..	53
Gambar 3. 50 <i>Detail Meshing Element Size 3.5 mm Rekorder Tangga Nada Sol</i>	53
Gambar 3. 51 <i>Skema Pengujian</i>	54
Gambar 3. 52 <i>Proses Pengujian Alat Musik Suling</i>	54
Gambar 3. 53 <i>Proses Pengujian Alat Musik Rekorder</i>	54
Gambar 3. 54 <i>Program MATLAB R2024a</i>	55
Gambar 4. 1 <i>Grafik Mesh Dependency Alat Musik Suling Tangga Nada Do</i>	56
Gambar 4. 2 <i>Grafik Mesh Dependency Alat Musik Suling Tangga Nada Mi</i>	57

Gambar 4. 3 Grafik <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Suling Tangga Nada Sol	58
Gambar 4. 4 Grafik <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Rekorder Tangga Nada Do....	59
Gambar 4. 5 Grafik <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Rekorder Tangga Nada Mi .	60
Gambar 4. 6 Grafik <i>Mesh Dependency</i> Alat Musik Rekorder Tangga Nada Sol.	61
Gambar 4. 7 Grafik DFT dan FFT Suling Tangga Nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	62
Gambar 4. 8 Grafik DFT dan FFT Suling Tangga Nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	63
Gambar 4. 9 Grafik DFT dan FFT Suling Tangga Nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	64
Gambar 4. 10 Grafik DFT dan FFT Rekorder Tangga Nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	65
Gambar 4. 11 Grafik DFT dan FFT Rekorder Tangga Nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	66
Gambar 4. 12 Grafik DFT dan FFT Rekorder Tangga Nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	67
Gambar 4. 13 Grafik Frekuensi Tangga Nada Do.....	68
Gambar 4. 14 Grafik Frekuensi Tangga Nada Mi.....	69
Gambar 4. 15 Grafik Frekuensi Tangga Nada Sol	69
Gambar 4. 16 Amplitudo Tangga Nada Do.....	70
Gambar 4. 17 Amplitudo Tangga Nada Mi.....	70
Gambar 4. 18 Amplitudo Tangga Nada Sol	71
Gambar 4. 19 <i>Velocity</i> Suling Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	72
Gambar 4. 20 Distribusi Tekanan Suling Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	73
Gambar 4. 21 <i>Scaled Residuals</i> Suling nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	73
Gambar 4. 22 <i>Velocity</i> Suling Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	74
Gambar 4. 23 Distribusi Tekanan Suling Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	75

Gambar 4. 24 <i>Scaled Residuals</i> Suling nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	75
Gambar 4. 25 <i>Velocity</i> Suling Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	76
Gambar 4. 26 Distribusi Tekanan Suling Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	77
Gambar 4. 27 <i>Scaled Residuals</i> Suling nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	77
Gambar 4. 28 <i>Velocity</i> Rekorder Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	78
Gambar 4. 29 Distribusi Tekanan Rekorder Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	79
Gambar 4. 30 <i>Scaled Residuals</i> Rekorder nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	79
Gambar 4. 31 <i>Velocity</i> Rekorder Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	80
Gambar 4. 32 Distribusi Tekanan Rekorder Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	81
Gambar 4. 33 <i>Scaled Residuals</i> Rekorder nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	81
Gambar 4. 34 <i>Velocity</i> Rekorder Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	82
Gambar 4. 35 Distribusi Tekanan Rekorder Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s.....	83
Gambar 4. 36 <i>Scaled Residuals</i> Rekorder nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s	83
Gambar 4. 37 Perbedaan Pola udara pada <i>Ouput 1</i> : a. Suling. b. Rekorder.....	85

DAFTAR NOTASI

CFD	=	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FFT	=	<i>Fast Fourier Transform</i>
DFT	=	<i>Discrete Fourier transform</i>
Kg	=	Kilogram
Pa	=	Pascal
d	=	Diameter
mm	=	Millimeter
s	=	<i>Second</i>
CAD	=	<i>Computer Aided Design</i>
v	=	<i>Velocity</i>
%	=	<i>Percent</i>
3D	=	<i>Three-Dimensional</i>
2D	=	<i>Two-Dimensional</i>
ABS	=	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Alat musik tiup adalah salah satu alat musik yang digunakan dalam berbagai acara, seperti upacara adat, festival, dan acara keagamaan. Alat musik tiup memerlukan udara yang tepat dan efektif untuk menghasilkan suara yang bagus. Alat musik tiup adalah kelompok alat musik yang memerlukan udara untuk menghasilkan suara. Alat musik tiup ini termasuk klarinet, saksofon, trompet, seruling dan lain-lain. Alat musik tiup ini memerlukan kontrol yang tepat terhadap aliran udara untuk menghasilkan suara yang berkualitas. Kontrol aliran udara ini dapat dilakukan melalui cara memainkan alat musik, seperti meniup, mengembuskan, dan menghembuskan udara melalui mulut alat musik.

Salah satu alat musik tiup yang sering digunakan yaitu seruling dan recorder, seruling adalah alat musik tradisional yang dibuat dari bambu dan digunakan dalam berbagai pertunjukan musik, khususnya pertunjukan musik tradisional. Seruling bambu termasuk ke dalam salah satu jenis alat musik tiup yang berarti suara yang ditimbulkan dari alat musik tersebut berasal dari hembusan angin. Alat musik seruling ini dimainkan dengan cara meniup lubang di bagian pangkal alat musik tersebut, dan teknik meniup yang baik sangat penting agar suara yang dihasilkan menjadi merdu dan tidak sumbang. Seruling bambu juga termasuk ke dalam salah satu jenis suling, dan dapat dimainkan dengan cara meniup lubang di bagian pangkal alat musik tersebut, serta membuka dan menutup lubang-lubang yang berfungsi sebagai penghasil nada.

Mekanisme suara yang dihasilkan dalam alat musik tiup melibatkan serangkaian proses. Salah satu komponen utama dari mekanisme ini adalah interaksi antara udara yang masuk ke dalam alat musik dan struktur fisik alat musik itu sendiri. Ketika udara melalui mulut dan rongga mulutnya, tekanan udara yang dihasilkan menggerakkan kolom udara di dalam alat musik. Proses ini menyebabkan getaran pada medium di dalam alat musik, baik itu udara dalam tabung alat musik atau material seperti logam atau kayu. Getaran ini kemudian

menghasilkan gelombang suara yang terjadi melalui interaksi antara medium dan struktur alat musik, menghasilkan suara yang khas untuk tiap jenis alat musik tiup. Faktor-faktor seperti bentuk rongga mulut, panjang dan diameter tabung alat musik, serta teknik pemain dalam membentuk embouchure, semuanya memengaruhi karakteristik suara yang dihasilkan. Dalam kajian mekanisme produksi suara fisik alat musik tiup, pemahaman mendalam tentang fisika akustik, dinamika fluida, dan biomekanika mulut manusia menjadi penting untuk menjelaskan fenomena kompleks ini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui secara menyeluruh produksi suara pada alat musik tiup melalui pendekatan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Maka dari penelitian ini akan mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang interaksi kompleks antara aliran udara di dalam alat musik dan struktur fisiknya yang mempengaruhi karakteristik suara yang dihasilkan. Dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, pola aliran udara dalam alat musik akan dipelajari untuk mengeksplorasi bagaimana variabel seperti tekanan udara, bentuk geometris, dan karakteristik aliran memengaruhi pembentukan suara. Serta menggunakan metode *Fast Fourier Transform (FFT)* untuk membedah karakteristik spektral dari suara tersebut, termasuk distribusi frekuensi dan amplitudo. Melalui integrasi kedua pendekatan ini, diharapkan penelitian ini dapat mengungkap aspek-aspek kunci yang mempengaruhi kualitas suara pada alat musik tiup dan memberikan landasan yang kokoh untuk pengembangan desain yang lebih baik dan optimal dalam konteks musik dan akustik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian yaitu untuk mengetahui pola aliran udara di dalam alat musik tiup dan pengaruhnya terhadap pembentukan suara, pengaruh faktor seperti tekanan udara dan geometri alat musik terhadap kualitas suara, serta karakteristik spektral dari suara yang dihasilkan. Serta untuk memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang kompleksitas mekanisme produksi suara alat musik tiup dan potensi pengembangan desain yang lebih optimal dalam konteks musik dan akustik.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Desain alat musik tiup menggunakan perangkat lunak *SOLIDWORKS 2023*.
2. Simulasi *computational fluid dynamics (CFD)* menggunakan perangkat lunak *Ansys Student R1 2024*.
3. Alat musik tiup yang di gunakan yaitu suling bambu yang berasal dari Padang dan rekorder.
4. Alat ukur kecepatan udara menggunakan anemometer.
5. Pembacaan grafik *Fast Fourier Transform (FFT)*.
6. Variasi nilai kecepatan udara digunakan 0.59 m/s , 1 m/s , 1.50 m/s dan 2 m/s .
7. Pada penelitian ini nada yang digunakan yaitu nada do, mi dan sol.
8. Tipe yang digunakan pada inlet dan outlet adalah velocity-inlet dan pressure-outlet.
9. Tidak membahas kekuatan material dari alat musik.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan dari penelitian atau perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui pola aliran udara di dalam alat musik tiup dan pengaruhnya terhadap pembentukan suara.
2. Untuk mengetahui parameter-parameter yang memengaruhi produksi suara dari alat musik tiup dan hasil suara yang dihasilkan

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi pembelajaran dalam menganalisa pola aliran udara di dalam alat musik tiup dan faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan suara dengan menggunakan metode CFD yang dapat diterapkan ke berbagai alat musik lainnya.

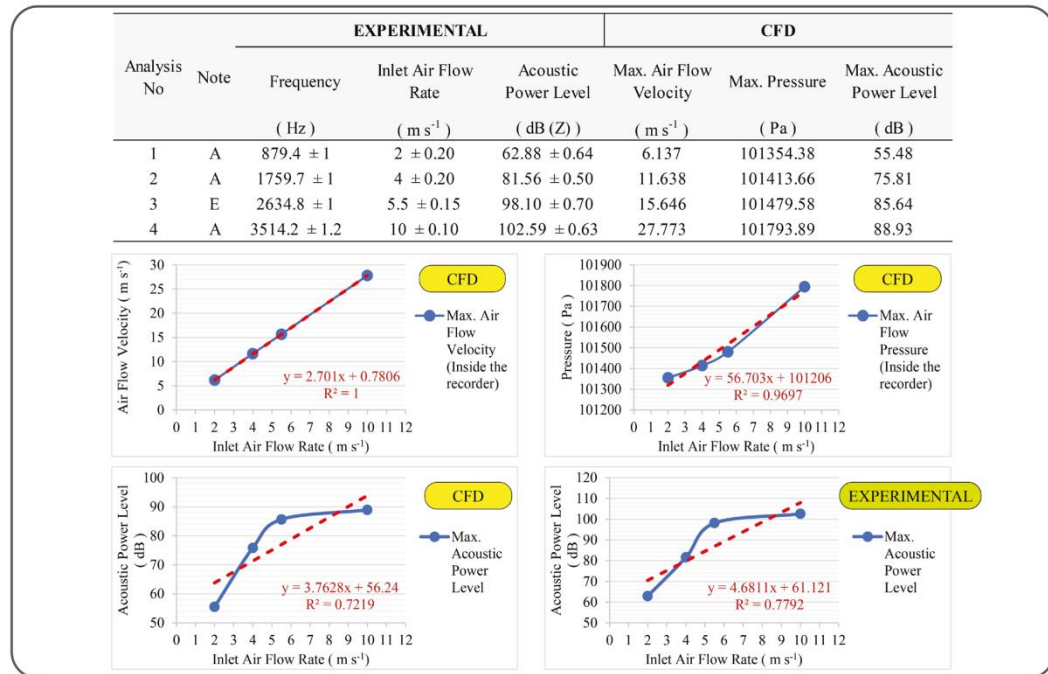
2. Penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan desain alat musik tiup yang lebih inovatif dan efisien.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. BAB 1 PENDAHULUAN: Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian atau perancangan, manfaat penelitian atau perancangan, dan sistematika penulisan.
2. BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA: Bab ini berisi kajian pustaka dan menjelaskan dasar teori yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan.
3. BAB 3 METODE PENELITIAN: Bab ini menjelaskan langkah-langkah apa saja dan metode apa yang digunakan dalam penelitian.
4. BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN: Bab ini berisi hasil dan juga pembahasan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.
5. BAB 5 PENUTUP: Bab ini merupakan bab akhir dari laporan yang berisi kesimpulan serta saran dari hasil pembahasan dan untuk penelitian selanjutnya.

Pada Gambar 2-1 desain *Turkish Treble Recorder* memiliki delapan lubang nada dengan ukuran yang berbeda. Pengukuran dilakukan selama 10 detik setiap laju aliran udara yang berbeda. Dalam penelitiannya temperatur udara diasumsikan sebesar 20°C dan tekanan sebesar 1 atm atau 101.325 Pa. Selanjutnya pada tahap simulasi CFD terdapat empat laju aliran udara yang berbeda dengan lubang nada yang sama.



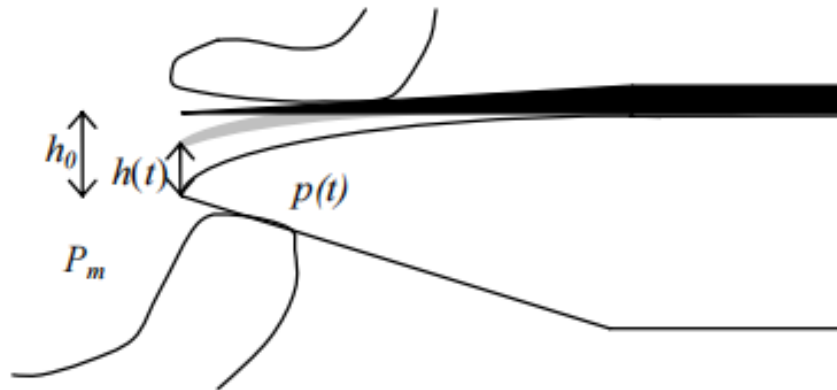
Gambar 2. 2 Data Hasil Pengukuran

(Sumber : Celik, dkk. 2021)

Setelah dilakukan simulasi didapatkan hasil bahwa nilai *sound power level* paling tinggi sebesar 88.93 Db pada laju aliran 10 m/s dengan nilai *maximum flow velocity* sebesar 27.773 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi suara yang dihasilkan berbeda seiring pergerakan laju aliran didalam alat musik, karena aliran fluida mempunyai hubungan dengan bentuk desain dari alat musik tiup. Ukuran desain dari alat tiup mulai dari ukuran lubang hingga panjang alat musik berperan penting dalam menghasilkan suara, selain itu material dari alat musik juga berpengaruh dalam menghasilkan suara tapi pada penelitiannya tidak dibahas lebih mengenai material alat musik tersebut.

Selain dari itu Dalmon, dkk (2012). Melakukan penelitian mengenai pengaruh laju aliran terhadap intonasi yang dihasilkan oleh klarinet. Penelitian ini

membahas tentang intonasi klarinet, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk karakteristik getaran dan laju aliran udara. Penelitian dilakukan dengan menggunakan teknik pengukuran presisi tinggi untuk menangkap dan menganalisis dinamika aliran reeds selama bermain klarinet.



Gambar 2. 3 Tampilan skema corong klarinet

(Sumber : Dalmon, dkk 2012)

Setelah melakukan penelitian didapatkan kesimpulan bahwa desain *reed* dan *mouthpiece* memainkan peran penting dalam mengendalikan aliran udara. Reed dan mouthpiece yang dirancang dengan baik dapat membantu menjaga stabilitas aliran udara dan intonasi klarinet. Salah satu contohnya adalah *reed* dan *mouthpiece* yang dirancang untuk menghasilkan suara "jazzy". *Reed* dan *mouthpiece* ini memiliki lekukan yang lebih besar pada bagian bawah reed tip, yang dapat meningkatkan sensitivitas tekanan bibir terhadap kontrol nada.

Sayangnya penelitian yang membahas mengenai laju aliran pada alat musik ini jumlahnya hanya sedikit sehingga belum ada standarisasi desain alat musik tiup. Oleh karena itu, penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi pembelajaran dalam menganalisa pola aliran udara di dalam alat musik tiup dan faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan suara.

2.2 Dasar Teori

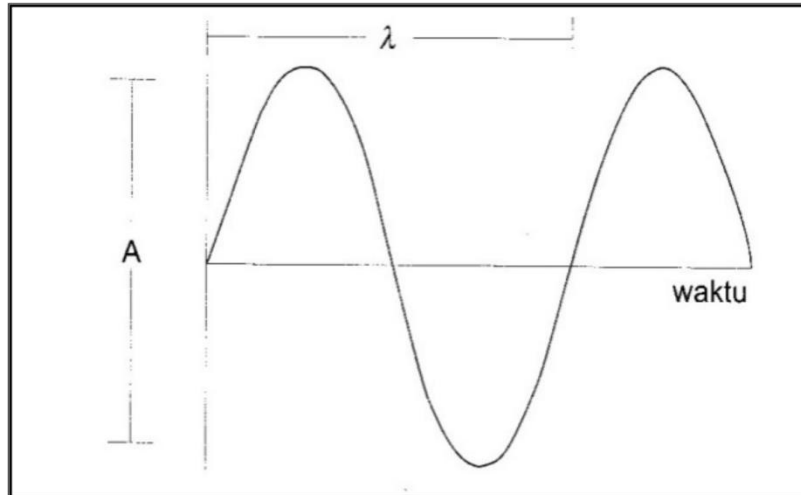
Analisis dan simulasi memerlukan beberapa teori untuk melandasi berbagai rangkaian proses yang dilakukan. Berikut merupakan dasar teori yang melandasi penelitian ini.

2.2.1 Akustik

Menurut Shadily (1987:8) Istilah akustik berasal dari kata bahasa Inggris yaitu *acoustics*, yang merujuk pada ilmu yang mempelajari suara atau. Akustik adalah cabang ilmu fisika yang mempelajari suara, termasuk cara suara dihasilkan, bagaimana dia merambat, dampaknya, serta bagaimana suatu ruang atau medium merespons suara dan karakteristik suara yang dirasakan oleh telinga. Ilmu akustik penting untuk menciptakan lingkungan suara yang nyaman. Penting untuk tidak salah memahami akustik sebagai ilmu merancang alat musik, karena kesalahan ini dapat menyebabkan penerapan yang tidak tepat. Setiap pembuktian dan kegiatan dalam akustik dapat dijelaskan secara empiris (Halme 1990).

Tata Akustik adalah proses pengaturan suara dalam suatu ruang untuk menciptakan kualitas suara yang nyaman bagi penggunanya. Hal ini menjadi unsur penting dalam kesuksesan desain ruang yang baik karena memiliki dampak yang luas, mampu menciptakan efek fisik dan emosional yang memengaruhi pengalaman orang di dalam ruangan tersebut, sehingga memungkinkan mereka merasakan kesan-kesan tertentu (Siska 2015).

Istilah bunyi memiliki dua definisi, yakni dari segi fisik adalah perubahan tekanan atau perpindahan partikel dalam medium elastis seperti udara, dan dari segi fisiologis adalah sensasi pendengaran yang timbul akibat dari perubahan fisik yang dijelaskan sebelumnya (Doelle, 1993). Ketika gelombang suara bertemu dengan batas antara dua medium, seperti udara dan dinding, energi dalam gelombang suara dapat mengalami tiga proses: diteruskan ke medium berikutnya, diserap oleh batas tersebut, atau dipantulkan kembali ke medium asal. Ketiga fenomena ini terjadi pada tingkat yang bervariasi tergantung pada sifat dan kondisi dari batas yang dilewati oleh gelombang suara tersebut (Lord, 1980).



Gambar 2. 4 Bunyi Merupakan Penjalaran Dari Gelombang Sinusoidal.

(Sumber : Siska, 2015)

Dalam ilmu fisika, bunyi timbul dari getaran suatu benda yang disebut sebagai sumber bunyi. Ketika sumber bunyi bergetar, ia memicu getaran molekul udara di sekitarnya. Oleh karena itu, syarat utama untuk terjadinya bunyi adalah keberadaan benda yang bergetar. Untuk bunyi bisa merambat, diperlukan adanya medium. Kita dapat mendengar bunyi jika ada medium yang mampu merambatkan gelombang suara. Terdapat beberapa syarat yang harus dipenuhi agar bunyi dapat didengar, baik terkait dengan terjadinya maupun pendengarannya (Siska, 2015).

2.2.2 Alat Musik Tiup

Alat musik tiup merupakan jenis instrumen musik yang menghasilkan suara dengan cara menggetarkan udara. Instrumen ini umumnya dilengkapi dengan berbagai jenis resonator, yang sering berbentuk tabung, di mana getaran diatur oleh pemain yang meniup udara ke dalam corong yang terletak di atau dekat ujung resonator. Bunyi yang dihasilkan oleh alat musik tiup berasal dari getaran suara, yang dapat disesuaikan dengan berbagai cara, seperti dengan mengubah panjang kolom udara yang bergetar melalui penyesuaian panjang efektif tabung, atau menggunakan katup untuk mengubah panjang total tabung secara keseluruhan. Dalam seni musik terdapat beberapa jenis alat musik tiup seperti :

1. Suling bambu

Suling bambu adalah salah satu instrumen musik tradisional yang terbuat dari bambu. Instrumen ini memiliki sejarah panjang dan telah digunakan dalam budaya musik tradisional di berbagai belahan dunia, terutama di Asia Tenggara. Suling bambu memiliki corong di salah satu ujungnya dan lubang-lubang yang dibor di sepanjang batang bambu untuk mengatur nada. Cara memainkannya adalah dengan meniup udara melalui lubang-lubang tersebut sambil menutup atau membuka lubang tertentu dengan jari-jari, yang menghasilkan berbagai nada yang berbeda. Suling bambu sering digunakan dalam upacara keagamaan, pertunjukan seni, dan musik rakyat, serta memiliki peran penting dalam menyampaikan cerita dan tradisi budaya melalui musik. Keunikan suara alami suling bambu sering kali memberikan sentuhan emosional dan spiritual yang khas dalam pengalaman musik mendengarkan dan memainkannya

2. Rekorder

Rekorder adalah alat musik tiup yang mirip dengan suling bambu, namun sering kali terbuat dari bahan sintesis. Seperti suling bambu, rekorder modern memiliki desain yang serupa dengan tabung panjang dan lubang-lubang jari yang dapat ditutup dan dibuka untuk menghasilkan berbagai nada. Namun, rekorder memiliki beberapa jenis yang memiliki karakter suara yang berbeda-beda. Antara lain rekorder bass, rekorder alto, rekorder tenor, rekorder soprano, dan rekorder treble. Setiap jenis rekorder memiliki rentang nada yang berbeda, sehingga memberikan variasi suara yang unik dan beragam. Ini menjadikan rekorder sebagai pilihan yang populer di kalangan pemain musik dari berbagai tingkat kemampuan, baik untuk pemula maupun musisi yang lebih berpengalaman.

2.2.3 *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Computational fluid dynamics (CFD) adalah analisis sistem yang mencakup aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait dengan menggunakan simulasi berbasis komputer (numerik). Metode ini melibatkan perhitungan yang dilakukan dengan bantuan komputer untuk mengontrol

dimensi, luas, dan volume dari setiap elemen dalam sistem. Proses CFD dimulai dengan membagi ruang yang berisi fluida menjadi beberapa bagian kecil yang disebut sel, melalui proses yang dikenal sebagai meshing. Setiap bagian atau sel ini kemudian digunakan sebagai kontrol untuk melakukan perhitungan rinci mengenai sifat-sifat fluida dalam sistem. Prinsip utama CFD adalah dengan membagi ruang fluida ke dalam sel-sel kecil, memungkinkan analisis yang lebih detail dan akurat dari aliran fluida dan fenomena perpindahan panas di seluruh sistem (Jalaluddin, 2019). Simulasi CFD dapat memberikan pemahaman mendalam tentang perilaku aliran fluida dan membantu dalam perancangan untuk mencapai desain yang optimal. Proses CFD melibatkan beberapa langkah dalam alur pengerjaannya, yaitu *pre-processing*, *processing/solver*, dan *post-processing* (Norton, 2007)

2.2.3.1 Model Matematis

Pada tahap ini perlu dilakukan penetapan batasan yang akan disimulasikan serta pemilihan model yang tepat. Penetapan batasan dan model matematika mencakup persamaan karakteristik fluida, persamaan kontinuitas, persamaan momentum, model turbulensi, serta jenis aliran fluida yang digunakan.

2.2.3.1.1 Definisi dan Karakteristik Fluida

Zat dalam alam dapat dikelompokkan ke dalam tiga bentuk utama, yaitu padat, cair, dan gas. Baik zat cair maupun gas memiliki kesamaan, yaitu keduanya tidak memiliki bentuk yang tetap, melainkan mengikuti bentuk wadah di mana mereka berada. Kemampuan ini disebabkan oleh gaya tarik yang lemah antara atom atau molekul penyusunnya jika dibandingkan dengan zat padat. Zat cair dan gas juga mudah untuk ditembus atau dibagi-bagi. Salah satu karakteristik yang sering diamati adalah kemampuan zat cair dan gas untuk mengalir. Oleh karena itu, zat-zat yang memiliki sifat mengalir seperti ini sering disebut sebagai fluida (Mikrajuddin, 2016).

1. *Density*

Density atau rapat jenis (ρ) dari suatu materi adalah parameter yang menunjukkan konsentrasi materi tersebut dan dinyatakan sebagai massa per

volume tertentu. Karakteristik ini ditentukan dengan menghitung rasio massa materi yang terkandung dalam suatu wilayah tertentu terhadap volume wilayah tersebut (Jalaluddin et al., 2019).

2. Kekentalan (*Viscosity*)

Viscosity adalah ukuran dari seberapa besar ketahanan sebuah fluida terhadap deformasi atau perubahan bentuknya. Viskositas dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti temperatur, tekanan, kohesi, dan laju perpindahan momentum molekulernya. Pada umumnya, viskositas zat cair cenderung menurun seiring dengan peningkatan temperatur karena gaya kohesi pada zat cair akan menurun ketika dipanaskan, menyebabkan viskositas zat cair tersebut menurun. Viskositas sendiri dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu viskositas kinematik dan viskositas dinamik, yang juga dikenal sebagai viskositas mutlak (Jalaluddin et al., 2019).

3. Jenis Aliran Fluida

Laminar adalah jenis aliran fluida yang memiliki pola aliran teratur dan terjadi pada kecepatan yang rendah. *Turbulen* adalah jenis aliran fluida yang memiliki pola aliran tidak teratur dan acak, biasanya terjadi pada kecepatan tinggi. Untuk mengetahui apakah suatu aliran termasuk ke dalam *laminar* atau *turbulen* dapat dicari dengan menggunakan perhitungan *Reynolds number*. *Reynolds number* didefinisikan sebagai berikut (Ghahfarokhi dkk., 2019). Untuk mencari perhitungan bilangan *Reynolds* bisa dilihat dari persamaan berikut (Ghahfarokhi dkk., 2019). :

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.1)$$

Dalam persamaan tersebut, *Re* menunjukkan bilangan *Reynolds*, ρ menunjukkan densitas fluida dalam kg/m³, *v* menunjukkan kecepatan fluida dalam m/s, *d* menunjukkan diameter pipa aliran dalam m, dan μ adalah viskositas fluida dalam kg/m.s. *Reynolds number* yang kurang dari 2.300 adalah aliran *laminar*, sedangkan lebih dari 10.000 adalah aliran *turbulen*. *Reynolds number* yang berada di antara 2.300-10.000 disebut sebagai aliran *transient* (Ghahfarokhi dkk., 2019).

4. *Steady dan Unsteady*

Sebuah aliran disebut sebagai aliran *steady* apabila medan kecepatan tidak bervariasi seiring waktu. Kecepatan pada suatu titik dalam ruang tetap konstan dari waktu ke waktu. Di sisi lain, aliran *unsteady* adalah aliran yang bergantung pada waktu dan dimana komponen medan kecepatannya dapat berubah-ubah seiring waktu (Supriyono, 2019).

5. *Compressible dan Incompressible*

Sifat fluida dapat dikategorikan menjadi dua jenis yaitu *compressible* dan *incompressible*. Kategori ini didasarkan pada bagaimana densitas fluida bereaksi terhadap perubahan tekanan. Fluida *compressible* mengalami perubahan densitas yang signifikan saat tekanan berubah, sehingga densitasnya tidak dapat dianggap konstan. Sebaliknya, fluida *incompressible* mempertahankan densitas konstan, tidak peduli seberapa besar perubahan tekanannya. Untuk menentukan apakah suatu aliran fluida termasuk *compressible* atau *incompressible*, digunakan persamaan *Mach Number*. Persamaan ini membandingkan kecepatan aliran fluida dengan kecepatan suara di dalam fluida. cara menghitung *Mach Number* dengan persamaan seperti berikut (White, 2006)

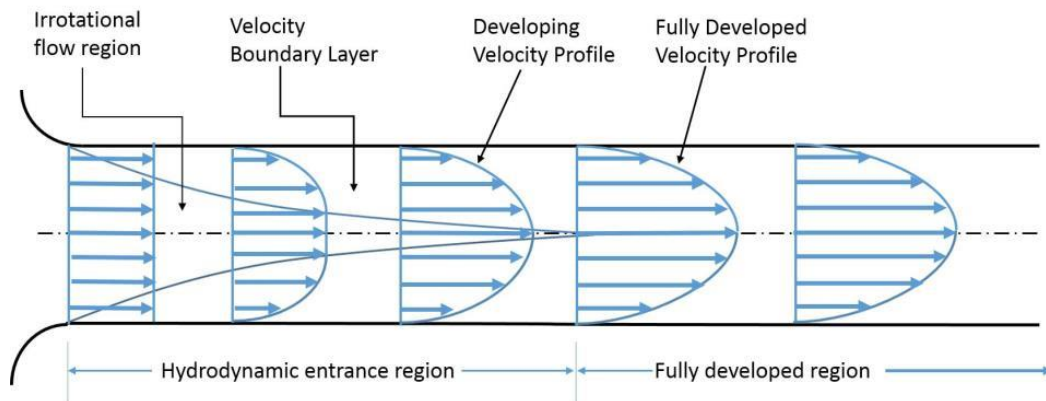
$$Ma = \frac{v}{c} \quad (2.2)$$

Dimana *Ma* adalah *Mach number*, *v* adalah kecepatan fluida dalam m/s, dan *c* adalah kecepatan suara dalam media aliran dalam m/s, dimana kecepatan suara pada temperatur 20 °C menurut *National Physical Laboratory* (2018) sebesar 343 m/s. Jika nilai *Mach Number* lebih kecil dari 0,30 maka aliran fluida dapat dianggap *incompressible*. Di sisi lain, jika nilai *Mach Number* lebih besar dari 0,30 maka aliran fluida dikategorikan sebagai *compressible* (Anderson, 2007).

6. *Velocity Profile*

Profil kecepatan adalah representasi distribusi kecepatan fluida pada suatu penampang melintang dalam aliran fluida. Profil ini menunjukkan variasi kecepatan fluida dari bagian tengah aliran hingga mendekati dinding (Salama, 2021). Profil kecepatan yang memiliki distribusi stabil disebut aliran *fully-developed*. Aliran *fully-developed* biasanya berbentuk parabolik, di mana kecepatan tertinggi berada di tengah atau puncak parabola, sedangkan kecepatan terendah berada di dekat dinding. Aliran *fully-developed* terbentuk setelah melewati daerah *fully-developed*. Perhitungan diperlukan untuk menentukan

panjang daerah entrance hidrodinamik dengan karakteristik aliran tertentu agar dapat mencapai aliran *fully-developed* (Cengel & Cimbala, 2006).



Gambar 2. 5 Proses Aliran *fully-developed*

Sumber: (Cengel & Cimbala, 2006)

2.2.3.1.2 Persamaan Kontinuitas

Jika suatu zat cair mengalir secara kontinu melalui saluran atau pipa dan zat cair tersebut tidak mampat dengan tampang aliran tetap atau tidak tetap, maka volume zat cair yang melewati setiap satuan waktu akan sama di semua penampang. Keadaan ini dikenal sebagai persamaan kontinuitas aliran zat cair (Ikhsan et al., 2018). Persamaan kontinuitas untuk aliran *steady* dan *incompressible* adalah sebagai berikut (Ismanto et al., 2021):

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = 0 \tag{2.3}$$

(2.3)

Dimana :

$\frac{\partial u}{\partial x}$ = Perubahan Kecepatan Vektor u Pada Sumbu X

$\frac{\partial v}{\partial y}$ =Perubahan Kecepatan Vektor v Pada Sumbu Y

2.2.3.1.3 Persamaan Navier-Stokes

Persamaan Navier-Stokes adalah bentuk diferensial dari hukum kedua Newton mengenai gerak. Persamaan ini menggambarkan pergerakan fluida, baik gas maupun cairan. Persamaan ini adalah bentuk terlengkap untuk menggambarkan gerak elemen fluida kental dalam medan gravitasi. Persamaan

Navier-Stokes menyatakan bahwa perubahan momentum atau percepatan dari partikel fluida dipengaruhi oleh gaya viskositas internal dan tekanan eksternal yang bekerja pada fluida (Handayani et al., 2016). Pada dasarnya simulasi CFD metode numerik yang digunakan untuk memperkirakan solusi dari masalah dinamika fluida dan perpindahan panas. Persamaan aliran fluida telah diketahui selama lebih dari satu abad. Meskipun persamaannya rumit, penyelesaiannya sangat bermanfaat untuk memahami aliran fluida dalam kaitannya dengan dinamika dan perpindahan panas. Sayangnya, persamaan tersebut tidak bisa diselesaikan dengan cara yang sederhana, sehingga pendekatan numerik digunakan sebagai prosedur komputasi untuk mendapatkan perkiraan solusinya (Soemaryanto & Rosid, 2017). Karena pada simulasi sifat aliran yaitu *incompressible*, maka persamaan yang digunakan sebagai berikut (ANSY, 2013)

$$\nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla\bar{\tau} + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (2.4)$$

Dimana :

ρ = densitas dalam Kg/m³

v = kecepatan dalam m/s

P = Tekanan dalam Pa

g = Gravitasi dalam m/s^2

F = gaya dalam N

Dari persamaan sebelumnya dapat diturunkan fungsi kecepatan, tekanan, percepatan gravitasi, dan gaya terhadap posisi. Pada simulasi ini turunannya sebagai berikut.

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g}_x + \vec{F}_x \quad (2.5)$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g}_y + \vec{F}_y \quad (2.6)$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g}_z + \vec{F}_z \quad (2.7)$$

2.2.3.2 Diskritisasi

Komputer hanya dapat memproses angka, sehingga model matematis perlu diubah menjadi bentuk angka-angka perhitungan. Proses perubahan ini disebut diskritisasi. Menurut Hirsch (2007) diskritisasi dibagi menjadi dua yaitu :

1. Diskritisasi Ruang/Spasial

Dalam proses ini, bentuk dan batasan ruang geometri yang akan digunakan untuk simulasi ditentukan terlebih dahulu. Selanjutnya, titik-titik didistribusikan di seluruh permukaan dalam domain geometri tersebut. Himpunan titik-titik ini akan menggantikan kontinuitas pada ruang nyata dengan sejumlah titik yang dikenal sebagai *grid* atau *mesh*.

2. Diskritisasi Model Persamaan Matematika

Diskritisasi ini mengubah persamaan diferensial parsial menjadi beberapa operasi aritmatika. Hasil dari transformasi ini adalah kumpulan relasi persamaan antara nilai-nilai pada titik atau mesh yang saling berhubungan. Proses ini juga dikenal dengan sebutan *finite volume method*.

2.2.3.3 Skema dan Solusi Numerik

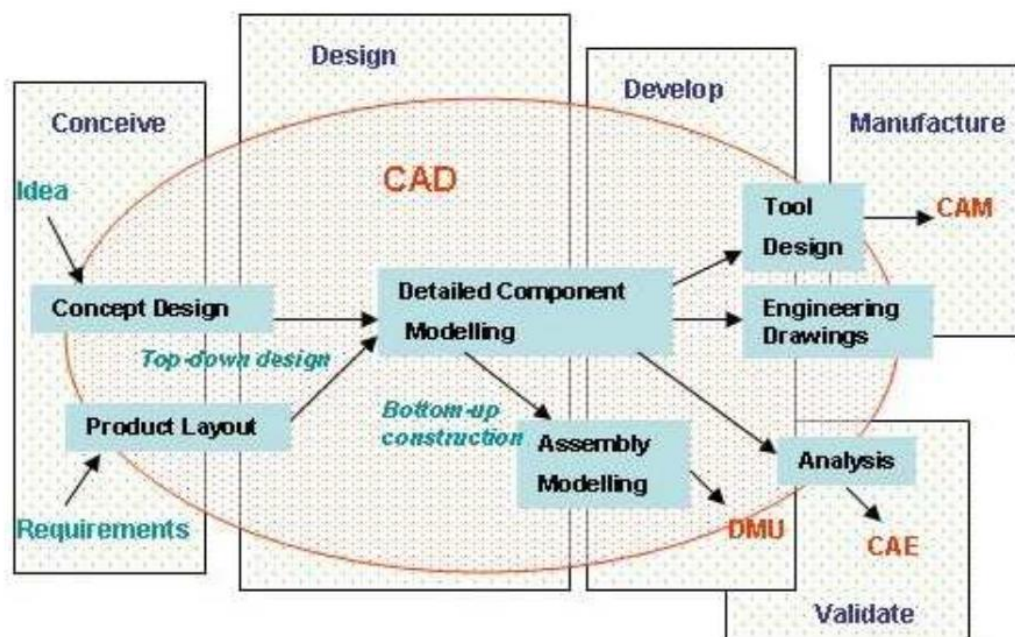
Skema numerik digunakan dalam analisis untuk memenuhi kondisi dan aturan yang menghasilkan akurasi dan stabilitas yang diinginkan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan solusi numerik untuk menyelesaikan persamaan-persamaan yang telah ditentukan. Salah satu metode yang digunakan untuk perhitungan solusi ini adalah *Coupled*.

2.2.3.4 Post-Processor

Post-processor digunakan untuk menyortir, mencetak, dan memplot hasil yang telah dipilih, serta untuk membuat grafik dan animasi. Umumnya, post-processor memungkinkan pembuatan grafik untuk menunjukkan variasi berbagai parameter seiring waktu dan ruang (Wange dan Metkar, 2013).

2.2.4 Computer Aided Design (CAD)

Computer Aided Design Merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk membantu desainer dalam proses perancangan produk dengan menggunakan komputer. Sebelum adanya CAD, desainer harus menggambar secara manual menggunakan tangan untuk mengkomunikasikan desain mereka dalam bentuk gambar 2D sebelum memasuki tahap manufaktur. Namun, dengan adopsi CAD, banyak desain dan pengembangan produk yang sekarang dibuat dalam bentuk model 3D, memungkinkan desainer untuk lebih mudah memvisualisasikan dan mengkomunikasikan ide-ide mereka kepada tim dan pihak terkait lainnya (Ramnath dkk., 2020).



Gambar 2. 6 Computer Aided Design

(Sumber : Ningsih, 2005)

2.2.5 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) adalah sebuah teknik yang digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Secara umum, sinyal direpresentasikan dalam domain waktu, yang mencerminkan perubahan nilai sinyal seiring waktu. Domain waktu memberikan informasi tentang periode sinyal atau gelombang, yaitu waktu yang diperlukan bagi sinyal untuk bergerak dari satu titik ke titik lainnya. Sementara itu, domain frekuensi menunjukkan

jumlah gelombang yang terjadi dalam satu detik. Dalam beberapa kasus, diperlukan analisis sinyal berdasarkan domain frekuensinya, seperti dalam analisis gelombang suara, untuk mengetahui komponen frekuensi yang membentuk suara tersebut. Salah satu teknik yang digunakan untuk melakukan transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi adalah FFT. FFT ditemukan pada tahun 1965 sebagai pengembangan dari Fourier Transform (FT) yang ditemukan oleh J. Fourier pada tahun 1822 (Rintiasti et al., 2021). Cara kerja FT adalah membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. FFT merupakan sebuah algoritma yang dapat menghitung FT dengan cepat dan efisien. Rumus transformasi fourier sendiri sebagai berikut :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.6)$$

Dimana :

$S(f)$ = Sinyal dalam domain frekuensi

$s(t)$ = Sinyal dalam domain waktu

$e^{-j2\pi ft}$ = Konstanta dari nilai sebuah sinyal

f = Frekuensi

t = waktu.

Untuk memudahkan proses perhitungan dari FFT maka perlu dilakukan diskritisasi atau yang dikenal dengan *Discrete Fourier Transform* (DFT). Dengan menggunakan DFT, sinyal suara yang dibaca menggunakan sebuah sensor akan direkam dan disimpan dalam bentuk digital pada sebuah array, kemudian data pada array tersebut diubah ke dalam bentuk domain frekuensi. Pada sistem pendeteksi crack ini dibuat array dengan Panjang 512 data dengan periode sampling sebesar 1 ms (Rintiasti et al., 2021). Proses penyelesaian DFT dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2.7)$$

Dimana :

A_k = Amplitude untuk komponen frekuensi indeks ke-k

a_n = Nilai sinyal pada indeks ke-n

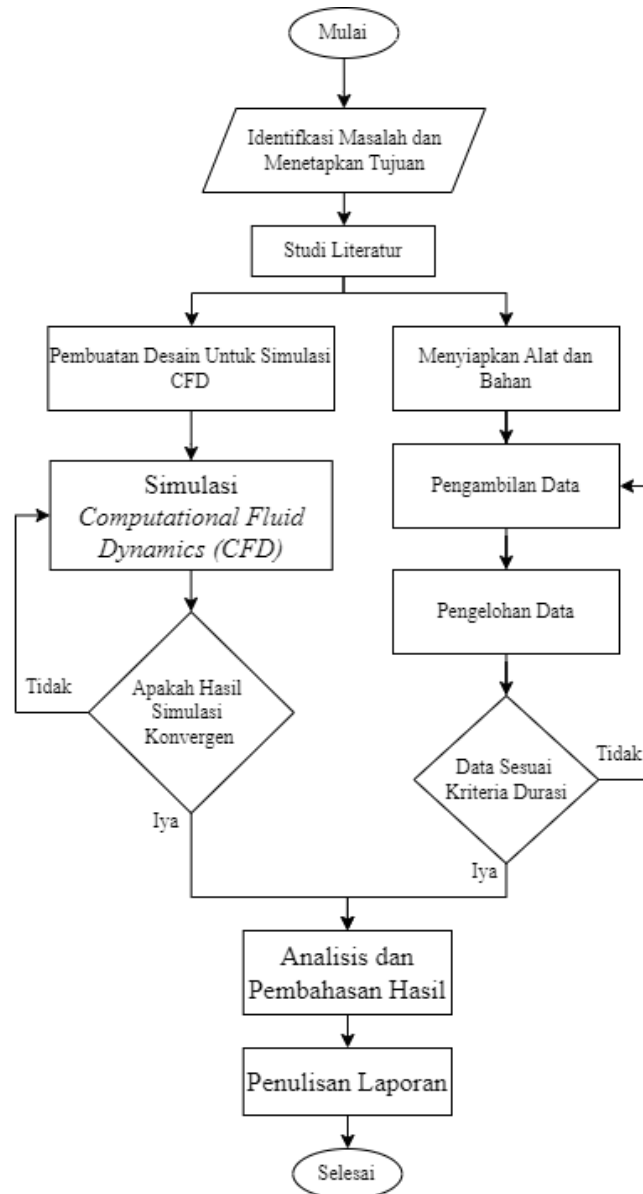
k = Indeks frekuensi

N = Jumlah sampel data.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur penelitian yang digunakan pada penelitian ini :



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Seperti pada gambar 3. 1 di atas penelitian di mulai dengan mengidentifikasi masalah dan menetapkan tujuan, kemudian dilanjutkan dengan

studi literatur untuk mencari referensi yang relevan. Setelah itu, dilakukan pembuatan desain untuk simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan persiapan alat serta bahan untuk pengambilan data. Simulasi CFD dijalankan, dan jika hasil simulasi belum konvergen, dilakukan pengulangan hingga hasilnya sesuai. Di sisi lain, data diambil dan diolah. Jika data tidak sesuai dengan kriteria yaitu durasi data yang berbeda, pengambilan data diulang, sedangkan jika sesuai, penelitian berlanjut ke tahap analisis dan pembahasan hasil. Setelah itu, hasil penelitian ditulis dalam bentuk laporan.

3.2 Peralatan dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk menunjang pengerjaan penelitian ini, berikut merupakan Tabel 3. 1 dan Tabel 3. 2 yang berisikan alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 3. 1 Alat

No	Alat	Fungsi
1	Laptop	Perangkat keras untuk proses desain, proses simulasi, dan pengolahan data
2	<i>Solidworks 2023</i>	Perangkat lunak dalam pembuatan 3D Model
3	<i>Ansys 21 2021</i>	Perangkat lunak yang digunakan dalam proses simulasi dengan metode CFD
4	<i>Handphone</i>	Perangkat elektronik untuk proses pengambilan data suara
5	<i>Microphone</i>	Perangkat keras untuk menangkap suara dengan jelas dan jernih
6	<i>MATLAB R2024a</i>	Perangkat lunak yang digunakan dalam proses FFT
7	Kompresor	Sebagai sumber udara
8	3D Printer	Sebagai alat untuk pembuatan tempat alat musik
9	<i>Anemometer</i>	Sensor untuk membaca laju aliran udara

Tabel 3. 2 Bahan

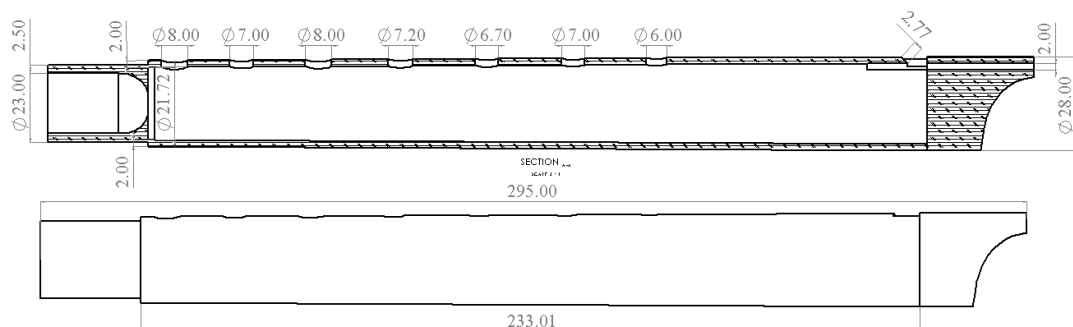
No	Bahan	Fungsi
1	Suling Bambu	Sebagai bahan utama penelitian
2	Rekorder	Sebagai bahan utama penelitian
3	<i>Polylactic Acid (PLA)</i>	Sebagai bahan untuk pembuatan tempat alat musik

3.3 Proses Perancangan

Pada tahapan proses perancangan dari alat musik tiup ini menggunakan perangkat lunak *Solidworks 2023*. Pada penelitian ini menggunakan 2 jenis alat musik tiup yaitu suling bambu dan rekorder. Proses ini memiliki 2 model desain yang dibantu dengan alat ukur jangka sorong untuk mengukur dimensi alat musik tiup. Desain alat musik tiup sebagai berikut :

3.3.1 Model Suling Bambu

Suling bambu adalah alat musik tiup tradisional yang terbuat dari bambu. Alat musik ini populer di berbagai wilayah di Indonesia dan merupakan bagian penting dari berbagai budaya musik tradisional. Suling bambu yang digunakan pada penelitian ini merupakan suling bambu yang berasal dari pulau sumatra, berikut model dari suling bambu :



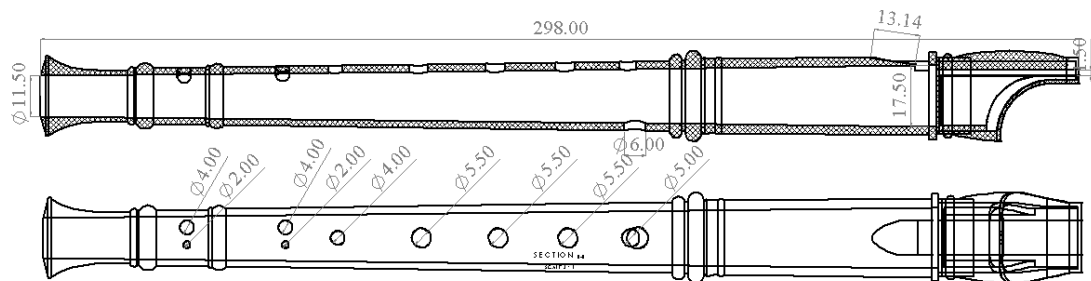
Gambar 3. 2 Drawing Suling Bambu



Gambar 3. 3 3D Suling Bambu

3.3.2 Model Rekorder

Recorder adalah versi modern dari suling bambu tradisional, menawarkan kemudahan belajar, suara yang jernih, dan cocok untuk memainkan berbagai genre musik. Berikut model rekorder yang akan digunakan pada penelitian :



Gambar 3. 4 Drawing Rekorder



Gambar 3. 5 3D Rekorder

3.4 Proses Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Proses simulasi aliran udara dengan metode *computational fluid dynamics* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Ansys Student R1 2024*. Tahapan yang dilakukan pada proses ini diantaranya:

1. Pendefinisian Model
2. *Pre-processing*
3. *Processing*
4. *Post-processing*

3.4.1 Pendefinisian Model

Pendefinisian model merupakan tahap penentuan yang dilakukan sebelum memulai proses simulasi untuk mempermudah pelaksanaannya. Hal-hal yang ditentukan mencakup pendefinisian *properties* material, pendefinisian karakteristik fluida, *governing equation*, dan *boundary condition*.

3.4.1.1 *Properties Material*

Properties alat musik tiup pada umumnya terbuat dari material yaitu bambu dan *acrylonitrile butadiene styrene*. Masing-masing material memiliki sifat yang berbeda yang memengaruhi karakteristik suara alat musik. Bambu memiliki sifat yang ringan, fleksibel, dan memiliki akustik yang baik, sehingga menghasilkan suara yang hangat dan alami. *acrylonitrile butadiene styrene*, di sisi lain, lebih tahan lama, mudah dibentuk, dan memiliki harga yang lebih murah, menghasilkan suara yang lebih cerah dan tajam. Fluida yang digunakan dalam alat musik tiup adalah udara dengan temperatur 20°C. Nilai dari *properties* bambu yang diambil dari Permana (2017), *acrylonitrile butadiene styrene* yang diambil dari Matmatch (t.t) dan udara dari Welty dkk. (2007) bisa di lihat pada tabel 3.3 berikut :

Tabel 3. 3 *Properties Material*

<i>Properties</i>	<i>Density (ρ)(kg/m³)</i>
Bambu	717.96
<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>	1070

Udara	1.204
-------	-------

3.4.1.2 karakteristik Fluida

Seperti yang sudah dijelaskan pada subbab (2.2.3.1) mengenai karakteristik fluida, berikut beberapa hal yang harus dilihat untuk karakteristik fluida.

1. Kecepatan Aliran

Pada Penelitian ini menggunakan udara dari kompresor dengan tiga variasi kecepatan yang berbeda yaitu 10 m/s , 15 m/s , 20 m/s dan 25 m/s . Variasi kecepatan udara ini bertujuan untuk mengamati bagaimana kecepatan udara memengaruhi karakteristik suara alat musik tiup.

2. Sifat Aliran

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan *Mach Number* (persamaan 2.4), penelitian ini menunjukkan bahwa sifat aliran udara pada seluruh variasi kecepatan adalah incompressible, dengan nilai *Mach Number* selalu kurang dari 0.30. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 3. 4 yang menunjukkan sifat aliran pada setiap variasi kecepatan.

Tabel 3. 4 Sifat Aliran

No	Kecepatan (m/s)	<i>Mach Number</i>	Sifat Aliran
1	0.50	0.0015	<i>INCOMPRESSIBLE</i>
2	1.00	0.0029	<i>INCOMPRESSIBLE</i>
3	1.50	0.0044	<i>INCOMPRESSIBLE</i>
4	2.00	0.0058	<i>INCOMPRESSIBLE</i>

3. Jenis Aliran

Dari perhitungan menggunakan persamaan *Reynolds number* menggunakan persamaan (2.5) terdapat variasi jenis aliran yang terjadi. Tabel jenis aliran diseluruh variasi kecepatan ditunjukkan pada Tabel 3. 5 sebagai berikut :

Tabel 3. 5 Jenis Aliran

No	Kecepatan	<i>Re</i> (Suling)	Sifat	<i>Re</i>	Sifat
----	-----------	--------------------	-------	-----------	-------

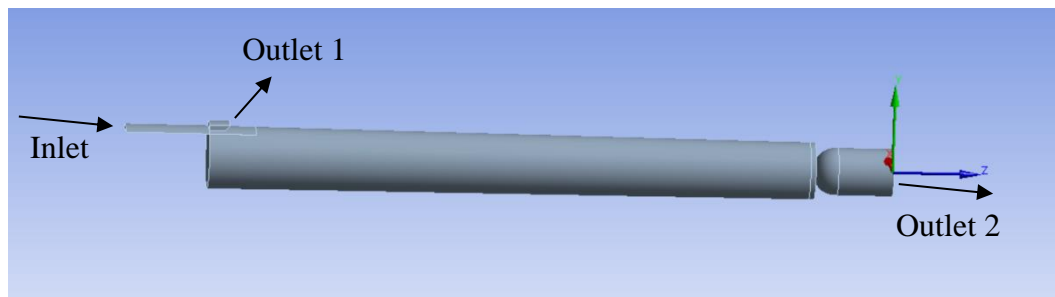
	(m/s)		Aliran	(Rekorder)	Aliran
1	0.50	583264.73	<i>Turbulen</i>	579506.07	<i>Turbulen</i>
2	1.00	1166529.46	<i>Turbulen</i>	1159012.13	<i>Turbulen</i>
3	1.50	1749794.19	<i>Turbulen</i>	1738518.20	<i>Turbulen</i>
4	2.00	2333058.93	<i>Turbulen</i>	2318024.26	<i>Turbulen</i>

3.4.2 Pre-processing

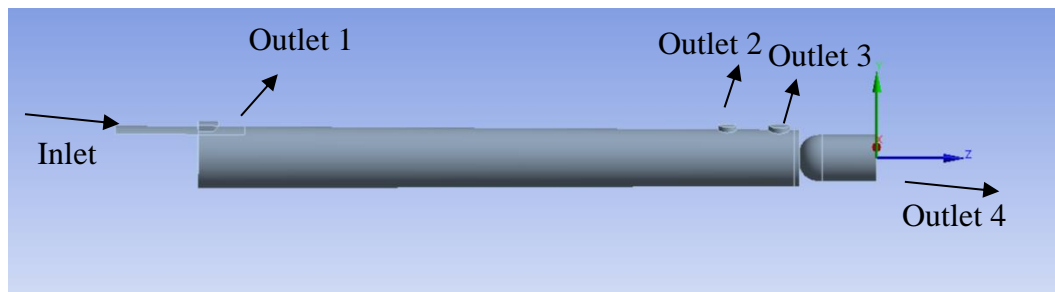
Tahap awal dari simulasi ini setelah pendefinisian model adalah *pre-processing*. Pada tahap ini akan menentukan geometri dan mesh sesuai dengan pendefinisian model sebelumnya.

1. Geometri dan Skema Geometri

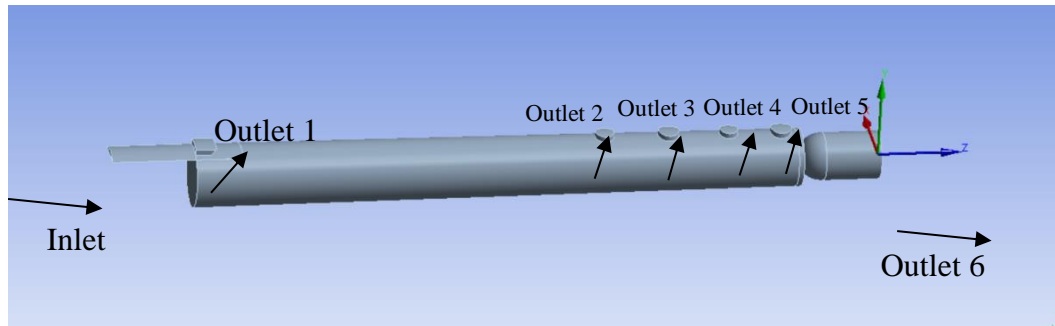
Desain yang sebelumnya telah dibuat menggunakan perangkat lunak *Solidworks 2023* dan di-*import* ke perangkat lunak *Ansys Student R1 2024* kemudian melakukan *edit geometry* menggunakan *Design Modeller*. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan penentuan domain fluida pada kedua model alat musik.



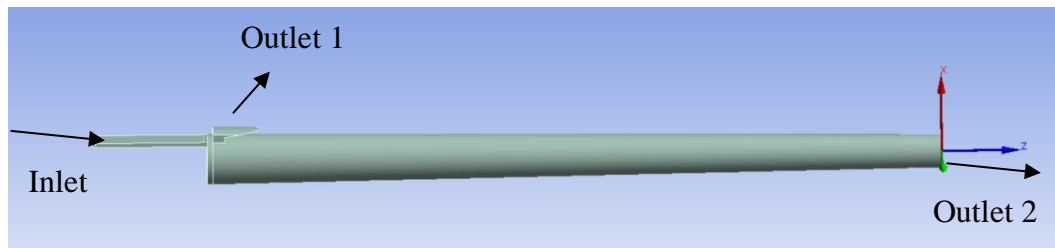
Gambar 3. 6 *Import Geometry* Suling Tangga Nada Do



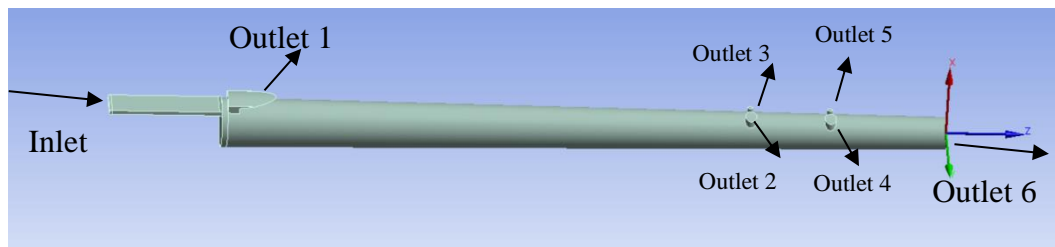
Gambar 3. 7 *Import Geometry* Suling Tangga Nada Mi



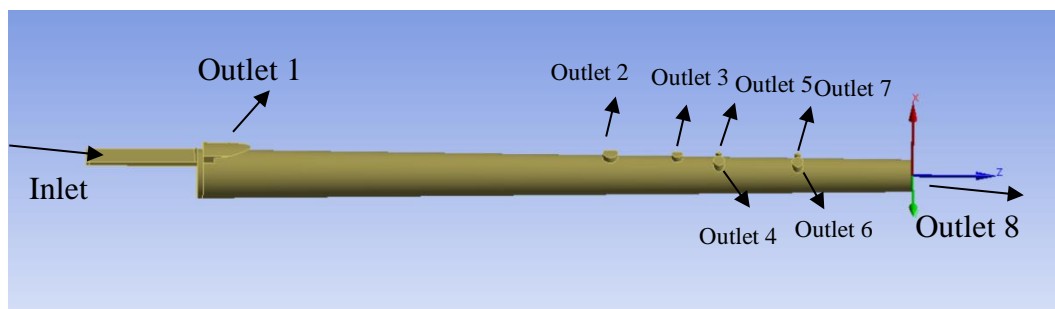
Gambar 3. 8 *Import Geometry* Suling Tangga Nada Sol



Gambar 3. 9 *Import Geometry* Rekorder Tangga Nada Do



Gambar 3. 10 *Import Geometry* Rekorder Tangga Nada Mi

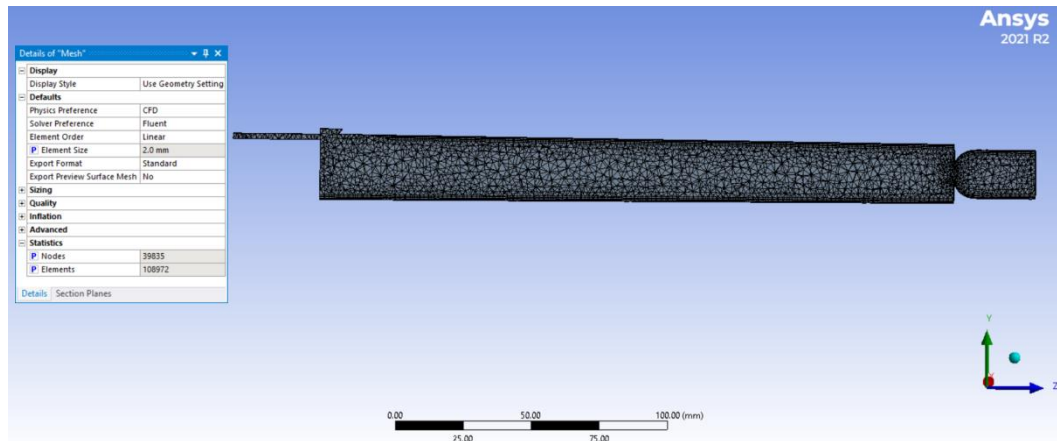


Gambar 3. 11 *Import Geometry* Rekorder Tangga Nada Sol

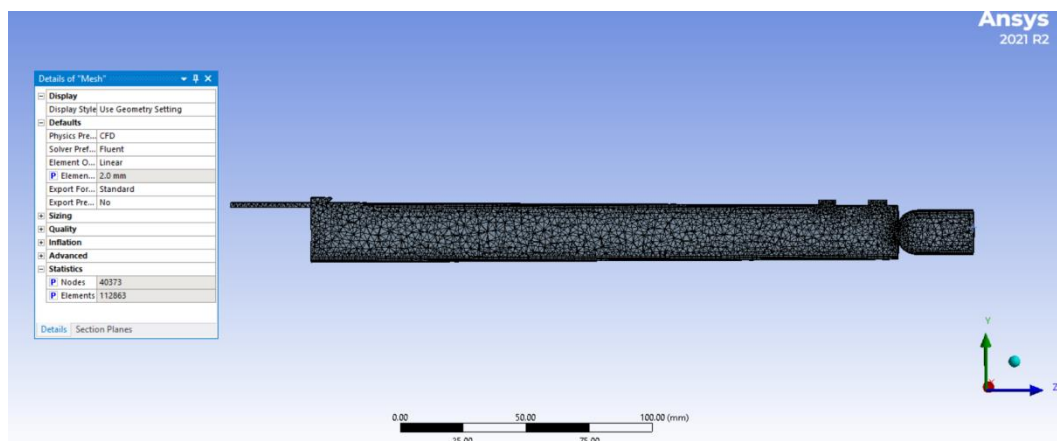
2. Mesh

Selanjutnya pada tahap ini berfungsi untuk pembagi control volume geometri menjadi elemen yang lebih kecil dan halus dengan tujuan mendapatkan hasil yang lebih konvergen pada analisa. Pada tahap ini juga penentuan *inlet*, *outlet* dan dinding pembuluh darah

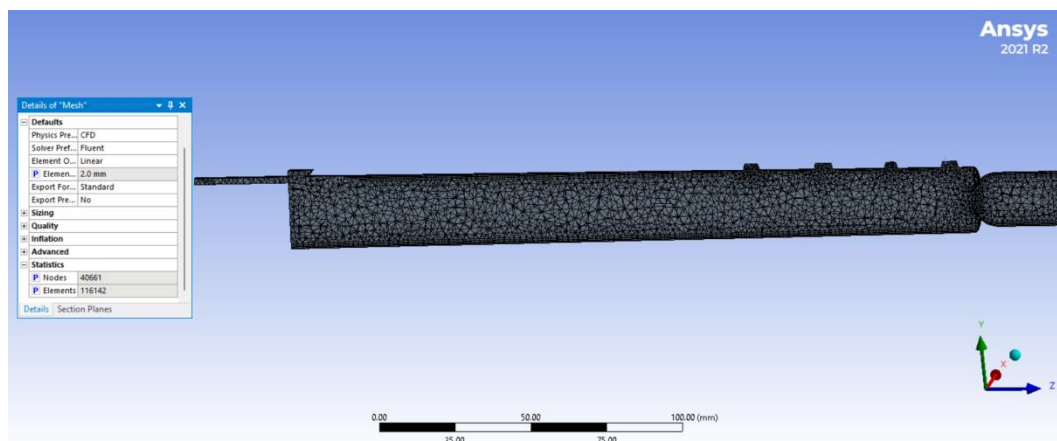
Mesh yang digunakan pada simulasi CFD berbentuk *tetrahedral*, dengan jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* yang berbeda pada masing-masing alat musik tiup dan setiap tangga nada. Untuk hasil meshing dapat dilihat pada Gambar 3. 12 sampai Gambar 3. 17.



Gambar 3. 12 Desain Suling Tangga Nada Do Setelah *Meshing*

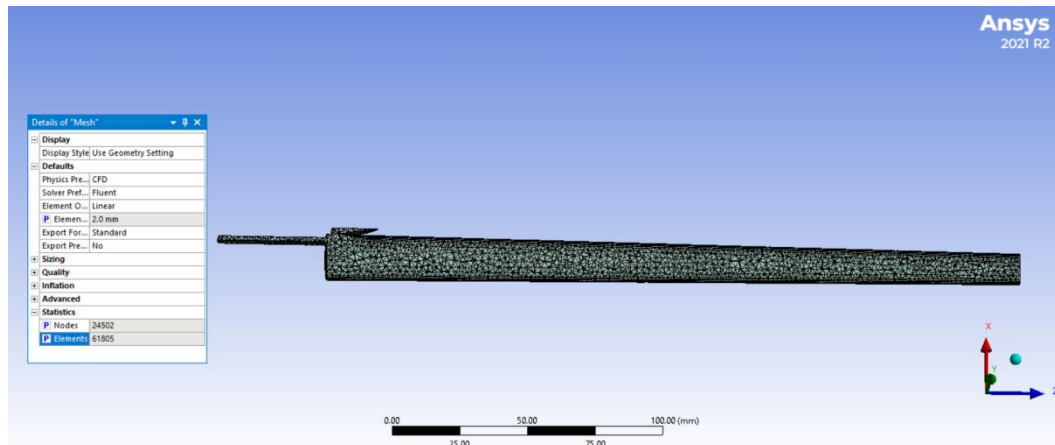


Gambar 3. 13 Desain Suling Tangga Nada Mi Setelah *Meshing*

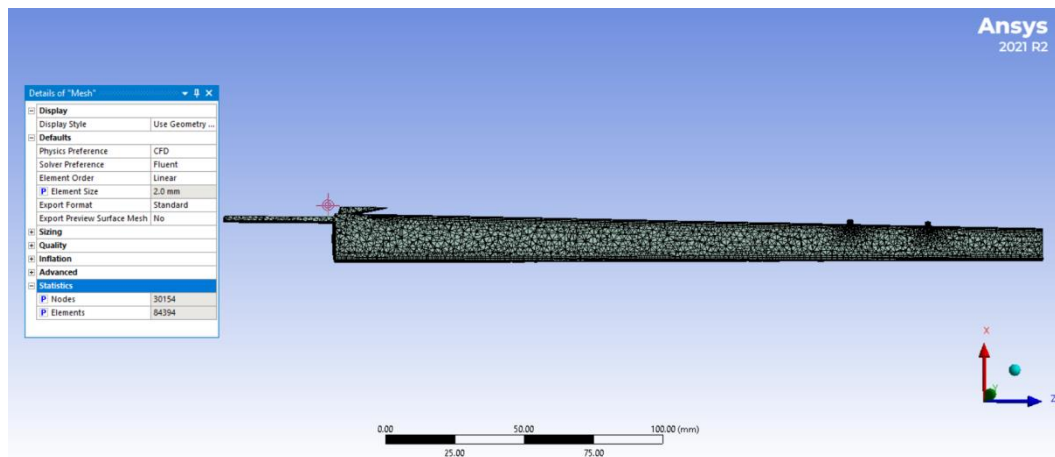


Gambar 3. 14 Desain Suling Tangga Nada Sol Setelah *Meshing*

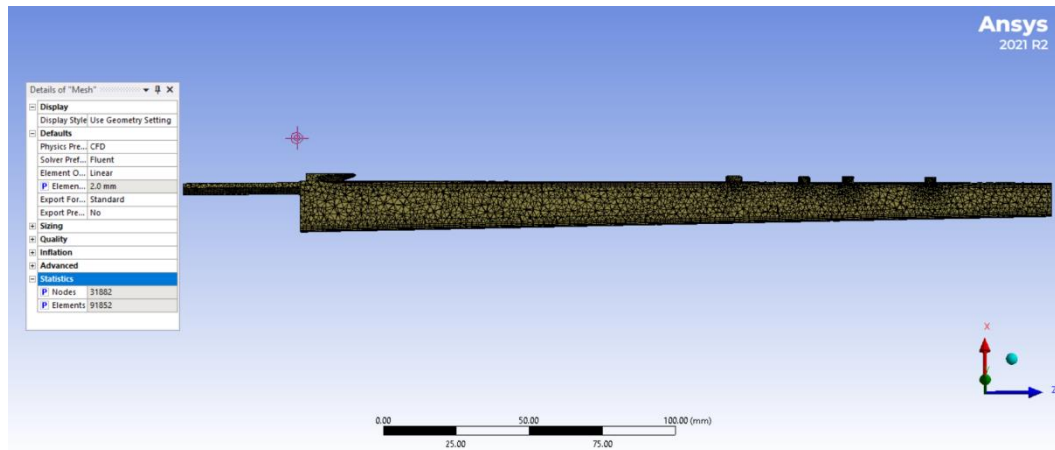
Pada Gambar 3. 12 sampai Gambar 3. 14 merupakan alat musik suling jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* pada masing-masing tangga nada. Pada tangga Do jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 39835 dan 108972, pada tangga Mi jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 40373 dan 112863, pada tangga Do jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 39835 dan 108972 dan pada tangga Sol jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 40661 dan 116142.



Gambar 3. 15 Desain Rekorder Tangga Nada Do Setelah *Meshing*



Gambar 3. 16 Desain Rekorder Tangga Nada Mi Setelah *Meshing*



Gambar 3. 17 Desain Rekorder Tangga Nada Sol Setelah *Meshing*

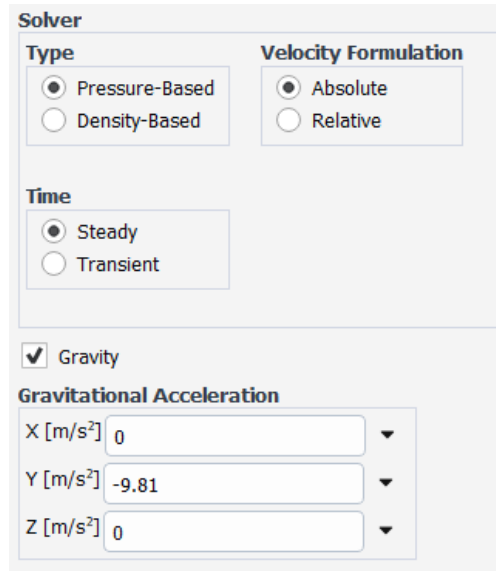
Pada Gambar 3. 15 sampai Gambar 3. 17 merupakan alat musik rekorder jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* pada masing-masing tangga nada. Pada tangga Do jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 24502 dan 61805, pada tangga Mi jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 30154 dan 84394 dan pada tangga Sol jumlah *mesh nodes* dan *mesh elements* berjumlah 31882 dan 91852.

3.4.3 Processing

Tahap ini merupakan tahapan memasukkan *setup* dan penentuan *solution* sebelum akhirnya simulasi dijalankan.

1. Solver

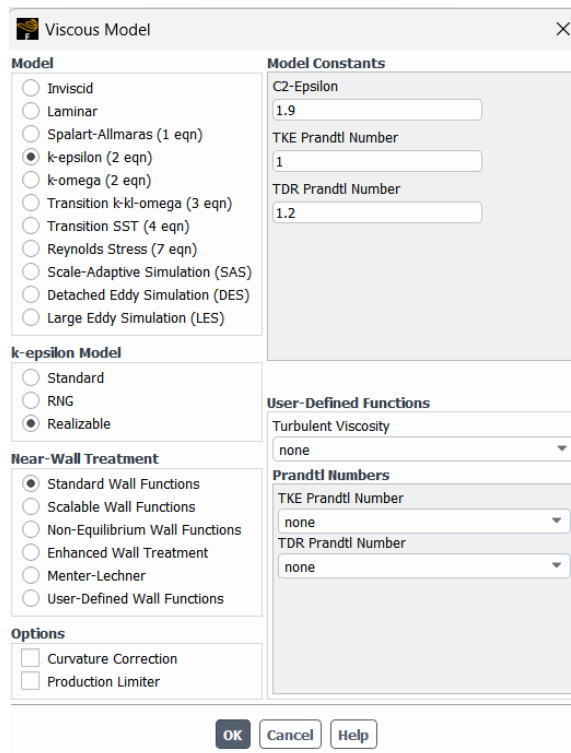
Tipe *solver* yang digunakan yaitu *pressured-based* karena sifat aliran sebelumnya aliran *incompressible*. Kemudian *velocity formulation* yang digunakan yaitu *absolute* karena memiliki jenis aliran laminar dan transisi. Waktu yang digunakan adalah *Steady*. Input solver pada *ansys* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 18 sebagai berikut :



Gambar 3. 18 *Input Solver*

2. Models

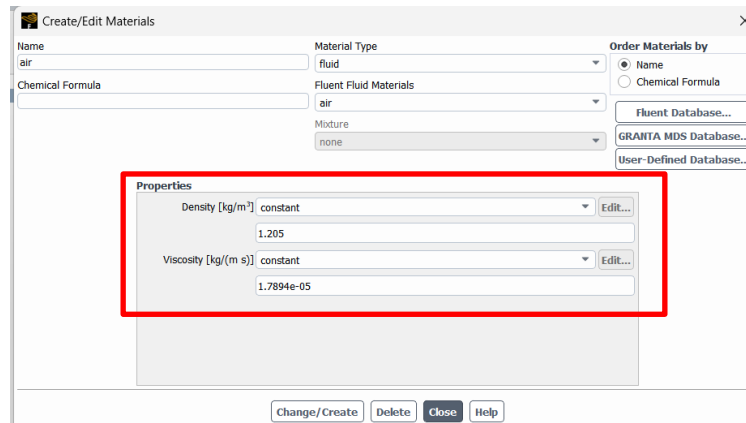
model yang digunakan adalah *k-epsilon* karena jenis alirannya adalah *turbulen* dan alirannya adalah *free shear layer* atau terdapat aliran fluida yang memiliki kecepatan yang berbeda, maka *model* yang digunakan adalah *k-epsilon*. Kemudian digunakan *realizable* karena *realizable* dapat mengatasi kesalahan dalam pemodelan. Seperti pada Gambar 3. 19 berikut.



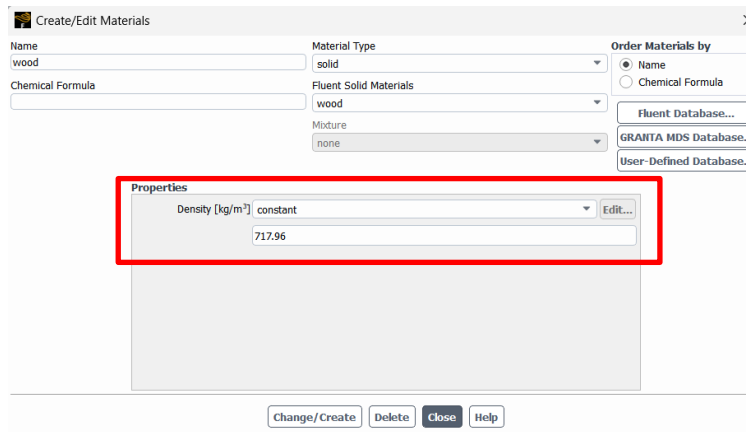
Gambar 3. 19 *Input Models*

3. Material

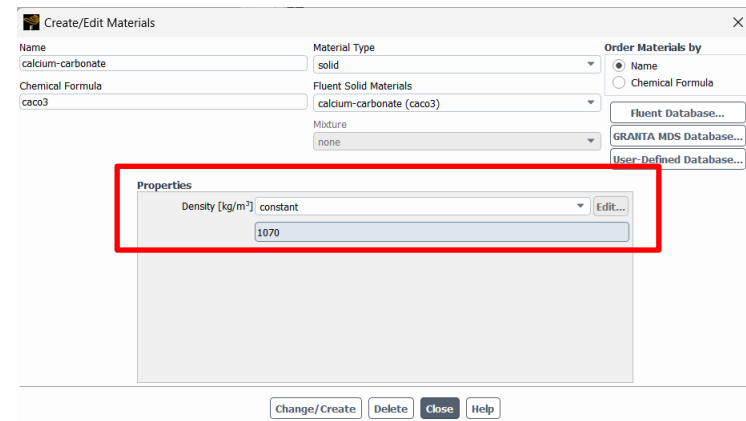
Input dari material dan udara disesuaikan dengan yang sudah ditentukan pada Tabel 3. 1. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar sebagai berikut.



Gambar 3. 20 *Input Material Udara*



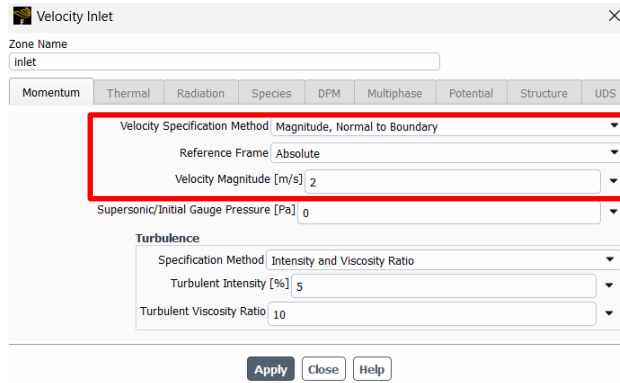
Gambar 3. 21 *Input Material Bambu*



Gambar 3. 22 *Input Material Acrylonitrile Butadiene Styrene*

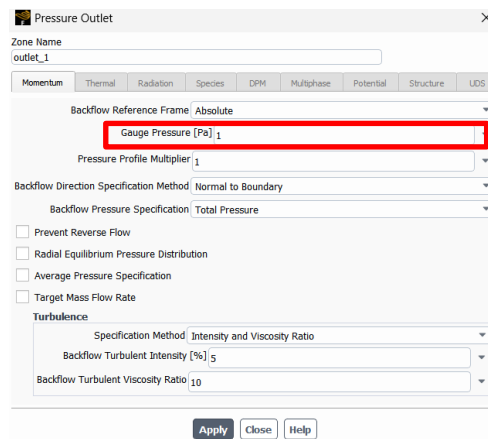
4. Boundary Condition

Pada *boundary condition* untuk inlet yaitu 0.50 m/s , 1 m/s , 1.50 m/s dan 2 m/s yang ditunjukkan pada Gambar 3. 23 sebagai berikut.



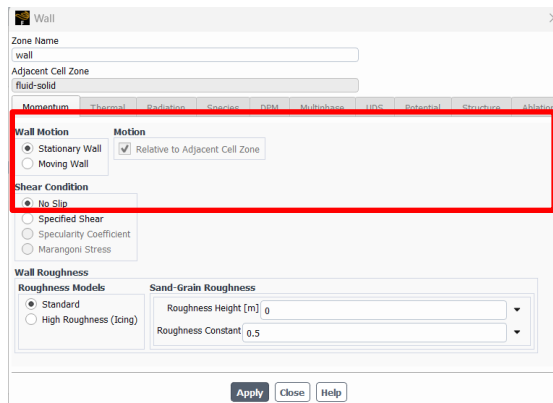
Gambar 3. 23 Input Velocity Inlet

Setelah itu masukkan juga nilai kecepatan dengan variasi lainnya yaitu 0.50 m/s , 1 m/s , 1.50 m/s . Selanjutnya *boundary condition* untuk outlet yang ditunjukkan pada Gambar 3. 24 sebagai berikut.



Gambar 3. 24 Input Pressure Outlet

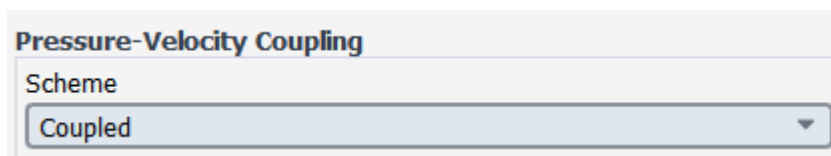
Pada *boundary condition* diasumsikan dinding bersifat *rigid* dan *no-slip*. yang ditunjukkan pada Gambar 3. 25 sebagai berikut.



Gambar 3. 25 *Input Wall*

5. *Solution*

Solution yang digunakan disesuaikan dengan simulasi yang sedang dijalankan. *Solution methods* yang digunakan adalah *Coupled* dimana metode ini dapat menyelesaikan persamaan momentum dan kontinuitas, yang membuatnya lebih efisien seperti aliran turbulen atau geometri kompleks. Selain itu, metode ini lebih stabil untuk menangani mesh yang rumit dan aliran dengan perubahan signifikan dalam kecepatan atau tekanan. *Solution method* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 26 sebagai berikut.



Gambar 3. 26 *Input Solution Methods*

3.4.4 *Post-processing*

Setelah menuntaskan proses *processing*, didapatkan hasil simulasi dari kedua alat musik tiup. Hasil simulasi fenomena aliran pada kedua alat musik berupa distribusi kecepatan distribusi tekanan yang akan ditampilkan pada Bab 4 Hasil dan Pembahasan.

Pada tahap selanjutnya dalam *post-processing*, dilakukan evaluasi terhadap optimalisasi simulasi yang telah dijalankan. Evaluasi ini memanfaatkan teknik *mesh dependency* untuk mengkaji apakah simulasi telah mencapai keseimbangan antara waktu simulasi dan keakuratan hasil. Melakukan *mesh dependency* bermanfaat untuk memahami pengaruh ukuran mesh terhadap hasil simulasi. Dengan memperkecil dan memperbesar elemen mesh, kita dapat mengamati perubahan akurasi simulasi. Jumlah elemen yang lebih banyak umumnya menghasilkan simulasi yang lebih akurat. Namun, hal ini tidak selalu menjamin optimalisasi proses simulasi. Optimalisasi simulasi tidak hanya ditentukan oleh akurasi hasil, tetapi juga waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikannya. Jumlah elemen yang sedikit menghasilkan waktu running yang lebih singkat. Oleh karena itu, penting untuk menemukan keseimbangan antara jumlah elemen dan waktu simulasi. Suatu simulasi dikatakan mencapai

titik optimum atau stabil ketika selisih perbedaan nilai antara jumlah elemen saat ini dengan jumlah elemen sebelumnya kurang dari 5%. Dengan melakukan *mesh dependency*, kita dapat menemukan jumlah elemen yang ideal untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan dan akurasi simulasi, sehingga menghasilkan simulasi yang efisien dan efektif. (Nawawi, 2015). Berikut perhitungan *relative eror* pada *mesh dependency*.

$$\text{Perbedaan}(\%) = \frac{\text{Data}_n - \text{Data}_1}{\text{Data}_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Dimana :

Data_n = Data yang dicari

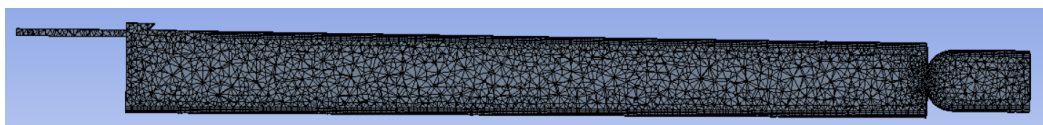
Data_1 = Data Acuan

Variabel yang digunakan pada proses *mesh dependency* yaitu *Average Velocity Outlet* dan *Average Pressure Wall* serta data acuan pada tabel yang berwarna merah. Hasil selisih data akan diperlihatkan pada bab 4. Berikut data berdasarkan elemen alat musik suling untuk tangga nada Do dapat dilihat pada tabel berikut.

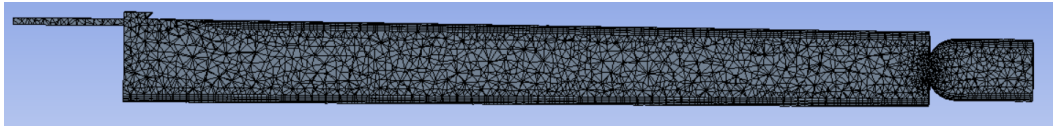
Tabel 3. 6 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Suling Tangga Nada Do

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Elements</i>	<i>Avg. Pressure Wall (Pa)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 1 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 2 (m/s)</i>	<i>Calculation Time (s)</i>
2	39835	53600	0.051	0.170	0.013	57
2.5	25505	68349	1.048	0.197	0.012	55
3	18251	48066	1.045	0.184	0.013	62
3.5	14238	37067	1.043	0.186	0.012	127

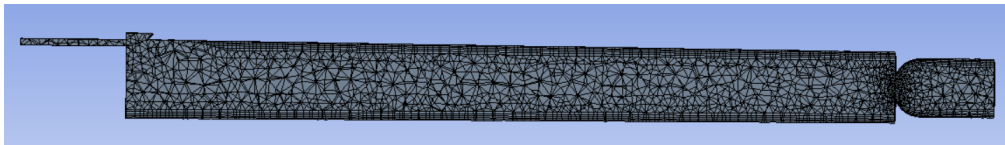
Dari Tabel 3. 6 merupakan data berdasarkan elemen dari alat musik suling untuk tangga nada Do, berikut merupakan detail *meshing* dari setiap *Element Size* pada tangga nada Do.



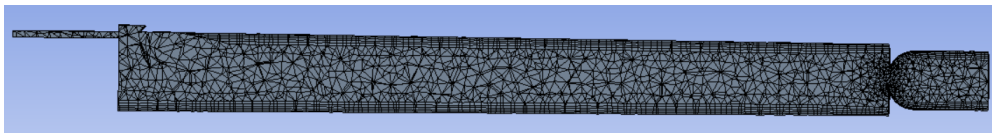
Gambar 3. 27 Detail *Meshing Element Size* 2 mm Suling Tangga Nada Do



Gambar 3. 28 Detail *Meshing Element Size 2.5 mm* Suling Tangga Nada Do



Gambar 3. 29 Detail *Meshing Element Size 3 mm* Suling Tangga Nada Do



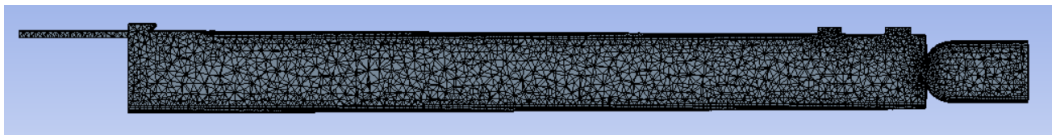
Gambar 3. 30 Detail *Meshing Element Size 3.5 mm* Suling Tangga Nada Do

Selanjutnya merupakan tabel data berdasarkan elemen alat musik suling untuk tangga nada Mi dapat dilihat pada tabel berikut.

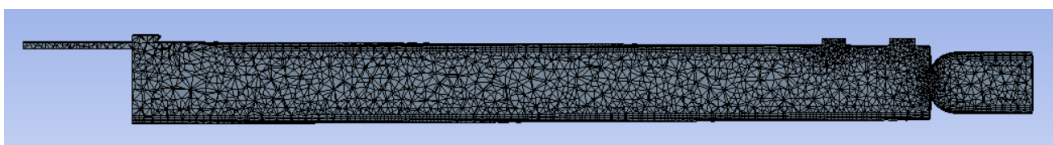
Tabel 3. 7 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Suling Tangga Nada Mi

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Elements</i>	<i>Avg. Pressure Wall (Pa)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 1 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 2 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 3 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 4 (m/s)</i>	<i>Calculation Time (s)</i>
2	40373	112863	1.030	0.097	0.061	0.067	0.006	62
2.5	26454	73089	1.026	0.116	0.055	0.058	0.006	59
3	19423	53600	1.024	0.112	0.057	0.062	0.006	67
3.5	15708	43497	1.023	0.141	0.051	0.056	0.005	132

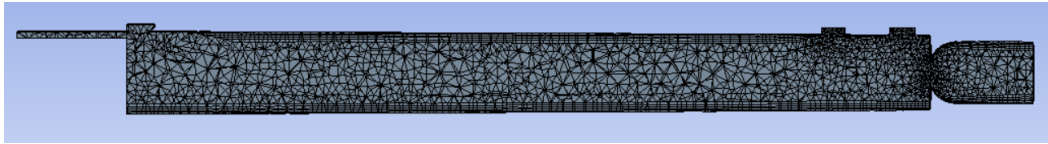
Dari Tabel 3. 7 merupakan data berdasarkan elemen dari alat musik suling untuk tangga nada Mi, berikut merupakan detail *meshing* dari setiap *Element Size* pada tangga nada Mi.



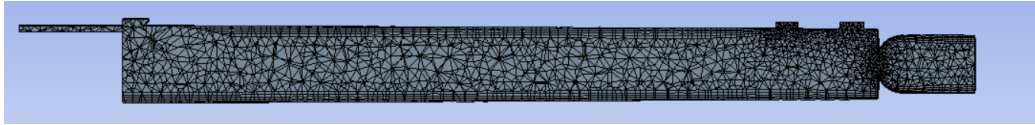
Gambar 3. 31 Detail *Meshing Element Size 2 mm* Suling Tangga Nada Mi



Gambar 3. 32 Detail *Meshing Element Size 2.5 mm* Suling Tangga Nada Mi



Gambar 3. 33 Detail *Meshing Element Size 3 mm* Suling Tangga Nada Mi



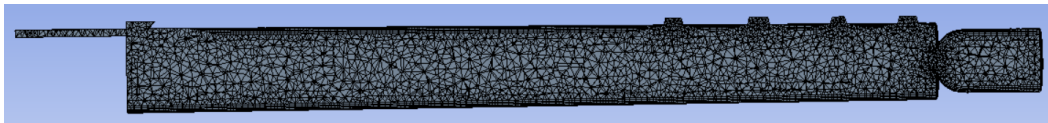
Gambar 3. 34 Detail *Meshing Element Size 3.5 mm* Suling Tangga Nada Mi

Selanjutnya merupakan tabel data berdasarkan elemen alat musik suling untuk tangga nada Sol dapat dilihat pada tabel berikut.

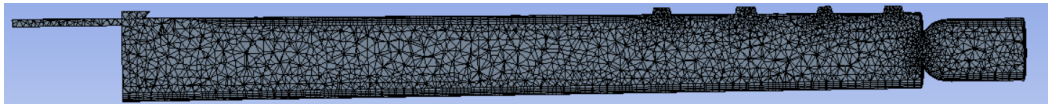
Tabel 3. 8 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Suling Tangga Nada Sol

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Elements</i>	<i>Avg. Pressure Wall (Pa)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 1 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 2 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 3 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 4 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 5 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 6 (m/s)</i>	<i>Calculation Time (s)</i>
2	40661	116142	1.025	0.097	0.042	0.041	0.036	0.040	0.004	59
2.5	27392	78076	1.022	0.103	0.038	0.039	0.034	0.036	0.003	269
3	20659	59159	1.019	0.134	0.038	0.038	0.033	0.036	0.003	77
3.5	17199	49834	1.018	0.135	0.036	0.037	0.032	0.034	0.003	66

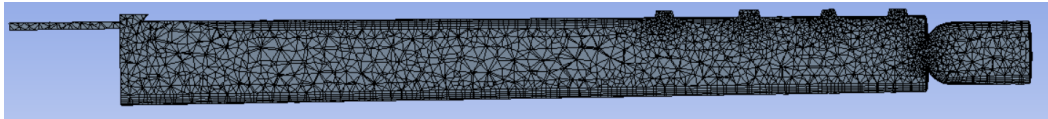
Dari Tabel 3. 8 merupakan data berdasarkan elemen dari alat musik suling untuk tangga nada Sol, berikut merupakan detail *meshing* dari setiap *Element Size* pada tangga nada Sol.



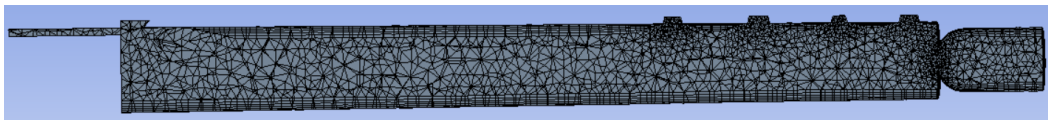
Gambar 3. 35 Detail *Meshing Element Size 2 mm* Suling Tangga Nada Sol



Gambar 3. 36 Detail *Meshing Element Size 2.5 mm* Suling Tangga Nada Sol



Gambar 3. 37 Detail *Meshing Element Size 3 mm* Suling Tangga Nada Sol



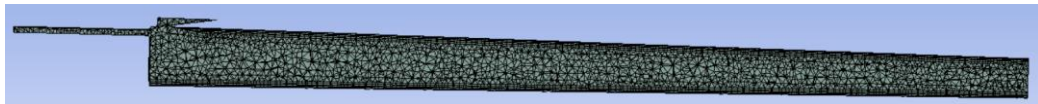
Gambar 3. 38 Detail *Meshing Element Size 3.5 mm* Suling Tangga Nada Sol

Berikut data berdasarkan elemen alat musik rekorder untuk tangga nada Do dapat dilihat pada tabel berikut.

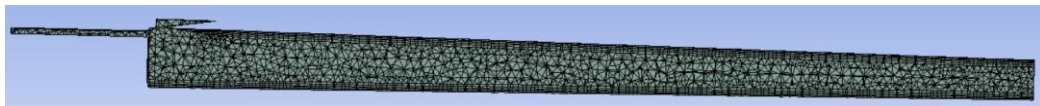
Tabel 3. 9 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Rekorder Tangga Nada Do

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Elements</i>	<i>Avg. Pressure Wall (Pa)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 1 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 2 (m/s)</i>	<i>Calculation Time (s)</i>
2	24502	61805	1.449	0.041	0.032	84
2.5	15855	38596	1.406	0.025	0.032	49
3	11219	26475	1.376	0.030	0.032	203
3.5	8621	20031	1.331	0.038	0.033	49

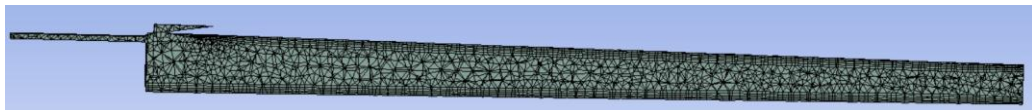
Dari Tabel 3. 9 merupakan data berdasarkan elemen dari alat musik rekorder untuk tangga nada Do, berikut merupakan detail *meshing* dari setiap *Element Size* pada tangga nada Do.



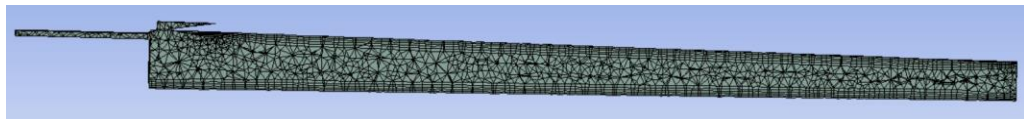
Gambar 3. 39 Detail *Meshing Element Size 2 mm* Rekorder Tangga Nada Do



Gambar 3. 40 Detail *Meshing Element Size 2.5 mm* Rekorder Tangga Nada Do



Gambar 3. 41 Detail *Meshing Element Size 3 mm* Rekorder Tangga Nada Do



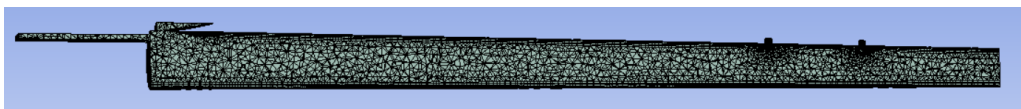
Gambar 3. 42 Detail *Meshing Element Size 3.5 mm* Rekorder Tangga Nada Do

Selanjutnya merupakan tabel data berdasarkan elemen alat musik rekorder untuk tangga nada Mi dapat dilihat pada tabel berikut.

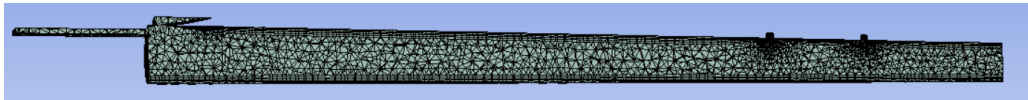
Tabel 3. 10 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Rekorder Tangga Nada Mi

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Elements</i>	<i>Avg. Pressure Wall (Pa)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 1 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 2 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 3 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 4 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 5 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 6 (m/s)</i>	<i>Calculation Time (s)</i>
2	30154	84394	1.2295	0.0332	0.0452	0.0198	0.0325	0.0144	0.0258	53
2.5	22103	62613	1.1618	0.0448	0.0428	0.0183	0.0313	0.0134	0.023	82
3	17965	51919	1.123	0.0271	0.0446	0.0193	0.0327	0.0142	0.0246	371
3.5	15825	46546	1.1074	0.0363	0.0469	0.0208	0.0348	0.0153	0.0268	104

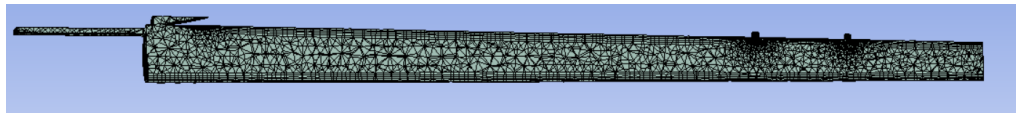
Dari Tabel 3. 10 merupakan data berdasarkan elemen dari alat musik recorder untuk tangga nada Mi, berikut merupakan detail *meshing* dari setiap *Element Size* pada tangga nada Mi.



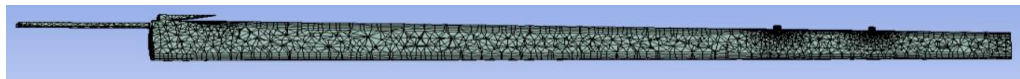
Gambar 3. 43 Detail *Meshing Element Size 2 mm* Recorder Tangga Nada Mi



Gambar 3. 44 Detail *Meshing Element Size 2.5 mm* Recorder Tangga Nada Mi



Gambar 3. 45 Detail *Meshing Element Size 3 mm* Recorder Tangga Nada Mi



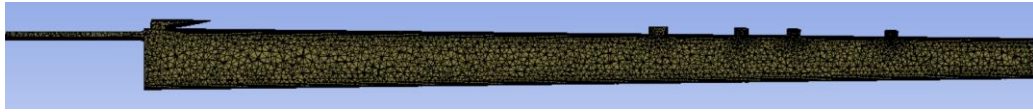
Gambar 3. 46 Detail *Meshing Element Size 3.5 mm* Recorder Tangga Nada Mi

Selanjutnya merupakan tabel data berdasarkan elemen alat musik recorder untuk tangga nada recorder Sol dapat dilihat pada tabel berikut.

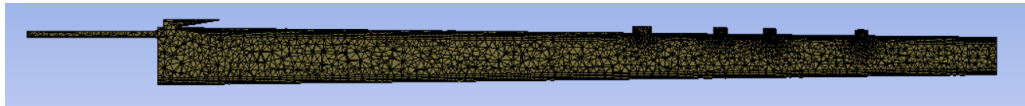
Tabel 3. 11 Data Berdasarkan Elemen Alat Musik Recorder Tangga Nada Sol

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Elements</i>	<i>Avg. Pressure Wall (Pa)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 1 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 2 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 3 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 4 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 5 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 6 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 7 (m/s)</i>	<i>Avg. Velocity Outlet 8 (m/s)</i>	<i>Calculation Time (s)</i>
2	31882	91852	1.1952	0.0378	0.0514	0.0372	0.0332	0.0136	0.0237	0.0097	0.0172	77
2.5	24201	70971	1.1333	0.0401	0.0498	0.0356	0.0322	0.0128	0.023	0.0092	0.0159	63
3	20406	61045	1.1014	0.0274	0.0526	0.0378	0.0343	0.0139	0.0248	0.0099	0.0174	273
3.5	18593	56448	1.0877	0.0371	0.0531	0.0394	0.0352	0.0145	0.0256	0.0104	0.0186	54

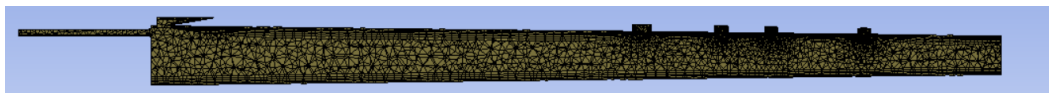
Dari Tabel 3. 11 merupakan data berdasarkan elemen dari alat musik rekorder untuk tangga nada Sol, berikut merupakan detail *meshing* dari setiap *Element Size* pada tangga nada Sol.



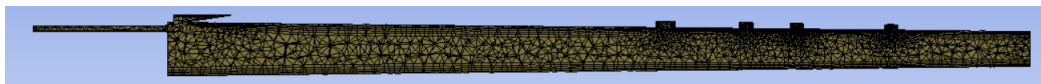
Gambar 3. 47 Detail *Meshing Element Size* 2 mm Rekorder Tangga Nada Sol



Gambar 3. 48 Detail *Meshing Element Size* 2.5 mm Rekorder Tangga Nada Sol



Gambar 3. 49 Detail *Meshing Element Size* 3 mm Rekorder Tangga Nada Sol

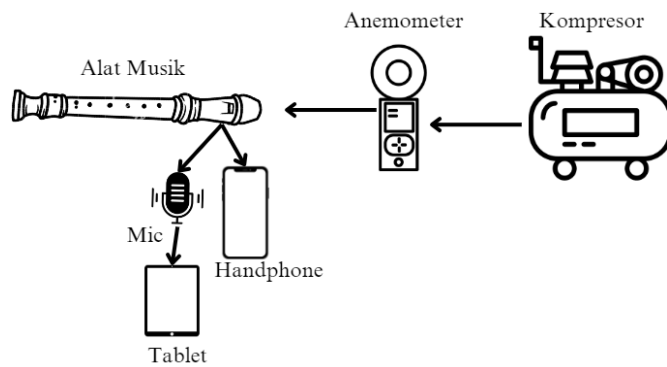


Gambar 3. 50 Detail *Meshing Element Size* 3.5 mm Rekorder Tangga Nada Sol

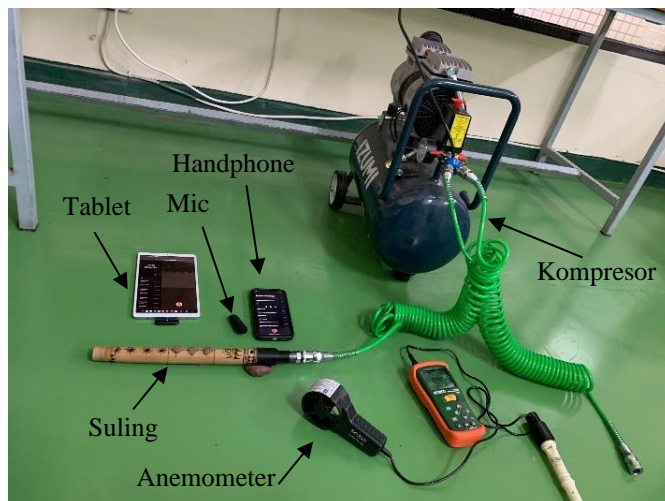
Dengan data berdasarkan elemen dari alat musik selanjutnya hasil dari *mesh dependency* akan dibahas pada bab 4

3.5 Proses Pengambilan Data

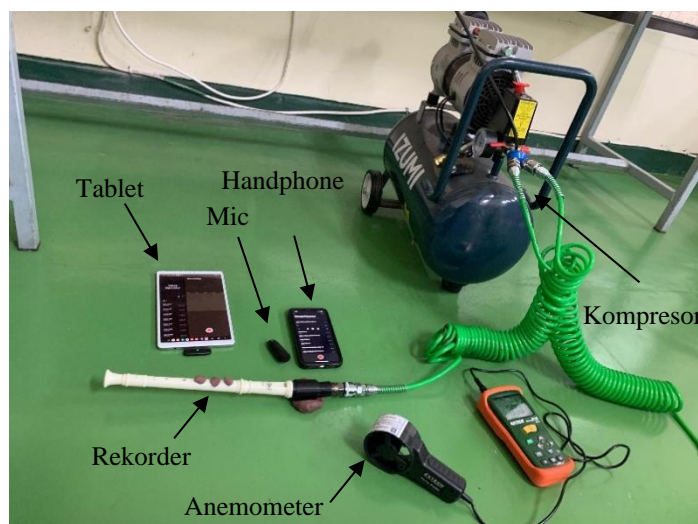
Pada proses pengambilan data menggunakan *microphone* dan *handphone* untuk merekam suara yang dihasilkan oleh alat musik tersebut serta menggunakan *anemometer* untuk mengetahui laju aliran yang keluar. *Microphone* diletakkan di depan alat musik yang sudah terhubung dengan *handphone* dan kompresor yang sudah terhubung ke alat musik tiup sebagai sumber udara. Proses pengujian yang dilakukan bisa dilihat sebagai berikut.



Gambar 3. 51 Skema Pengujian



Gambar 3. 52 Proses Pengujian Alat Musik Suling



Gambar 3. 53 Proses Pengujian Alat Musik Rekorder

Pada Gambar 3. 27 terlihat alur skema proses perekaman dimana dimulai dari kompresor sebagai sumber udara, sebelum disambungkan ke alat musik selang kompresor tersebut diarahkan ke *anemometer* dan tunggu 20 detik jika

udara yang keluar sudah sesuai yang diinginkan maka selang kompresor langsung disambungkan ke alat musik. Setelah itu proses rekaman di mulai dengan mengambil 8 rekaman pada masing-masing tangga nada setiap kecepatan udara. Setelah proses perekaman selesai maka hasil rekaman tersebut dipindahkan ke perangkat lunak *MATLAB R2024a* untuk membaca hasil rekaman tersebut dan akan mengubah rekaman tersebut ke bentuk FFT. Berikut program *MATLAB R2024a* untuk membaca hasil rekaman tersebut dan mengubahnya menjadi grafik FFT.

```
do1 = '0.50 do rekor1.m4a'  
[x1, fs1] = audioread(do1);  
l1 = length(x1);  
t1 = 0:1/fs1:(l1-1)/fs1;  
  
y1 = abs(fft(x1)/l1);  
y1 = y1(1:l1/2+1);  
f1 = fs1*(0:l1/2)/l1;  
  
subplot(4,4,5), plot(t1, x1), title('do 1'),  
grid on, xlim([0 t1(end)]), xlabel('detik'), ylabel('amplitudo')  
  
subplot(4,4,1), plot(f1, y1), title('do 1 (FFT)'),  
grid on, xlabel('Frekuensi'), ylabel('besar')
```

Gambar 3. 54 Program *MATLAB R2024a*

BAB 4

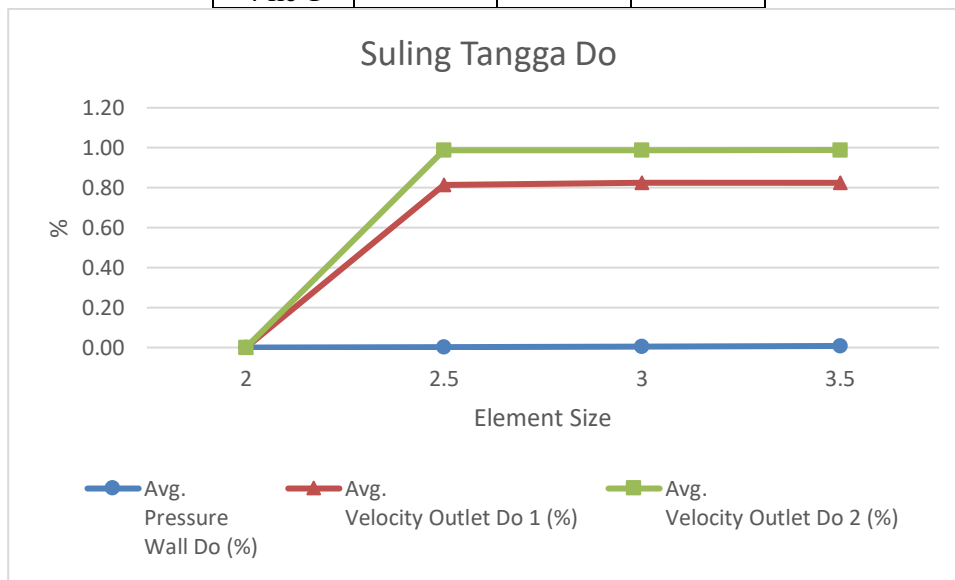
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *Mesh Dependency*.

Dari Tabel 3. 6 sampai dengan Tabel 3. 9 sebelumnya didapatkan hasil dari *mesh dependency* dari masing-masing alat musik pada setiap tangga nada. Berikut merupakan hasil *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Do.

Tabel 4. 1 Selisih Data *Mesh Dependency* Alat Musik Suling Tangga Nada Do

Data	Avg. Pressure Wall (%)	Avg. Velocity Outlet 1 (%)	Avg. Velocity Outlet 2 (%)
1	-	-	-
2 ke 1	0.003	0.156	0.068
3 ke 1	0.006	0.084	0.032
4 ke 1	0.008	0.093	0.084

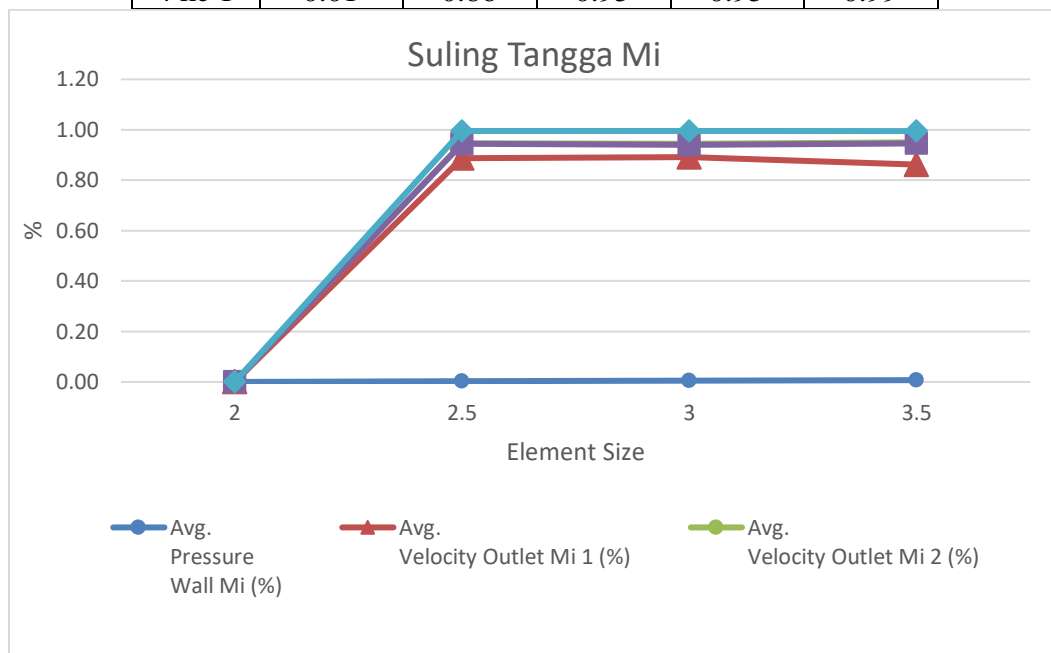


Gambar 4. 1 Grafik *Mesh Dependency* Alat Musik Suling Tangga Nada Do

Pada tabel dan grafik *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Do tidak terdapat perbedaan yang lebih dari 5% sehingga pada simulasi ini menggunakan *element size* ukuran 2 mm. Selanjutnya hasil *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Mi.

Tabel 4. 2 Selisih Data *Mesh Dependency* Alat Musik Suling Tangga Nada Mi

Data	Avg. Pressure Wall (%)	Avg. Velocity Outlet 1 (%)	Avg. Velocity Outlet 2 (%)	Avg. Velocity Outlet 3 (%)	Avg. Velocity Outlet 4 (%)
1	-	-	-	-	-
2 ke 1	0.00	0.89	0.95	0.94	0.99
3 ke 1	0.01	0.89	0.95	0.94	0.99
4 ke 1	0.01	0.86	0.95	0.95	0.99

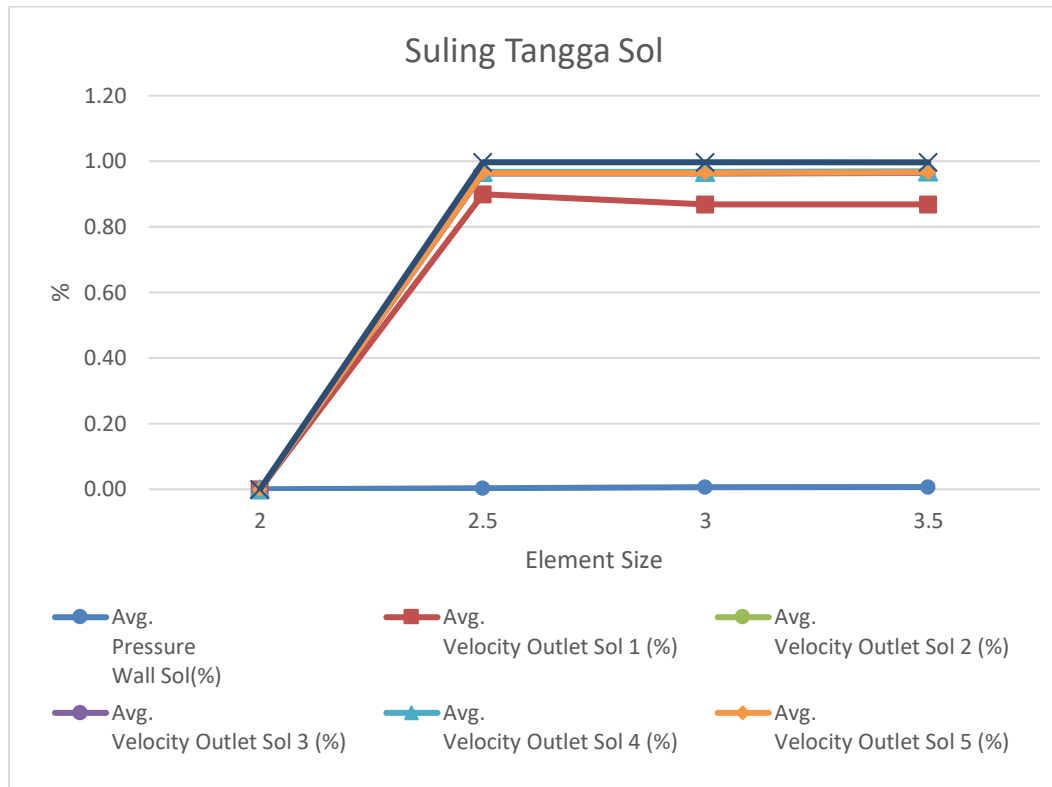


Gambar 4. 2 Grafik *Mesh Dependency* Alat Musik Suling Tangga Nada Mi

Pada tabel dan grafik *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Mi tidak terdapat perbedaan yang lebih dari 5% sehingga pada simulasi ini menggunakan *element size* ukuran 2 mm. Selanjutnya hasil *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Sol.

Tabel 4. 3 Selisih Data *Mesh Dependency* Alat Musik Suling Tangga Nada Sol

Data	Avg. Pressure Wall (%)	Avg. Velocity Outlet 1 (%)	Avg. Velocity Outlet 2 (%)	Avg. Velocity Outlet 3 (%)	Avg. Velocity Outlet 4 (%)	Avg. Velocity Outlet 5 (%)	Avg. Velocity Outlet 6 (%)
1	-	-	-	-	-	-	-
2 ke 1	0.00	0.90	0.96	0.96	0.97	0.96	1.00
3 ke 1	0.01	0.87	0.96	0.96	0.97	0.96	1.00
4 ke 1	0.01	0.87	0.96	0.96	0.97	0.97	1.00

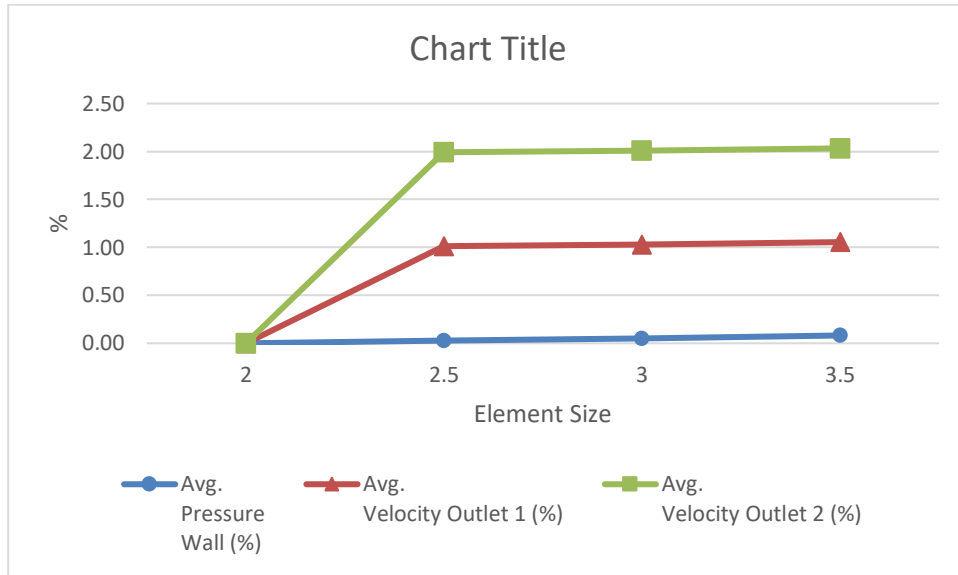


Gambar 4. 3 Grafik *Mesh Dependency* Alat Musik Suling Tangga Nada Sol

Pada tabel dan grafik *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Sol tidak terdapat perbedaan yang lebih dari 5% sehingga pada simulasi ini menggunakan *element size* ukuran 2 mm. Berikut merupakan hasil *mesh dependency* dari alat musik suling dengan tangga nada Do.

Tabel 4. 4 Selisih Data *Mesh Dependency* Alat Musik Rekorder Tangga Nada Do

Data	Avg. Pressure Wall (%)	Avg. Velocity Outlet 1 (%)	Avg. Velocity Outlet 2 (%)
1	-	-	-
2 ke 1	0.030	0.983	0.978
3 ke 1	0.051	0.979	0.978
4 ke 1	0.082	0.974	0.977

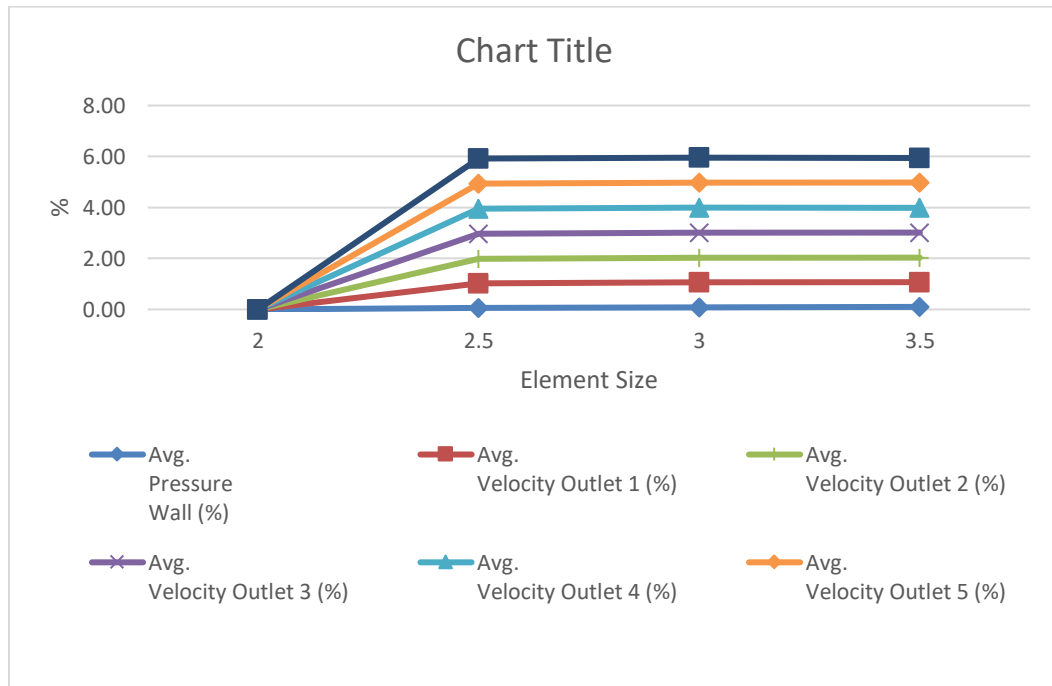


Gambar 4. 4 Grafik *Mesh Dependency* Alat Musik Rekorder Tangga Nada Do

Pada tabel dan grafik *mesh dependency* dari alat musik Rekorder dengan tangga nada Do tidak terdapat perbedaan yang lebih dari 5% sehingga pada simulasi ini menggunakan *element size* ukuran 2 mm. Selanjutnya hasil *mesh dependency* dari alat musik rekorder dengan tangga nada Mi.

Tabel 4. 5 Selisih Data *Mesh Dependency* Alat Musik Rekorder Tangga Nada Mi

Data	Avg. Pressure Wall (%)	Avg. Velocity Outlet 1 (%)	Avg. Velocity Outlet 2 (%)	Avg. Velocity Outlet 3 (%)	Avg. Velocity Outlet 4 (%)	Avg. Velocity Outlet 5 (%)	Avg. Velocity Outlet 6 (%)
1	-	-	-	-	-	-	-
2 ke 1	0.06	0.96	0.97	0.99	0.97	0.99	0.98
3 ke 1	0.09	0.98	0.96	0.98	0.97	0.99	0.98
4 ke 1	0.10	0.97	0.96	0.98	0.97	0.99	0.98

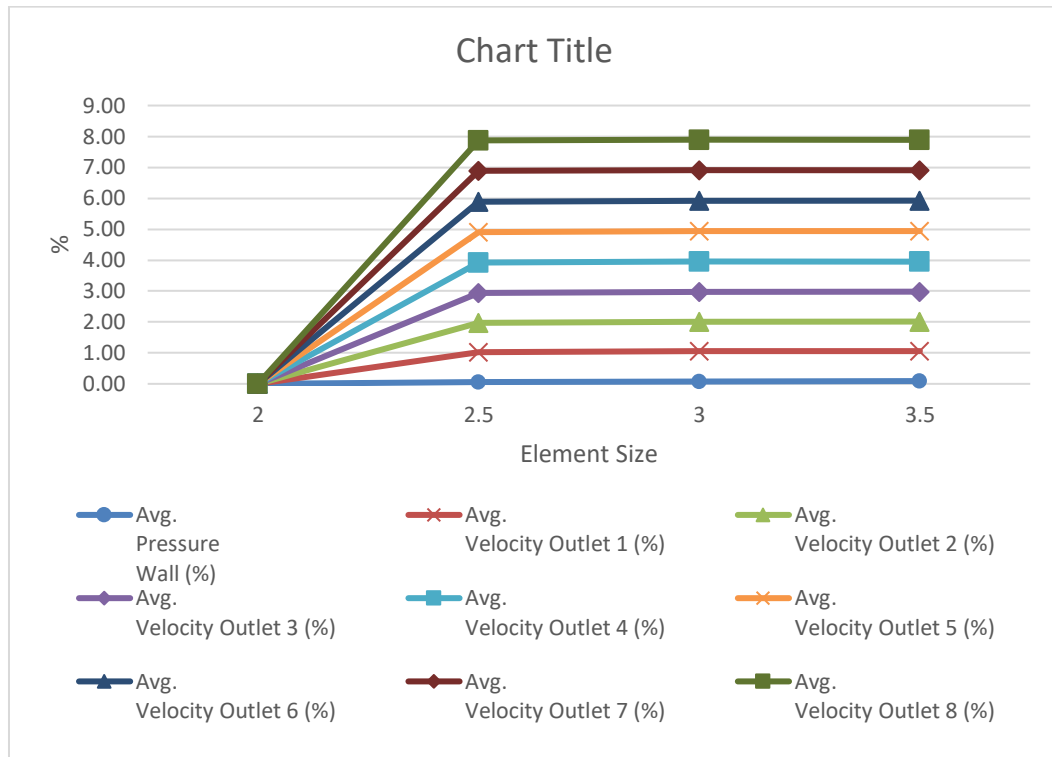


Gambar 4. 5 Grafik *Mesh Dependency* Alat Musik Rekorder Tangga Nada Mi

Pada tabel dan grafik *mesh dependency* dari alat musik rekorder dengan tangga nada Mi tidak terdapat perbedaan yang lebih dari 5% sehingga pada simulasi ini menggunakan *element size* ukuran 2 mm. Selanjutnya hasil *mesh dependency* dari alat musik rekorder dengan tangga nada Sol.

Tabel 4. 6 Selisih Data *Mesh Dependency* Alat Musik Rekorder Tangga Nada Sol

Data	Avg. Pressure Wall (%)	Avg. Velocity Outlet 1 (%)	Avg. Velocity Outlet 2 (%)	Avg. Velocity Outlet 3 (%)	Avg. Velocity Outlet 4 (%)	Avg. Velocity Outlet 5 (%)	Avg. Velocity Outlet 6 (%)	Avg. Velocity Outlet 7 (%)	Avg. Velocity Outlet 8 (%)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 ke 1	-0.05	0.06	-0.03	-0.04	-0.03	-0.06	-0.03	-0.05	-0.08
3 ke 1	-0.08	-0.28	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.01
4 ke 1	-0.09	-0.02	0.03	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.08



Gambar 4. 6 Grafik *Mesh Dependency* Alat Musik Rekorder Tangga Nada Sol

Pada tabel dan grafik *mesh dependency* dari alat musik Rekorder dengan tangga nada Sol tidak terdapat perbedaan yang lebih dari 5% sehingga pada simulasi ini menggunakan *element size* ukuran 2 mm.

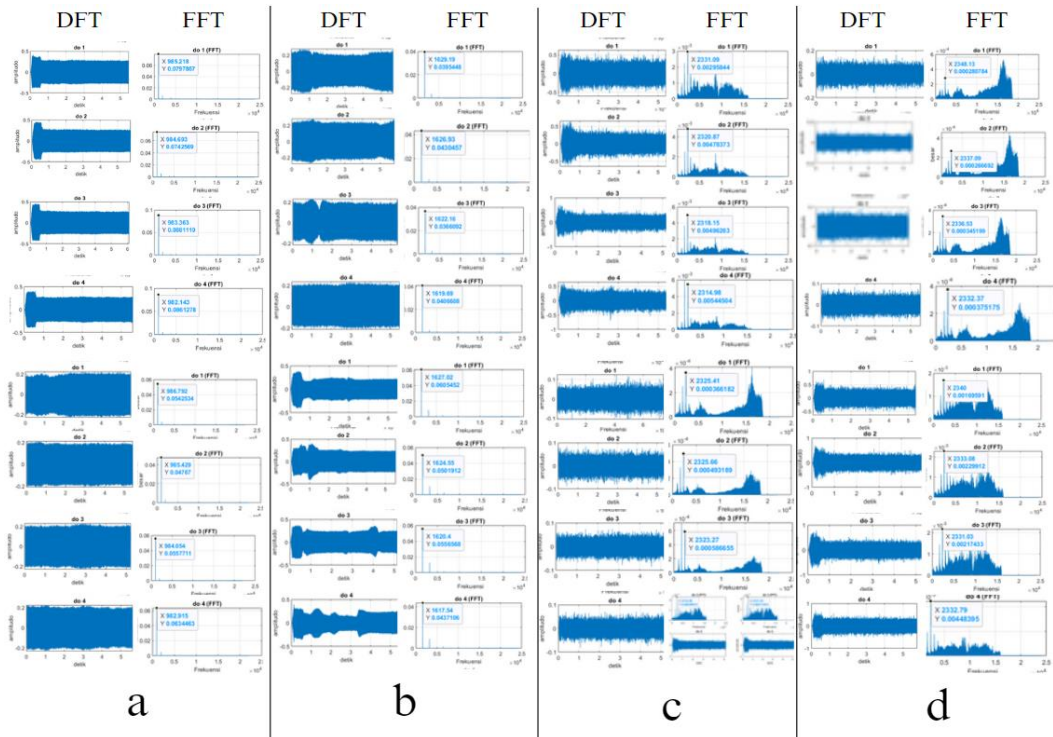
4.2 Hasil Rekaman

Hasil dari rekaman yang dilakukan yaitu berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT). Data dari hasil grafik tersebut akan dianalisis untuk mengetahui perbedaan frekuensi dan amplitudo yang dihasilkan pada masing-masing alat musik.

4.2.1 Alat Musik Suling

4.2.1.1 Tangga Nada Do

Berikut hasil rekaman berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT) dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 7.

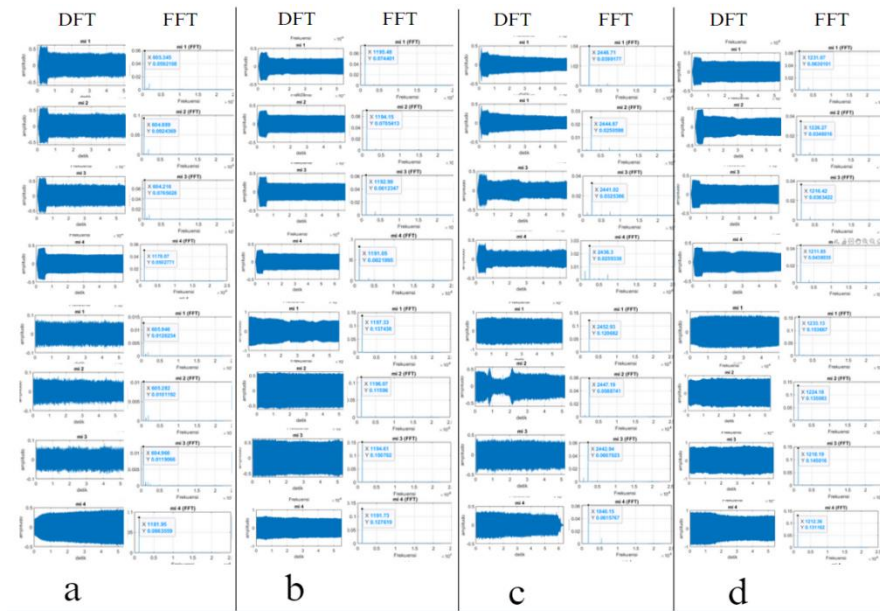


Gambar 4. 7 Grafik DFT dan FFT Suling Tangga Nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Terdapat masing-masing 8 grafik untuk setiap kecepatan udara yang dimana terdapat grafik DFT untuk membaca hasil rekaman dari tangga nada Do dalam satuan waktu lalu ditransformasikan ke satuan frekuensi pada grafik FFT.

4.2.1.2 Tangga Nada Mi

Berikut hasil rekaman berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT) dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 8.

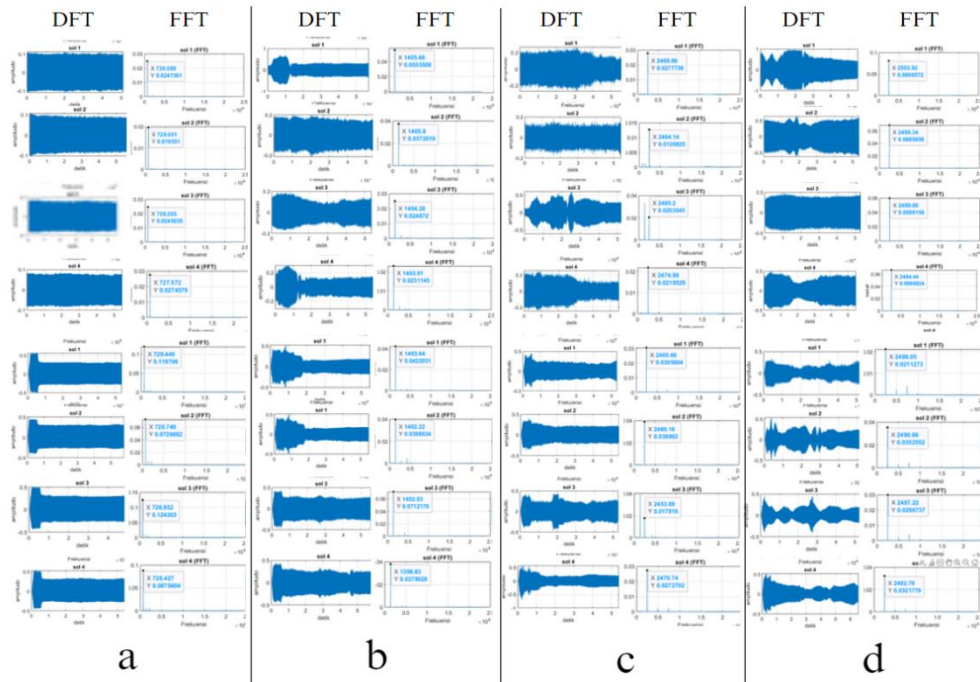


Gambar 4. 8 Grafik DFT dan FFT Suling Tangga Nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Terdapat masing-masing 8 grafik untuk setiap kecepatan udara yang dimana terdapat grafik DFT untuk membaca hasil rekaman dari tangga nada Mi dalam satuan waktu lalu ditransformasikan ke satuan frekuensi pada grafik FFT.

4.2.1.3 Tangga Nada Sol

Berikut hasil rekaman berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT) dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Sol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 9.



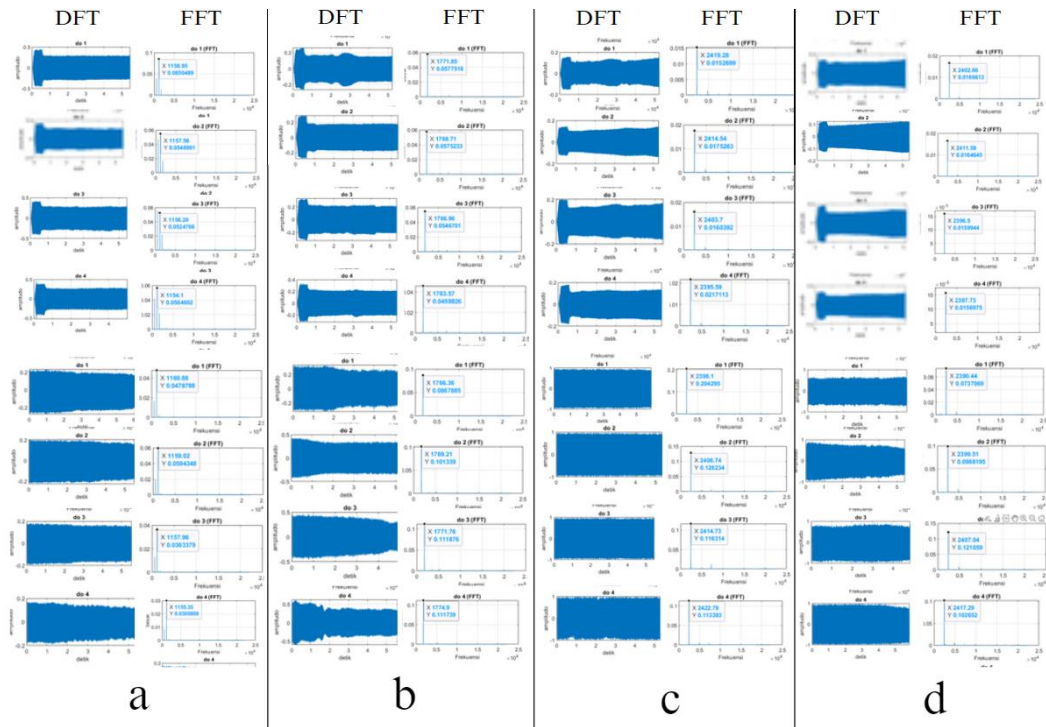
Gambar 4. 9 Grafik DFT dan FFT Suling Tangga Nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Terdapat masing-masing 8 grafik untuk setiap kecepatan udara yang dimana terdapat grafik DFT untuk membaca hasil rekaman dari tangga nada Sol dalam satuan waktu lalu ditransformasikan ke satuan frekuensi pada grafik FFT.

4.2.2 Alat Musik Rekorder

4.2.2.1 Tangga Nada Do

Berikut hasil rekaman berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT) dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 10.

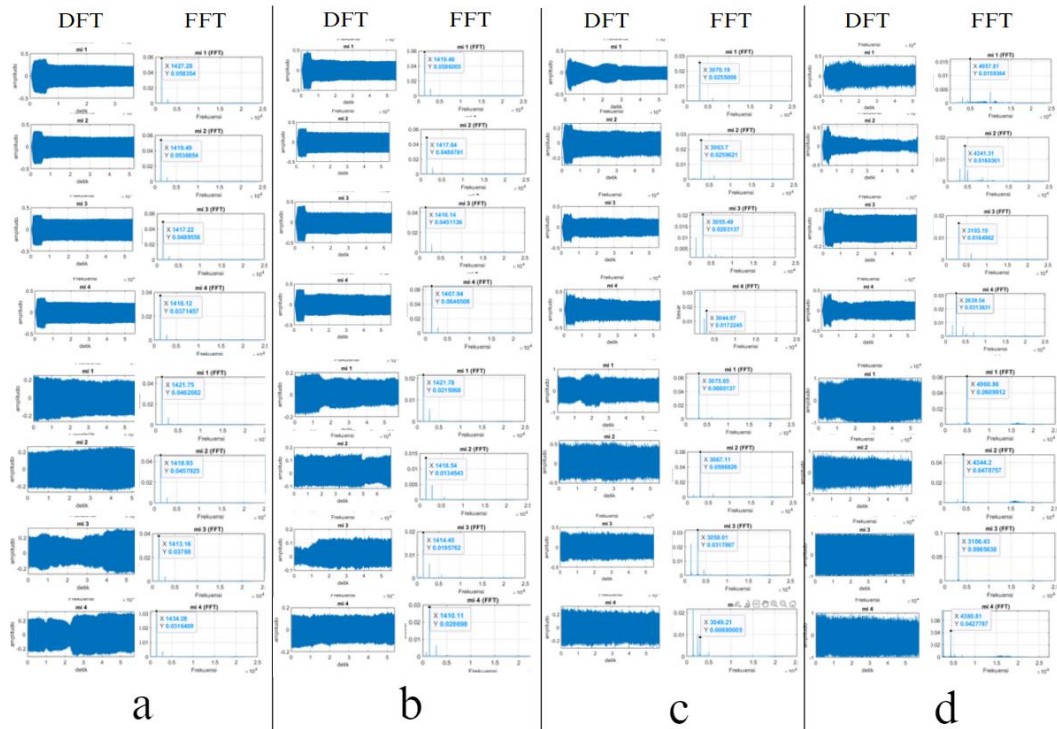


Gambar 4. 10 Grafik DFT dan FFT Rekorder Tangga Nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Terdapat masing-masing 8 grafik untuk setiap kecepatan udara yang dimana terdapat grafik DFT untuk membaca hasil rekaman dari tangga nada Do dalam satuan waktu lalu ditransformasikan ke satuan frekuensi pada grafik FFT.

4.2.2.2 Tangga Nada Mi

Berikut hasil rekaman berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT) dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 11.

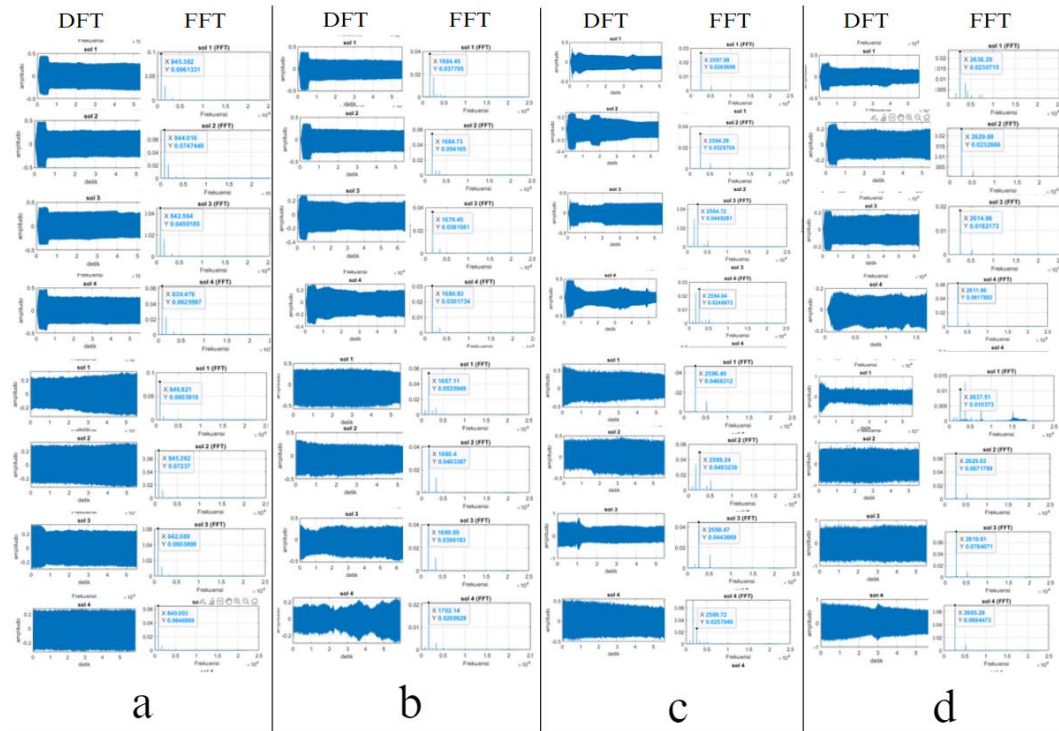


Gambar 4. 11 Grafik DFT dan FFT Rekorder Tangga Nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Terdapat masing-masing 8 grafik untuk setiap kecepatan udara yang dimana terdapat grafik DFT untuk membaca hasil rekaman dari tangga nada Mi dalam satuan waktu lalu ditransformasikan ke satuan frekuensi pada grafik FFT.

4.2.2.3 Tangga Nada Sol

Berikut hasil rekaman berupa grafik *Discrete Fourier* (DFT) dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform* (FFT) dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Sol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 12.



Gambar 4. 12 Grafik DFT dan FFT Rekorder Tangga Nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Terdapat masing-masing 8 grafik untuk setiap kecepatan udara yang dimana terdapat grafik DFT untuk membaca hasil rekaman dari tangga nada Sol dalam satuan waktu lalu ditransformasikan ke satuan frekuensi pada grafik FFT.

4.2.3 Hasil Seluruh Rekaman

Berdasarkan hasil rekaman sebelumnya didapatkan data frekuensi dan amplitudo pada masing-masing kecepatan udara untuk setiap tangga nada. Dari grafik sebelumnya didapatkan data sebagai berikut.

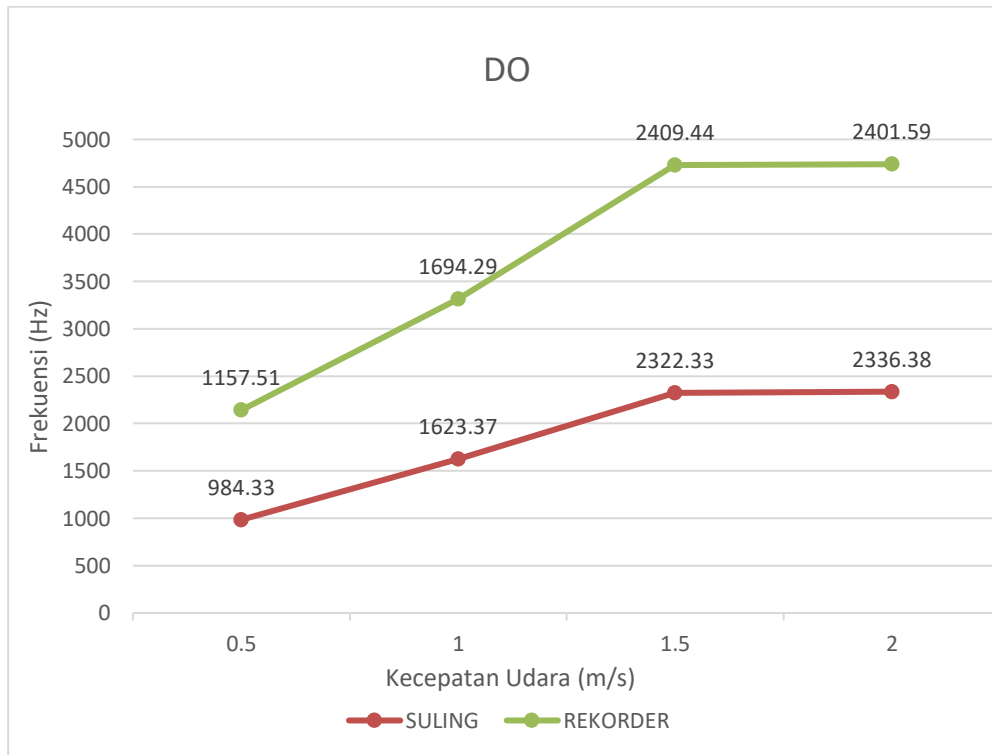
Tabel 4. 7 Data Frekuensi

SULING								RATA-RATA		REKORDER								
DO								DO		HP				MIC				
Kecepatan (m/s)	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	4.00	SULING	REKORDER	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	4.00
0.50	982.22	984.69	983.36	982.14	986.79	985.43	984.05	982.92	984.33	1157.51	1158.95	1157.56	1156.28	1154.10	1160.88	1159.02	1157.96	1155.35
1.00	1627.02	1624.55	1620.40	1617.00	1629.19	1626.93	1623.16	1619.69	1623.37	1694.29	1771.85	1768.71	1766.96	1763.57	1766.36	1769.21	1772.76	1774.90
1.50	2331.09	2320.87	2318.15	2314.98	2328.41	2326.66	2323.27	2319.18	2322.53	2409.44	2419.29	2414.54	2403.70	2395.59	2398.10	2406.74	2414.73	2422.79
2.00	2340.00	2333.08	2331.63	2332.79	2348.13	2337.09	2336.53	2332.37	2336.38	2401.59	2402.66	2411.58	2396.20	2387.73	2390.44	2399.51	2407.04	2417.29
MI								MI		HP				MIC				
Kecepatan (m/s)	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	4.00	SULING	REKORDER	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	4.00
0.50	605.35	604.89	604.22	1178.07	605.00	605.28	604.97	1181.95	748.71	1421.03	1427.28	1419.49	1417.22	1416.12	1421.75	1418.93	1413.16	1434.28
1.00	1195.45	1194.15	1192.99	1191.05	1197.53	1196.07	1194.61	1191.73	1194.18	1415.76	1419.46	1417.64	1416.14	1407.94	1421.78	1418.54	1414.45	1410.11
1.50	2448.71	2444.87	2441.92	2436.20	2452.20	2447.19	2442.92	1840.15	2369.26	3060.43	3070.19	3063.70	3055.49	3044.07	3075.85	3067.11	3058.01	3049.21
2.00	1231.07	1226.27	1216.42	1211.85	1233.13	1224.18	1218.19	1212.36	1221.69	3979.26	4987.51	4341.31	2639.54	3103.15	4960.86	4344.20	3106.43	4380.81
SOL								SOL		HP				MIC				
Kecepatan (m/s)	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	4.00	SULING	REKORDER	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	4.00
0.50	729.45	728.75	726.95	726.43	730.59	729.05	728.21	727.57	728.37	843.20	845.38	844.02	842.56	839.48	846.82	845.26	842.09	840.00
1.00	1483.64	1482.64	1482.03	1478.83	1485.66	1485.80	1484.28	1480.91	1483.30	1685.01	1684.45	1684.73	1679.45	1680.93	1687.11	1680.00	1680.99	1702.14
1.50	2465.66	2460.16	2453.69	2470.74	2469.96	2464.14	2465.20	2474.88	2468.05	2592.99	2597.56	2594.29	2584.72	2594.04	2596.49	2599.24	2598.47	2588.72
2.00	2498.05	2490.66	2487.22	2492.76	2503.92	2495.34	2489.66	2484.44	2491.76	2623.15	2636.29	2629.88	2614.96	2611.86	2637.51	2629.83	2619.61	2604.28

Tabel 4. 8 Data Amplitudo

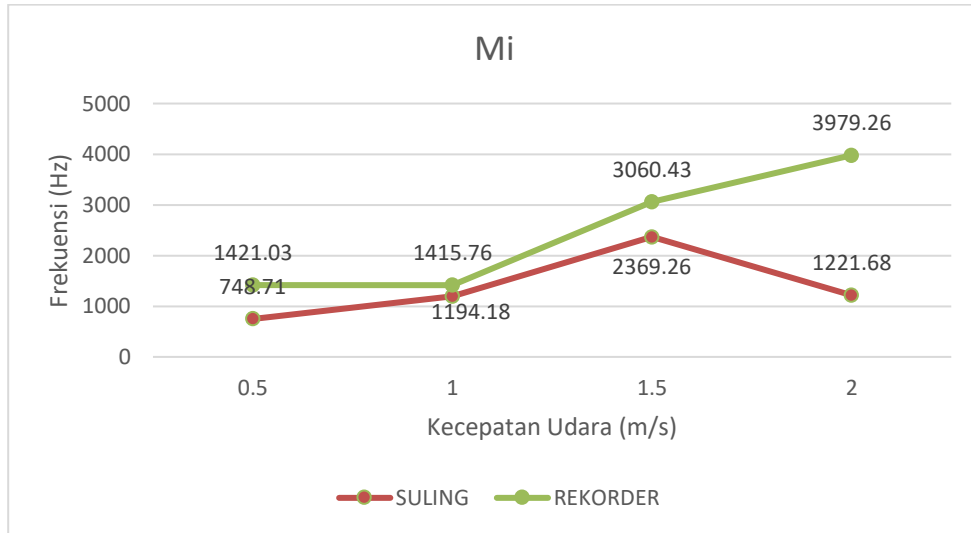
SULING										RATA RATA		REKORDER									
DO										DO		DO									
HP					MIC							HP					MIC				
0.50	0.0797	0.0742	0.0881	0.0861	0.0634	0.0557	0.0476	0.0542	0.0686	0.0528	0.0850	0.0548	0.0524	0.0564	0.0478	0.0594	0.0363	0.0300			
1.00	0.0605	0.0501	0.0556	0.0437	0.0395	0.0406	0.0430	0.0366	0.0462	0.0783	0.0577	0.0575	0.0546	0.0459	0.0867	0.1013	0.1118	0.1111			
1.50	0.0025	0.0047	0.0040	0.0054	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0025	0.0791	0.0152	0.0175	0.0160	0.0217	0.2042	0.1282	0.1163	0.1133			
2.00	0.0016	0.0022	0.0021	0.0044	0.0028	0.0002	0.0003	0.0003	0.0017	0.0576	0.0166	0.0164	0.0159	0.0156	0.0757	0.0988	0.1210	0.1026			
MI										MI		MI									
HP					MIC							HP					MIC				
0.50	0.0592	0.0924	0.0765	0.0502	0.0126	0.0101	0.0119	0.0563	0.0499	0.0449	0.0583	0.0537	0.0489	0.0371	0.0462	0.0457	0.0378	0.0316			
1.00	0.0744	0.0705	0.0612	0.0821	0.1374	0.1159	0.1507	0.1276	0.1025	0.0375	0.0586	0.0486	0.0451	0.0646	0.0215	0.0134	0.0195	0.0286			
1.50	0.0040	0.0155	0.0325	0.0259	0.1206	0.0588	0.0607	0.0616	0.0487	0.0319	0.0255	0.0259	0.0203	0.0172	0.0660	0.0596	0.0317	0.0088			
2.00	0.0030	0.0346	0.0363	0.0438	0.1536	0.1350	0.1450	0.1316	0.0920	0.0412	0.0159	0.0160	0.0164	0.0313	0.0609	0.0478	0.0956	0.0427			
SOL										SOL		SOL									
HP					MIC							HP					MIC				
0.50	0.1197	0.0726	0.0124	0.0875	0.0247	0.0195	0.0246	0.0274	0.0485	0.0717	0.0961	0.0747	0.0450	0.0625	0.0980	0.0723	0.0603	0.0646			
1.00	0.0422	0.0396	0.0712	0.0379	0.0553	0.0372	0.0248	0.0231	0.0414	0.0390	0.0377	0.0541	0.0361	0.0301	0.0535	0.0403	0.0396	0.0200			
1.50	0.0305	0.0389	0.0178	0.0272	0.0277	0.0126	0.0203	0.0218	0.0246	0.0369	0.0265	0.0328	0.0449	0.0248	0.0466	0.0493	0.0443	0.0257			
2.00	0.0211	0.0352	0.0298	0.0321	0.0806	0.0689	0.0596	0.0666	0.0492	0.0439	0.0230	0.0232	0.0182	0.0617	0.0103	0.0671	0.0784	0.0694			

Dari Tabel 4. 7 dan Tabel 4. 8 didapatkan nilai rata-rata frekuensi dari masing-masing tangga nada dengan kecepatan udara yang berbeda, berikut grafik nilai rata-rata frekuensi setiap tangga nada dengan kecepatan yang berbeda.



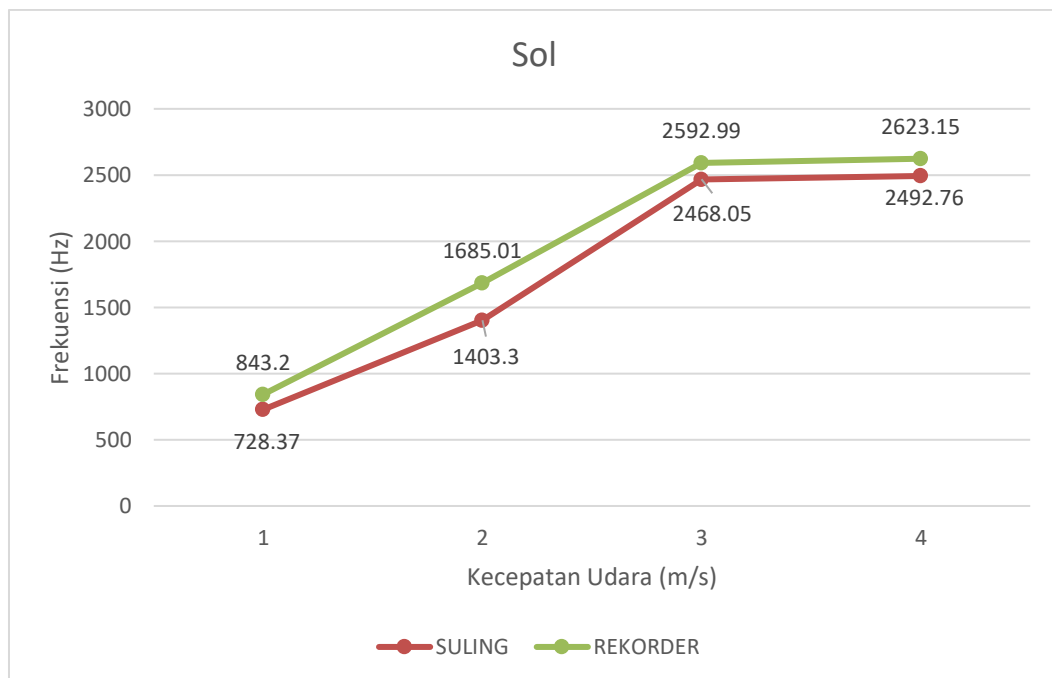
Gambar 4. 13 Grafik Frekuensi Tangga Nada Do

Pada Gambar 4. 13 dapat dilihat frekuensi untuk tangga nada Do untuk kecepatan udara 0.50 m/s pada alat musik suling bernilai 984.33 Hz sedangkan untuk alat musik rekorder memiliki nilai frekuensi sebesar 1157.51 Hz. Pada kecepatan 1 m/s, 1.50 m/s dan 2 m/s nilai frekuensi akan terus naik seiring kenaikan kecepatan udara pada masing-masing alat musik.



Gambar 4. 14 Grafik Frekuensi Tangga Nada Mi

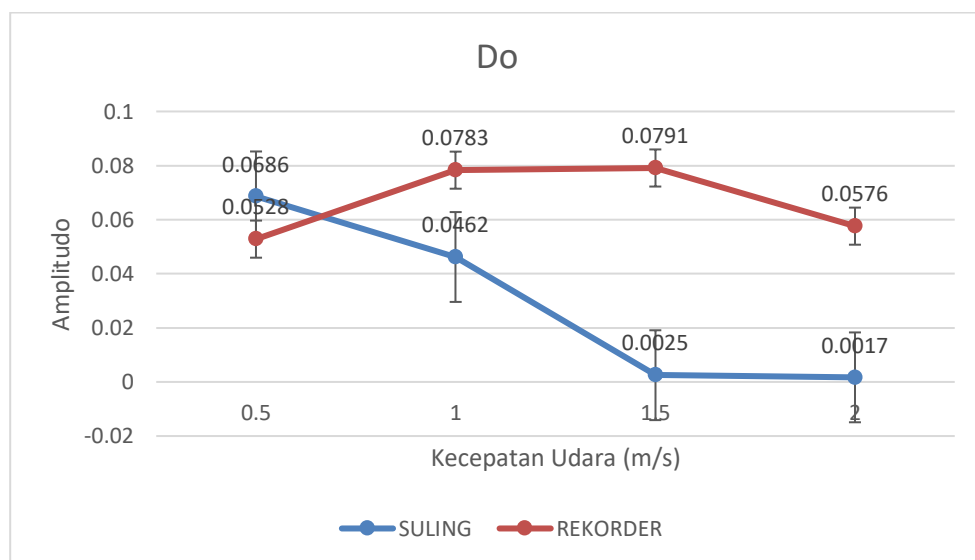
Pada Gambar 4. 14 dapat dilihat frekuensi untuk tangga nada Mi untuk kecepatan udara 0.50 m/s pada alat musik suling bernilai 748.71 Hz sedangkan untuk alat musik rekorder memiliki nilai frekuensi sebesar 1421.03 Hz. Pada kecepatan 1 m/s nilai frekuensi pada alat musik rekorder terdapat penurunan frekuensi menjadi 1415.76 Hz dan pada kecepatan selanjutnya terjadi kenaikan frekuensi. Sedangkan pada alat musik suling pada kecepatan 1 m/s dan 1.50 m/s terjadi kenaikan frekuensi, akan tetapi penurunan frekuensi pada kecepatan 2 m/s.



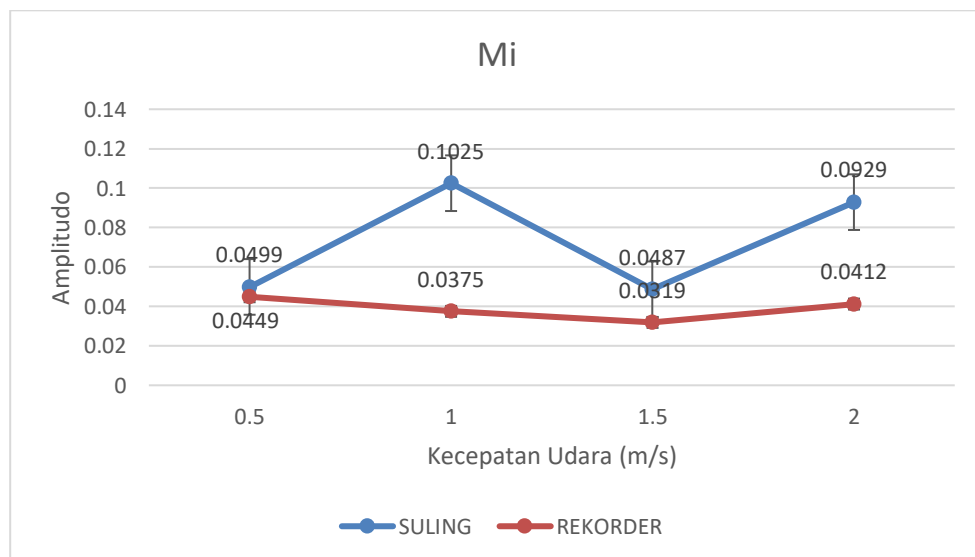
Gambar 4. 15 Grafik Frekuensi Tangga Nada Sol

Pada Gambar 4. 15 dapat dilihat frekuensi untuk tangga nada Sol untuk kecepatan udara 0.50 m/s pada alat musik suling bernilai 728.37 Hz sedangkan untuk alat musik rekorder memiliki nilai frekuensi sebesar 843.2 Hz. Pada kecepatan 1 m/s, 1.50 m/s dan 2 m/s nilai frekuensi akan terus naik seiring kenaikan kecepatan udara pada masing-masing alat musik.

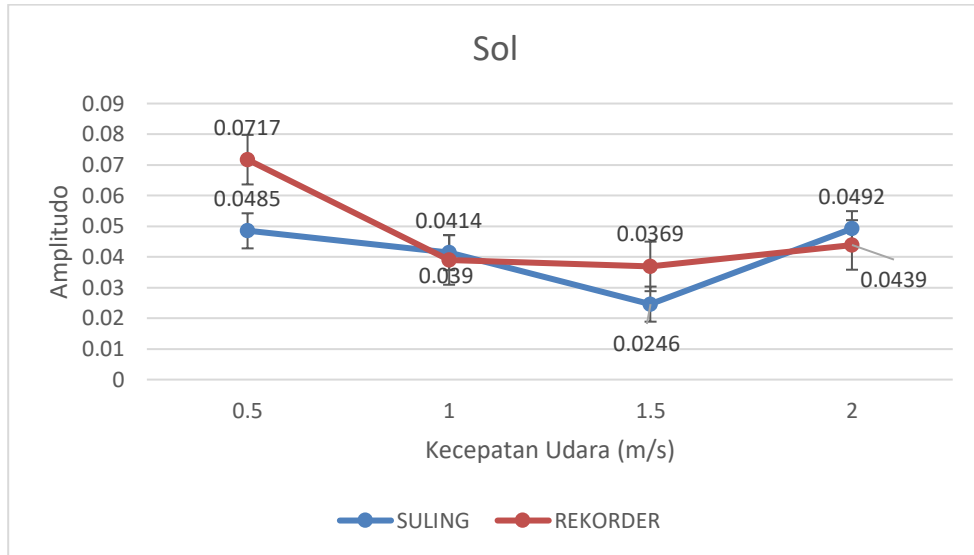
Selanjutnya pada Tabel 4. 7 dan Tabel 4. 8 didapatkan nilai rata-rata amplitudo dari masing-masing tangga nada dengan kecepatan udara yang berbeda, berikut grafik nilai rata-rata amplitudo setiap tangga nada dengan kecepatan yang berbeda.



Gambar 4. 16 Amplitudo Tangga Nada Do



Gambar 4. 17 Amplitudo Tangga Nada Mi



Gambar 4. 18 Amplitudo Tangga Nada Sol

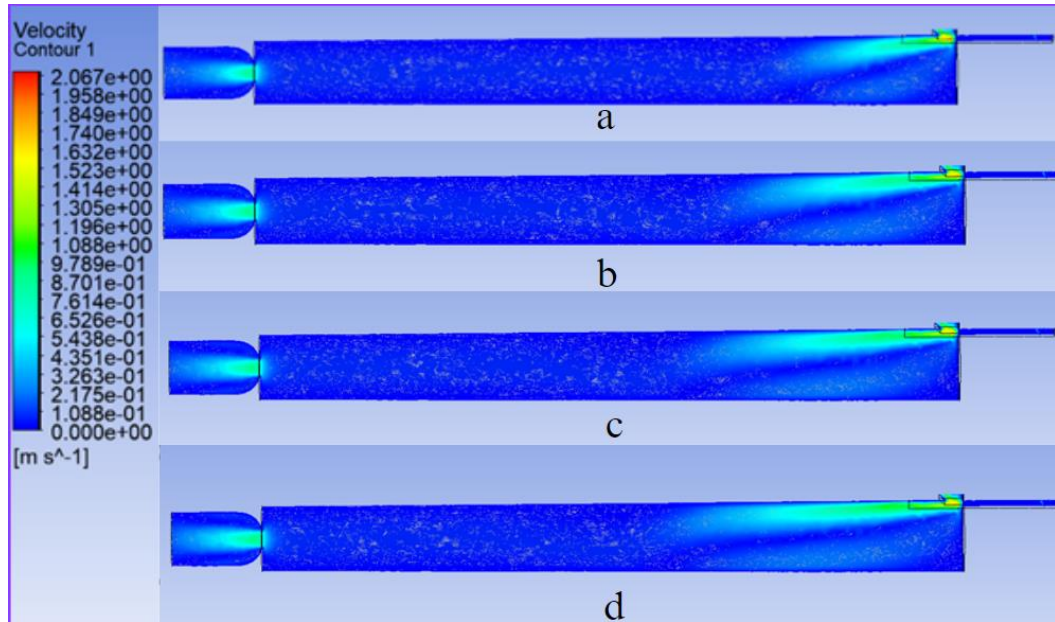
4.3 Hasil Simulasi

Hasil dari simulasi yang dilakukan yaitu berupa fenomena aliran serta distribusi kecepatan aliran, distribusi tekanan. Data dari hasil simulasi dan grafik tersebut akan dianalisis untuk mengetahui perbedaan fenomena aliran pada setiap tangga nada yang dihasilkan pada masing-masing alat musik.

4.3.1 Alat Musik Suling

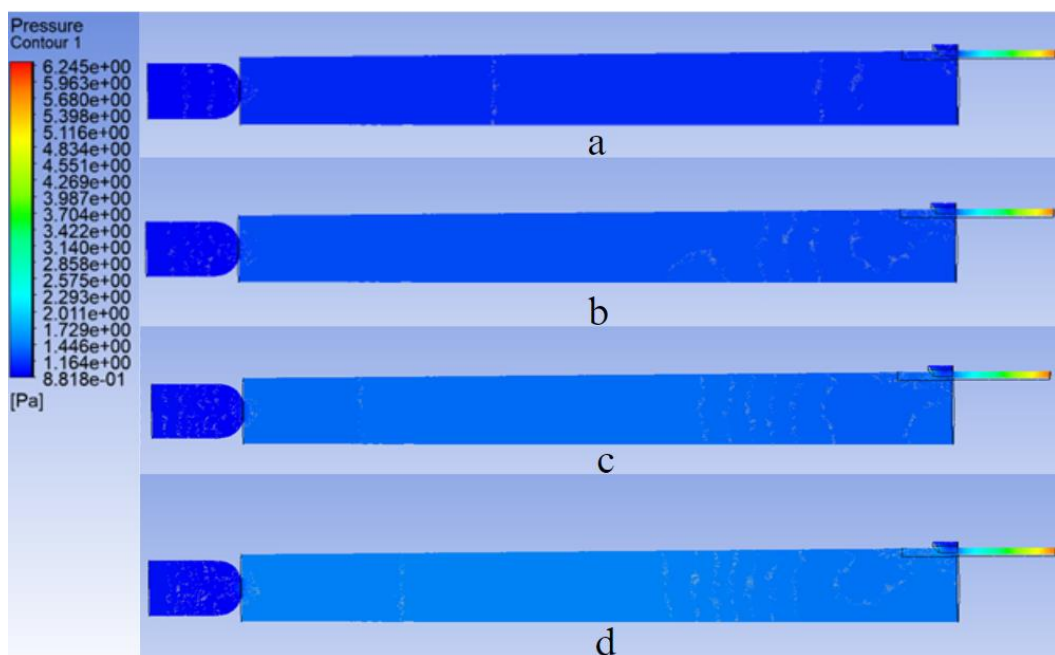
4.3.1.1 Tangga Nada Do

Hasil simulasi didapatkan berupa *Velocity*, distribusi tekanan dan *scaled residuals*. Berikut hasil *Velocity* dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 19.



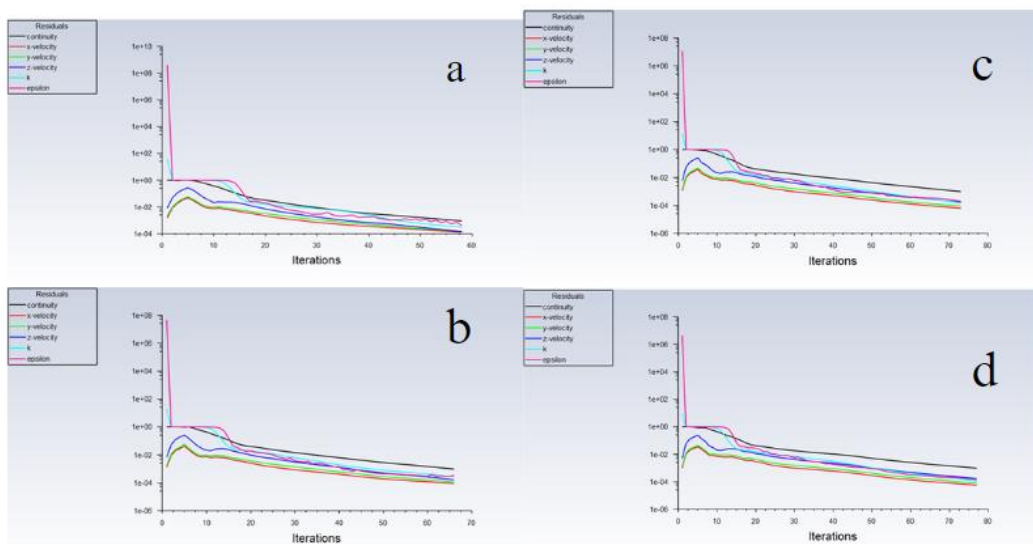
Gambar 4. 19 *Velocity* Suling Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Velocity* pada Gambar 4. 19 terdapat perbedaan pola aliran udara pada daerah output 1 pada masing-masing kecepatan udara yang dimana terdapat kecepatan udara sebesar 2.06 m/s sehingga hal tersebut mempengaruhi suara yang dihasilkan. Berikut hasil Distribusi Tekanan dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 20.



Gambar 4. 20 Distribusi Tekanan Suling Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil distribusi tekanan pada Gambar 4. 20 terdapat perbedaan distribusi tekanan pada daerah *wall* yang dimana makin tinggi kecepatan udara makin naik nilai distribusi tekanan. Berikut hasil dari *scaled residuals* variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 21.

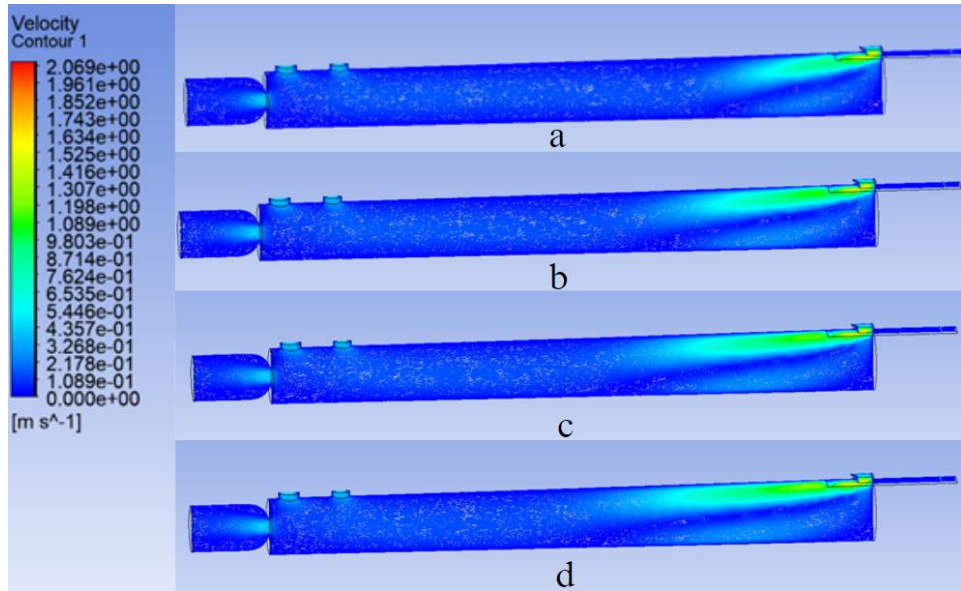


Gambar 4. 21 *Scaled Residuals* Suling nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Scaled Residuals* 4. 21 bisa dilihat bahwa rentang *iterations* untuk setiap kecepatan udara sekitar 58 hingga 77 yang dimana semakin tinggi nilai kecepatan udara maka *iterations* akan bertambah.

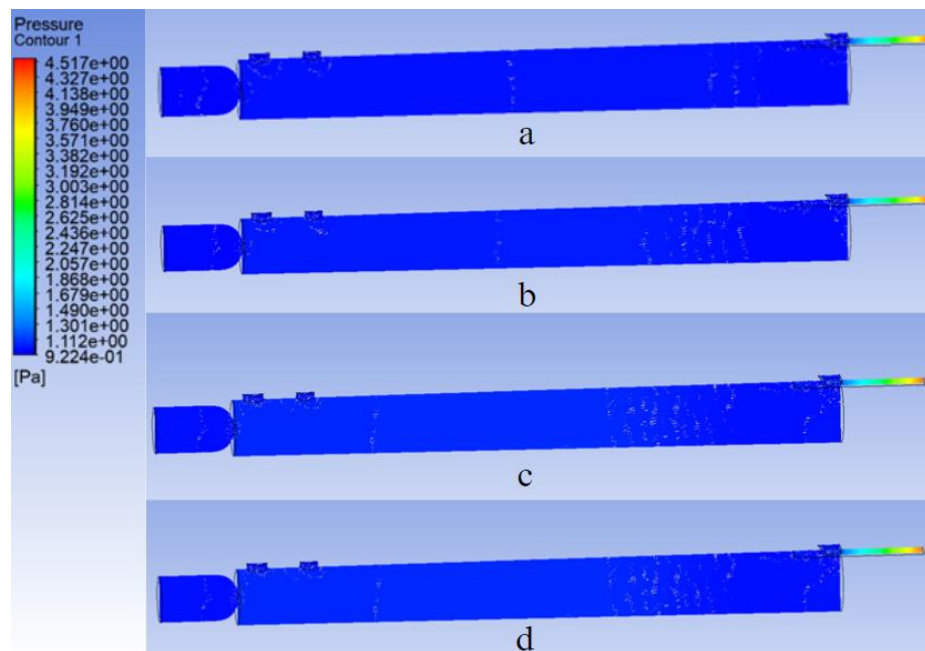
4.3.1.2 Tangga Nada Mi

Hasil simulasi dan rekaman didapatkan berupa *Velocity*, distribusi tekanan dan *scaled residuals*. Berikut hasil *Velocity* dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 22.



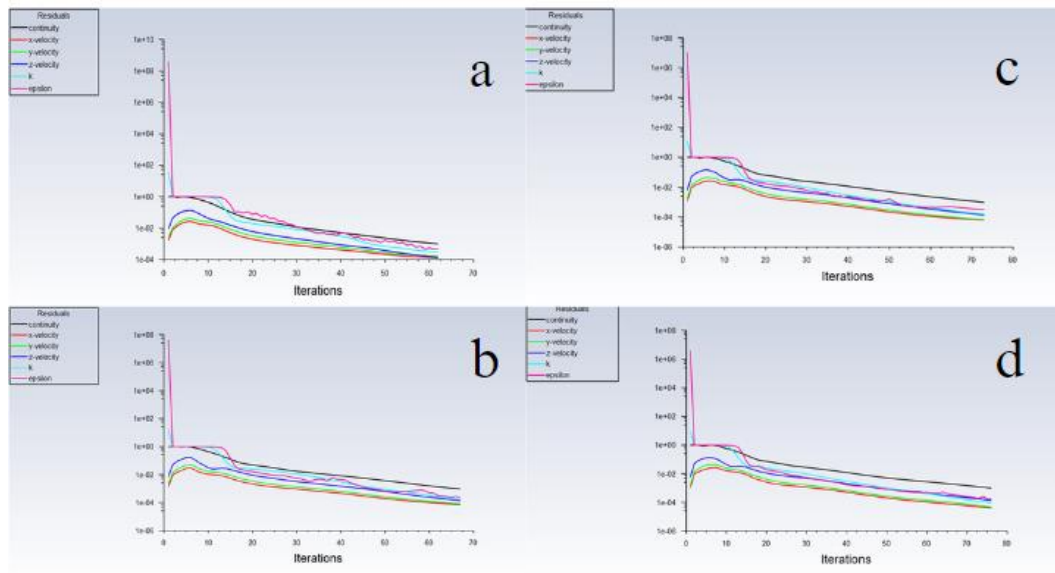
Gambar 4. 22 *Velocity* Suling Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Velocity* pada Gambar 4. 22 terdapat perbedaan pola aliran udara pada daerah output 1 pada masing-masing kecepatan udara yang dimana terdapat kecepatan udara sebesar 2.06 m/s sehingga hal tersebut mempengaruhi suara yang dihasilkan. Berikut hasil Distribusi Tekanan dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 22.



Gambar 4. 23 Distribusi Tekanan Suling Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil distribusi tekanan pada Gambar 4. 23 terdapat perbedaan distribusi tekanan pada daerah *wall* yang dimana makin tinggi kecepatan udara makin naik nilai distribusi tekanan. Berikut hasil dari *scaled residuals* variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 24.

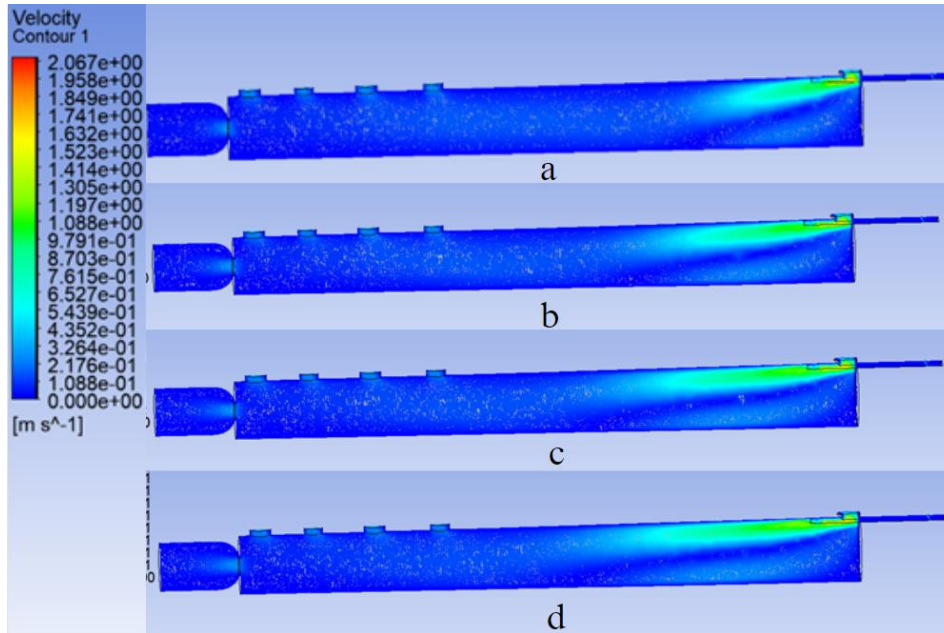


Gambar 4. 24 Scaled Residuals Suling nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Scaled Residuals* 4. 24 bisa dilihat bahwa rentang *iterations* untuk setiap kecepatan udara sekitar 51 hingga 76 yang dimana semakin tinggi nilai kecepatan udara maka *iterations* akan bertambah.

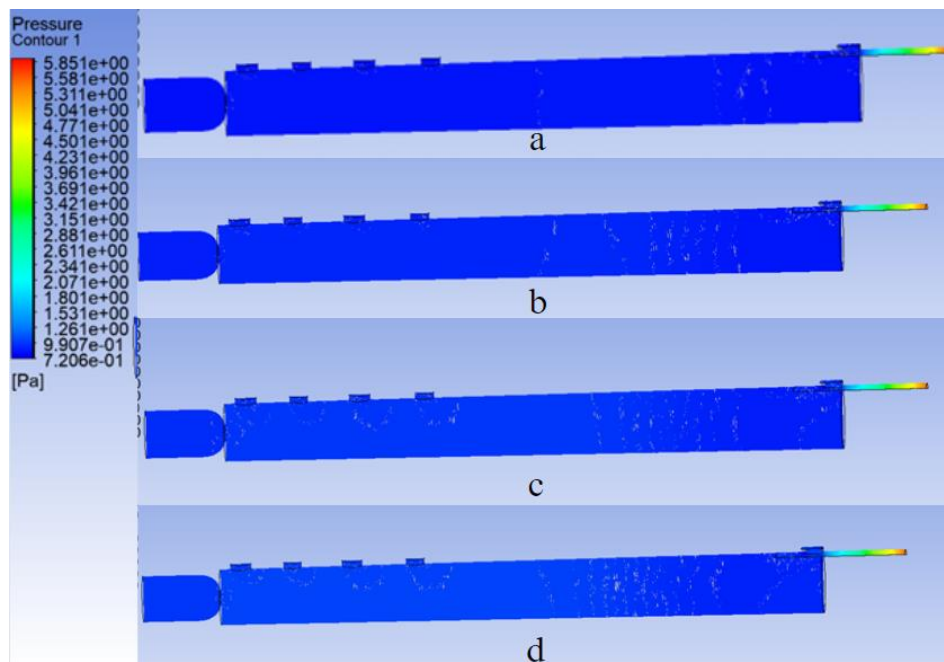
4.3.1.3 Tangga Nada Sol

Hasil simulasi dan rekaman didapatkan berupa *Velocity*, distribusi tekanan dan *scaled residuals*. Berikut hasil dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Sol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 25.



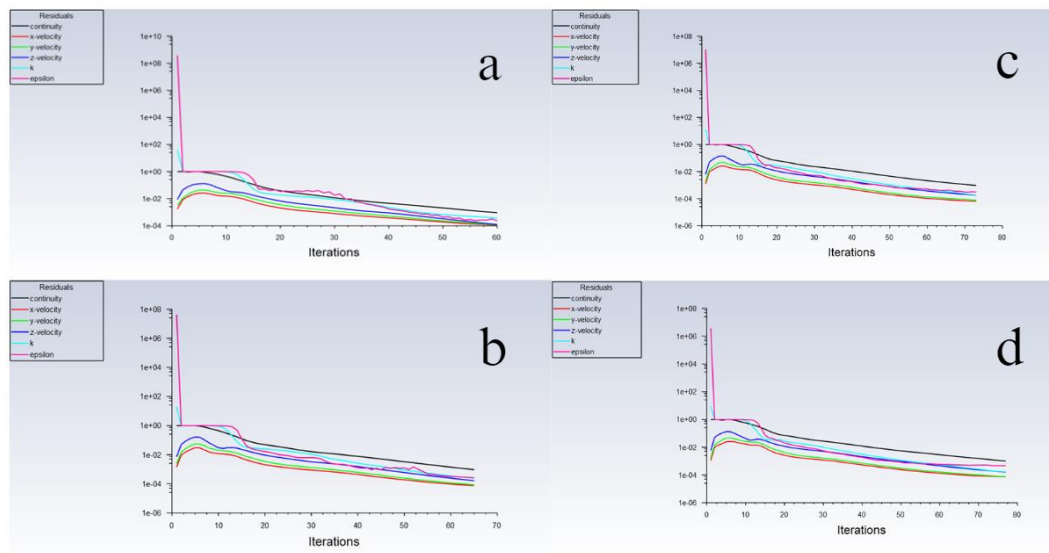
Gambar 4. 25 *Velocity* Suling Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Velocity* pada Gambar 4. 25 terdapat perbedaan pola aliran udara pada daerah output 1 pada masing-masing kecepatan udara yang dimana terdapat kecepatan udara sebesar 2.06 m/s sehingga hal tersebut mempengaruhi suara yang dihasilkan. Berikut hasil Distribusi Tekanan dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Sol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 26.



Gambar 4. 26 Distribusi Tekanan Suling Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil distribusi tekanan pada Gambar 4. 26 terdapat perbedaan distribusi tekanan pada daerah *wall* yang dimana makin tinggi kecepatan udara makin naik nilai distribusi tekanan. Berikut hasil dari *scaled residuals* variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Sol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 27.



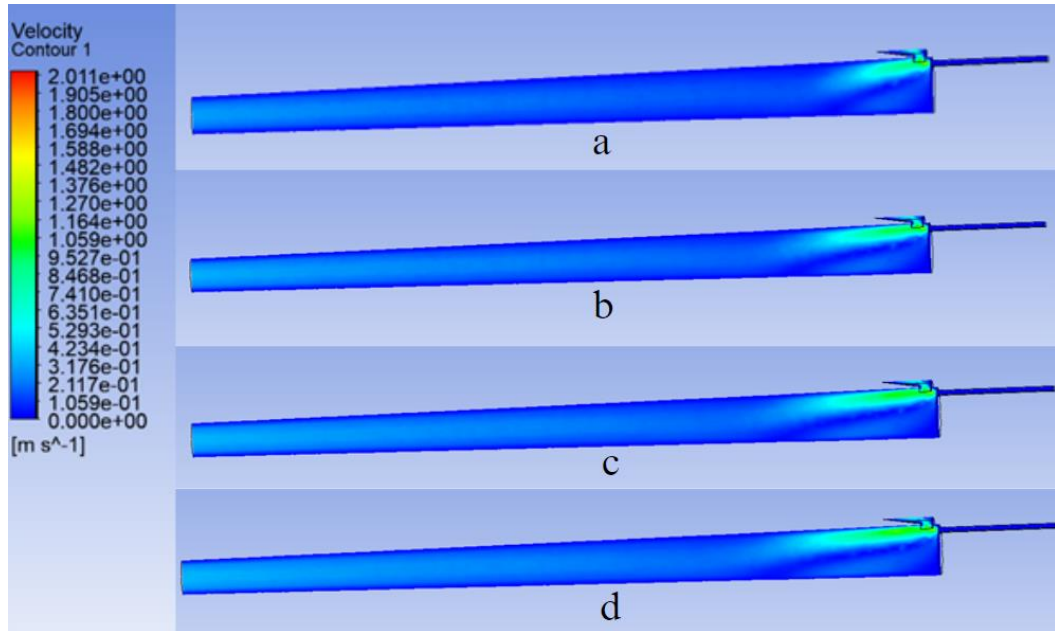
Gambar 4. 27 *Scaled Residuals* Suling nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Scaled Residuals* 4. 27 bisa dilihat bahwa rentang *iterations* untuk setiap kecepatan udara sekitar 60 hingga 78 yang dimana semakin tinggi nilai kecepatan udara maka *iterations* akan bertambah.

4.3.2 Alat Musik Rekorder

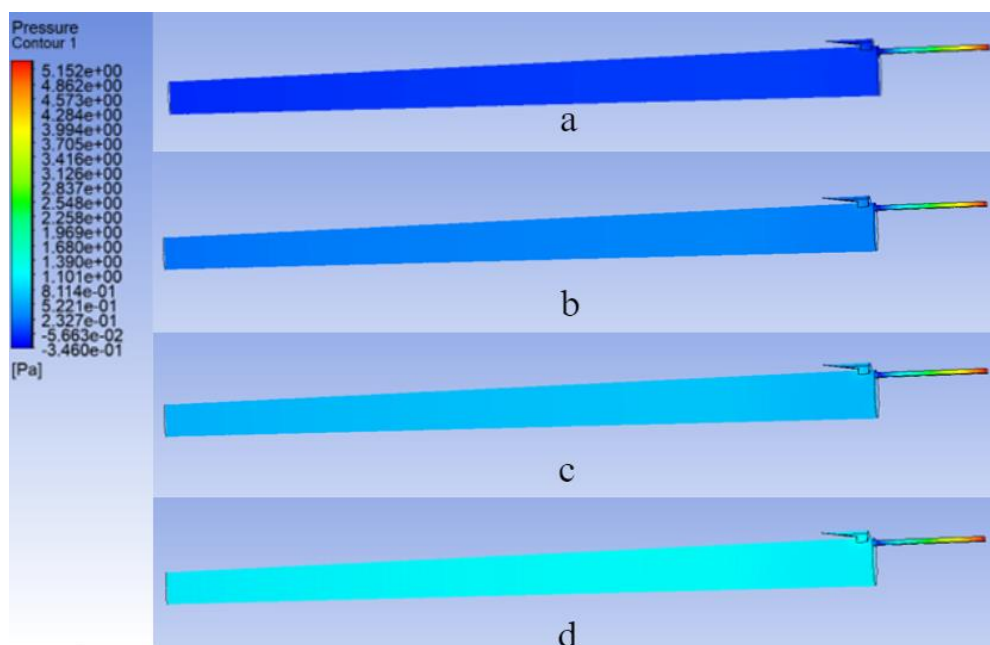
4.3.2.1 Tangga Nada Do

Hasil simulasi dan rekaman didapatkan berupa *Velocity*, distribusi tekanan dan *scaled residuals*. Berikut hasil dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 28.



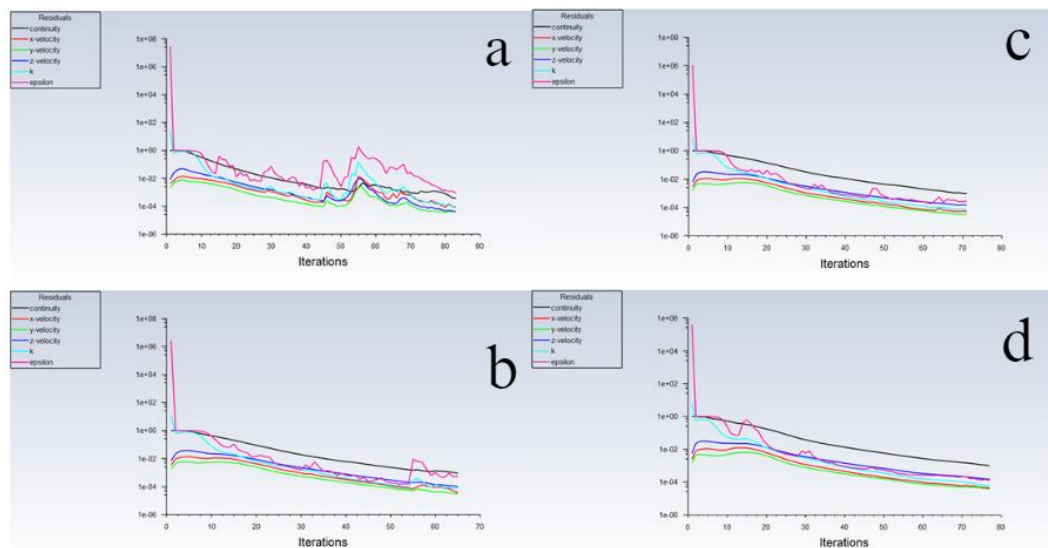
Gambar 4. 28 *Velocity* Rekorder Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Velocity* pada Gambar 4. 28 terdapat perbedaan pola aliran udara pada daerah output 1 pada masing-masing kecepatan udara yang dimana terdapat kecepatan udara sebesar 2.01 m/s sehingga hal tersebut mempengaruhi suara yang dihasilkan. Berikut hasil Distribusi Tekanan dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Do seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 29.



Gambar 4. 29 Distribusi Tekanan Rekorder Tangga nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil distribusi tekanan pada Gambar 4. 29 terdapat perbedaan distribusi tekanan pada daerah *wall* yang dimana makin tinggi kecepatan udara makin naik nilai distribusi tekanan. Berikut hasil dari *scaled residuals* variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 30.

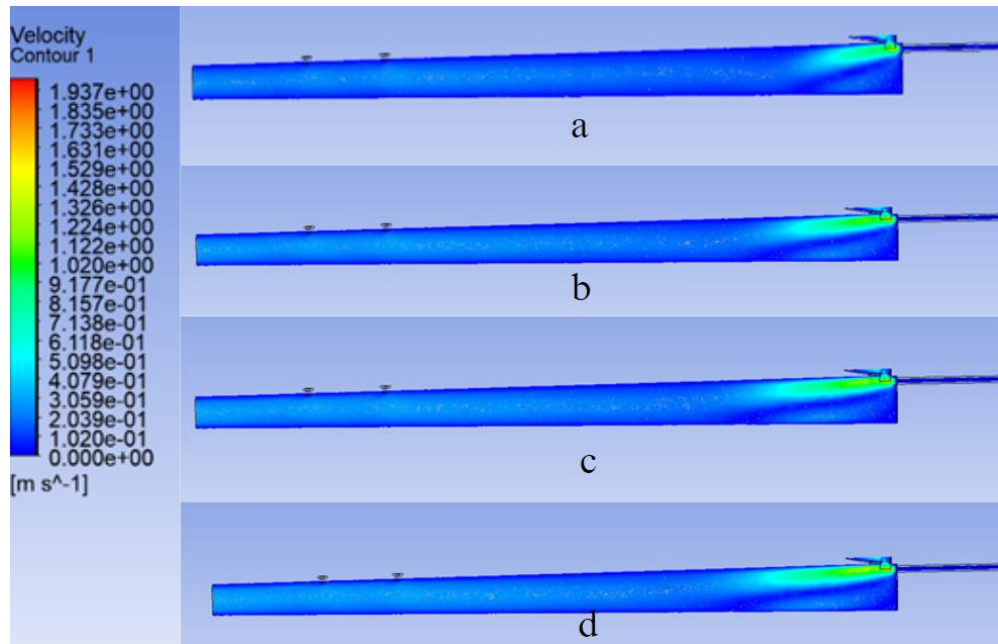


Gambar 4. 30 *Scaled Residuals* Rekorder nada Do : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Scaled Residuals* 4. 30 bisa dilihat bahwa rentang *iterations* untuk setiap kecepatan udara sekitar 61 hingga 79 yang dimana semakin tinggi nilai kecepatan udara maka *iterations* akan bertambah.

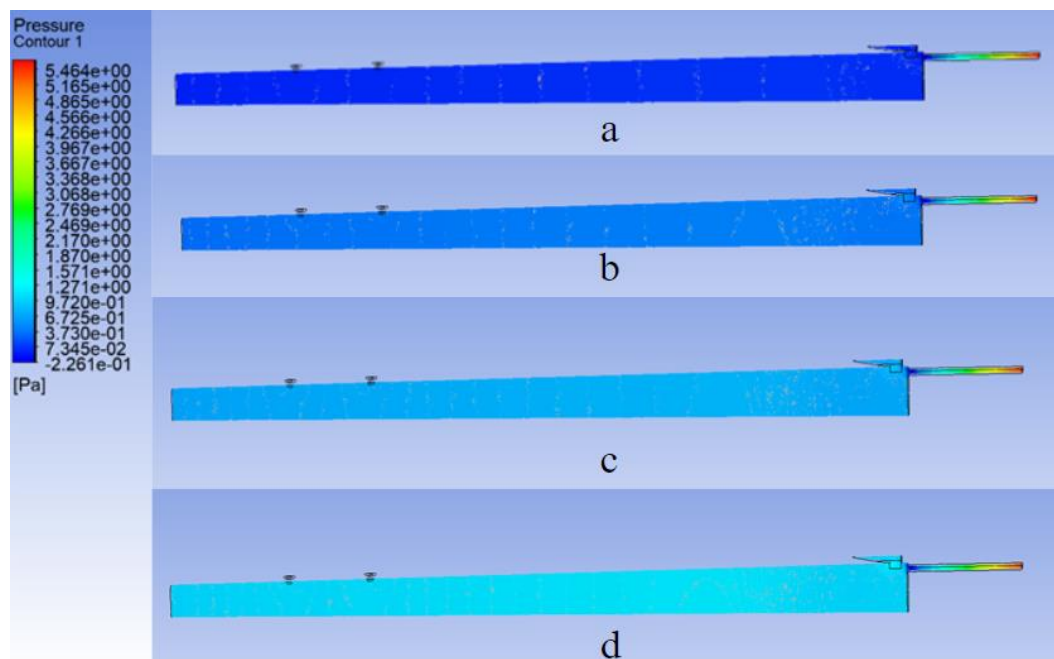
4.3.2.2 Tangga Nada Mi

Hasil simulasi dan rekaman didapatkan berupa *Velocity*, distribusi tekanan dan *scaled residuals*. Berikut hasil dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 31.



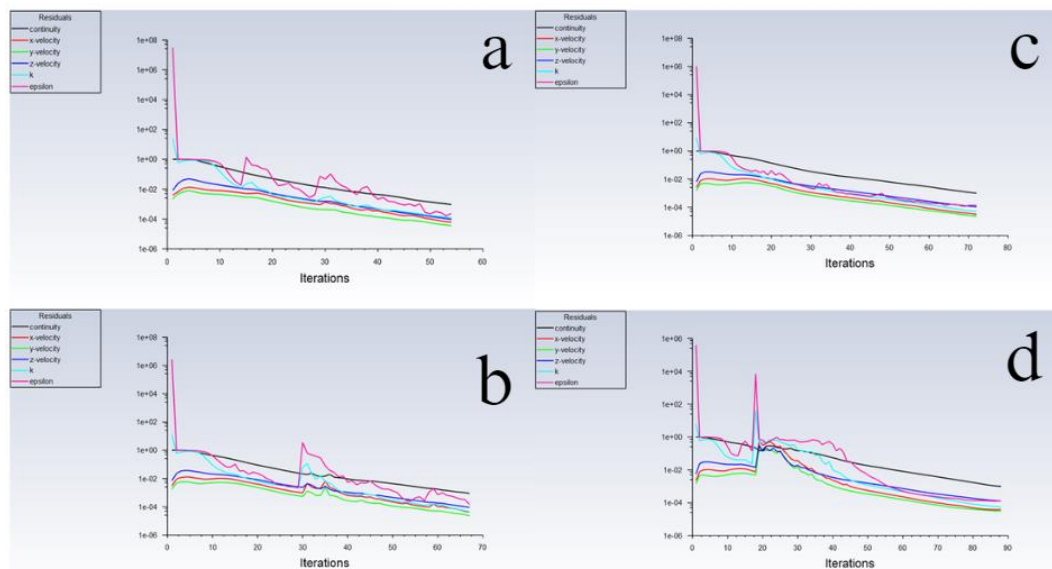
Gambar 4. 31 *Velocity* Rekorder Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Velocity* pada Gambar 4. 31 terdapat perbedaan pola aliran udara pada daerah output 1 pada masing-masing kecepatan udara yang dimana terdapat kecepatan udara sebesar 1.93 m/s sehingga hal tersebut mempengaruhi suara yang dihasilkan. Berikut hasil Distribusi Tekanan dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 32.



Gambar 4. 32 Distribusi Tekanan Rekorder Tangga nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil distribusi tekanan pada Gambar 4. 32 terdapat perbedaan distribusi tekanan pada daerah *wall* yang dimana makin tinggi kecepatan udara makin naik nilai distribusi tekanan. Berikut hasil dari *scaled residuals* variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 33.

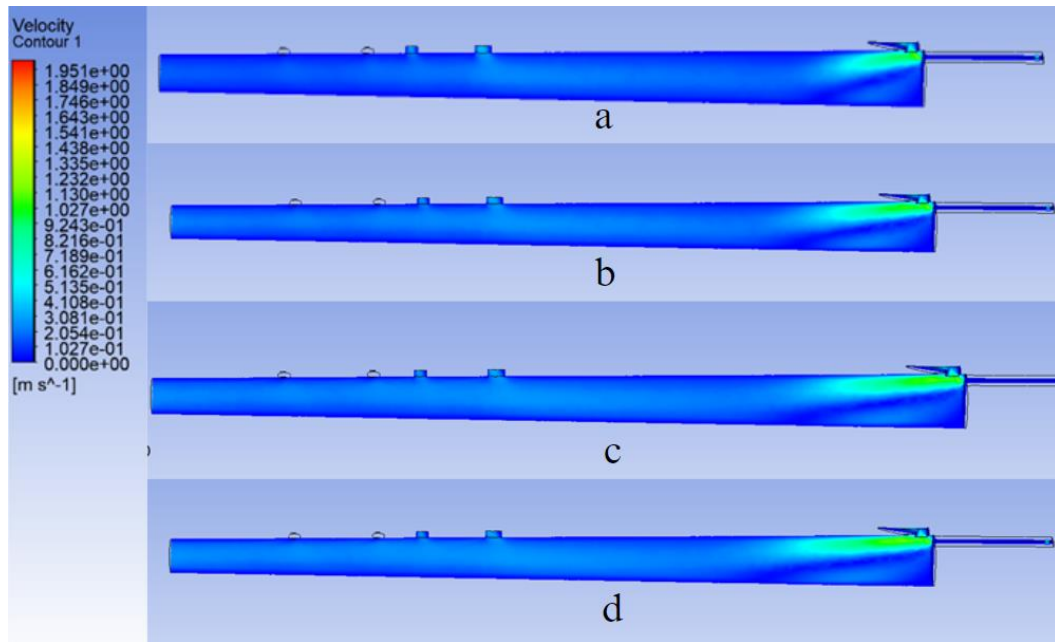


Gambar 4. 33 *Scaled Residuals* Rekorder nada Mi : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Scaled Residuals* 4. 33 bisa dilihat bahwa rentang *iterations* untuk setiap kecepatan udara sekitar 53 hingga 89 yang dimana semakin tinggi nilai kecepatan udara maka *iterations* akan bertambah.

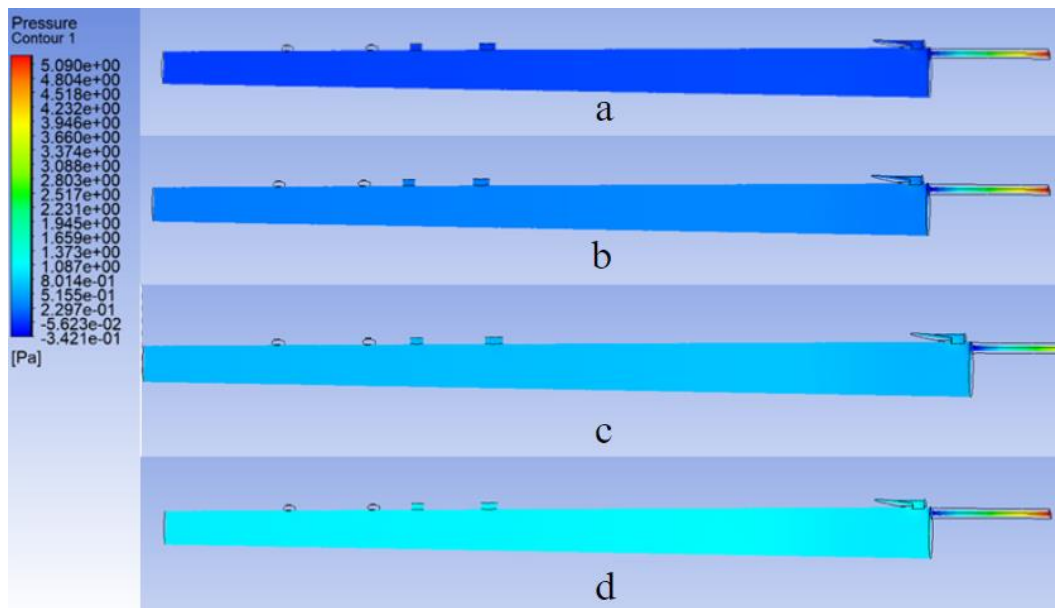
4.3.2.3 Tangga Nada Sol

Hasil simulasi dan rekaman didapatkan berupa *Velocity*, distribusi tekanan dan *scaled residuals*. Berikut hasil dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Sol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 34.



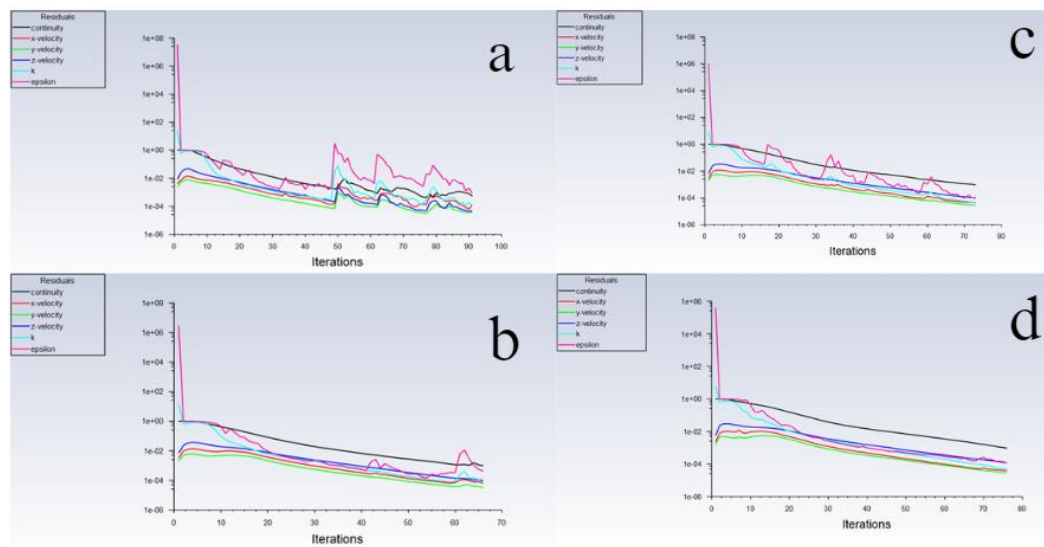
Gambar 4. 34 *Velocity* Rekorder Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil *Velocity* pada Gambar 4. 34 terdapat perbedaan pola aliran udara pada daerah output 1 pada masing-masing kecepatan udara yang dimana terdapat kecepatan udara sebesar 1.95 m/s sehingga hal tersebut mempengaruhi suara yang dihasilkan. Berikut hasil Distribusi Tekanan dari variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 35.



Gambar 4. 35 Distribusi Tekanan Rekorder Tangga nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

Dari hasil distribusi tekanan pada Gambar 4. 35 terdapat perbedaan distribusi tekanan pada daerah *wall* yang dimana makin tinggi kecepatan udara makin naik nilai distribusi tekanan. Berikut hasil dari *scaled residuals* variasi kecepatan 0.50 m/s, 1 m/s, 1.50, 2 m/s untuk tangga nada Mi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 36.



Gambar 4. 36 *Scaled Residuals* Rekorder nada Sol : a. Kecepatan 0.50 m/s. b. Kecepatan 1 m/s. c. Kecepatan 1.50 m/s. d. Kecepatan 2 m/s

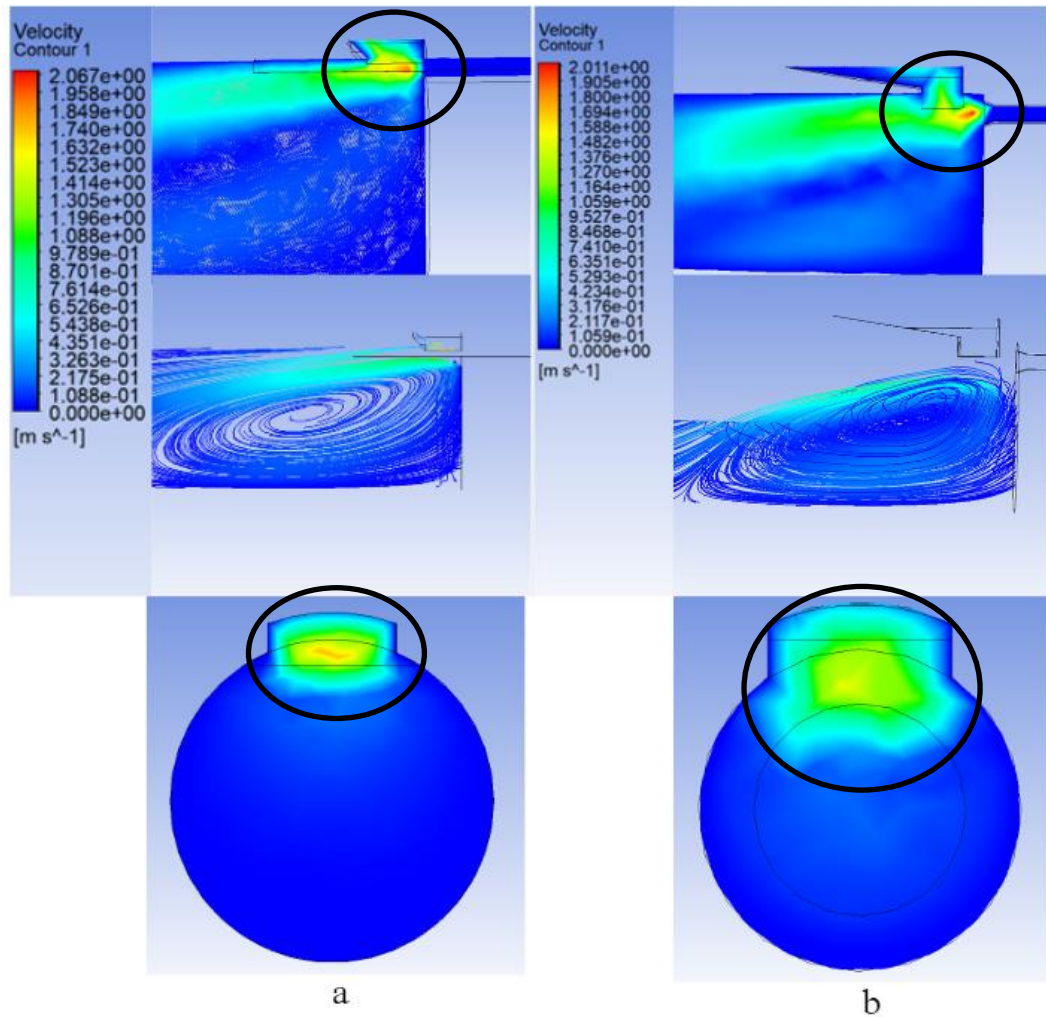
Dari hasil *Scaled Residuals* 4. 36 bisa dilihat bahwa rentang *iterations* untuk setiap kecepatan udara sekitar 65 hingga 90.

4.4 Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi dan data yang ada dapat di lihat pada alat musik suling pada tangga nada Do terdapat kecepatan aliran sebesar 2.06 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 2 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 984.33 Hz dan amplitudo 0.0017, untuk kecepatan aliran terkecil 0.51 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 0.50 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 2336.38 Hz dan amplitudo 0.0686. Pada tangga nada Mi terdapat kecepatan aliran sebesar 2.06 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 2 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar

1221.68 Hz dan amplitudo 0.0499, untuk kecepatan aliran terkecil 0.51 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 0.50 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 748.71 Hz dan amplitudo 0.0499. Pada tangga nada Sol terdapat kecepatan aliran sebesar 2.06 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 2 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 2492.76 Hz dan amplitudo 0.0492, untuk kecepatan aliran terkecil 0.52 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 0.50 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 728.37 Hz dan amplitudo 0.0485. Sedangkan alat musik rekorder memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan suling karena bentuk geometri dan material yang berbeda. pada tangga nada Do untuk alat musik rekorder terdapat kecepatan aliran sebesar 2.01 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 2 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 2401.59 Hz dan amplitudo 0.0576, untuk kecepatan aliran terkecil 0.49 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 0.50 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 1157.51 Hz dan amplitudo 0.0528. Pada tangga nada Mi terdapat kecepatan aliran sebesar 1.93 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 2 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 3979.26 Hz dan amplitudo 0.0412, untuk kecepatan aliran terkecil 0.46 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 0.50 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 1421.03 Hz dan amplitudo 0.0449. Pada tangga nada Sol terdapat kecepatan aliran sebesar 1.95 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 2 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 2623.15 Hz dan amplitudo 0.0439, untuk kecepatan aliran terkecil 0.47 m/s dengan kecepatan udara yang masuk sebesar 0.50 m/s yang dimana menghasilkan frekuensi sebesar 843.2 Hz dan amplitudo 0.0717.

Jika dibandingkan dengan *International Standard Organization* (ISO) frekuensi untuk tangga nada Do sebesar 523.25 Hz yang dimana hal ini memiliki perbedaan frekuensi pada masing-masing alat musik untuk tangga nada Do dikarenakan beberapa faktor seperti material yang digunakan, bentuk geometri dari alat musik dan standar yang digunakan berbeda. Berikut merupakan perbedaan pola aliran udara pada area output 1 dari masing-masing alat musik.



Gambar 4. 37 Perbedaan Pola udara pada *Ouput 1* : a. Suling. b. Rekorder

Pada Gambar 4. 37 terdapat perbedaan bentuk pola untuk udara pada gambar a dan b, pada gambar a yaitu pada alat musik suling terdapat pola aliran udara di sekitar outlet 1 tampak lebih merata dan tersebar, dengan sedikit vorteks yang terbentuk dibandingkan dengan dengan gambar b atau alat musik rekorder pola aliran udara menunjukkan adanya pembelokan udara yang lebih kuat dengan kecepatan yang lebih tinggi di sekitar outlet 1. Pola vorteks (pusaran) yang terbentuk di bagian bawah lebih terorganisir dibandingkan pada gambar a. Sehingga hal tersebut mempengaruhi suara pada alat musik rekorder menghasilkan frekuensi lebih tinggi di bandingkan alat musik suling. Selain itu material rekorder yaitu *acrylonitrile butadiene styrene* dapat menghasilkn suara dengan frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan alat musik suling

dengan material kayu karena ABS merupakan bahan yang lebih keras dan kaku, memungkinkan getaran udara bergerak lebih cepat di dalam alat musik, sehingga menghasilkan frekuensi yang lebih tinggi. Berbeda dengan kayu yang memiliki serat alami dan porositas yang menyerap energi getaran, ABS bersifat padat dan tidak menyerap banyak energi, memungkinkan pantulan getaran lebih efisien.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Pola aliran udara di dalam alat musik tiup memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik suara yang dihasilkan. Pada suling, aliran udara di sekitar outlet 1 lebih merata dengan sedikit vorteks. Sementara pada rekorder, udara mengalami pembelokan yang lebih kuat dan cepat di sekitar outlet 1, dengan vorteks yang lebih terorganisir di bagian bawah. Hal ini membuat rekorder menghasilkan frekuensi suara yang lebih tinggi dibandingkan suling.
2. Parameter-parameter seperti kecepatan aliran udara, material, dan geometri alat musik tiup memengaruhi produksi suara yang dihasilkan. Kecepatan aliran udara yang lebih tinggi menghasilkan frekuensi yang lebih besar. Selain itu, geometri dan material alat musik juga berperan penting, di mana rekorder yang terbuat dari ABS menghasilkan frekuensi lebih tinggi dibandingkan suling yang terbuat dari kayu. Hal ini karena ABS yang lebih keras dan kaku memungkinkan getaran udara bergerak lebih cepat dan efisien, sementara kayu dengan serat alami cenderung menyerap lebih banyak energi getaran. Geometri alat musik juga memengaruhi pola aliran udara, sehingga turut memengaruhi frekuensi dan amplitudo suara. Secara keseluruhan, ketiga faktor ini sangat berperan dalam menentukan karakteristik suara dari alat musik tiup.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

Pada penelitian ini masih terdapat beberapa saran supaya dapat menjadi lebih baik. Adapun beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian menggunakan alat musik tiup yang lain dikarenakan indonesia merupakan negara yang memiliki alat musik tiup yang bervariasi

2. Menambahkan tangga nada sehingga dapat diketahui masing frekuensi dari setiap tangga nada.

DAFTAR PUSTAKA

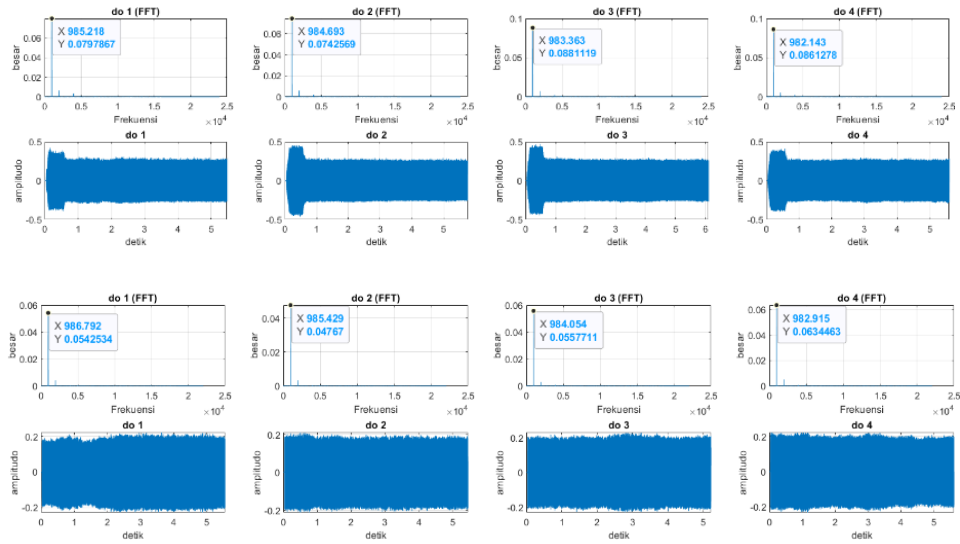
- Abdullah, Mikrajuddin. 2016. FISIKA DASAR I. Kampus Ganesa Institut Teknologi Bandung. Maret 2016.
- Anderson, J. D. (2007). *Fundamentals of Aerodynamics* (4th ed.). McGraw–Hill.
- ANSYS. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide* (15.0). ANSYS, Inc.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011a). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (L. Ratts, Ed.; 7th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- Celik, H. K., Bedel, A., Gok, S., & Rennie, A. E. W. (2021). CFD Simulation of Air Flow Behaviour at Different Flow Rates in a Turkish Woodwind Instrument (Turkish Treble Recorder). *Open Journal of Acoustics*, 11, 1-16. <https://doi.org/10.4236/oja.2021.111001>
- Deassy Siska. 2015. Analisa Kebisingan dan Studi Akustik dalam Tatanan Bangunan. *Jurnal Arsitekno*, Vol. 6, No. 6, hlm. 33 – 38, Juli 2015
- Dewi Handayani Untari Ningsih. 2005. *Dewi Handayani Untari Ningsih*. *Jurnal Teknologi Informasi DINAMIK* Volume X, No. 3, September 2005 :143-149.
- Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Belahcen, A., & Vaimann, T. (2019). Determination of Heat Transfer Coefficient for the Air Forced Cooling Over a Flat Side of Coil. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 15(1), 15–20. <https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0003>
- Halme, Arthur .1991. *Space Finish Interior*, Finlandia.
- Handayani, M. U., Dalimunthe, Z., Indah, R. S., & Rajagukguk, J. (2016). Penentuan Aliran Fluida Dengan Menggunakan Persamaan Navier-Stokes 76 dan Bantuan Persamaan Diferensial. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Dan Teknologi Informasi*, 1753–1757.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical Computational of Internal and External Flows : The Fundamental of Computational Fluid Dynamics*. In Elsevier.

- Jalaluddin, J., Akmal, S., Nasrul, Z. A., & Ishak, I. (2019). Analisa Profil Aliran Fluida Cair dan Pressure Drop pada Pipa L menggunakan Metode Simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 8(1), 97-108.
- John M. Echols dan Hassan Shadily.1987. Kamus Inggris Indonesia.Gramedia, Jakarta.
- Nasukha Z, N. Z. (2020). Modul pembelajaran SMA fisika Kelas X: Getaran Harmonis.
- National Physical Laboratory. (2018). *Calculation of Speed of Sound*. <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/speedair/>
- Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). *Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review*. Dalam *Bioresource Technology* (Vol. 98, Nomor 12, hlm. 2386–2414). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. Dalam *Bioresource Technology* (Vol. 98, Nomor 12, hlm. 2386–2414). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Pulsatile Blood Flow in Arterial Bifurcation Simulation, ANSYS Fluent Training*. (2024). Retrieved 13 January 2023, from <https://www.mrcfd.com/shop/pulsatile-blood-flow-in-arterial-bifurcation-cfd-simulation/>
- Ramnath, S., Haghghi, P., Venkiteswaran, A., & Shah, J. J. (2020). *Interoperability of CAD geometry and product manufacturing information for computer integrated manufacturing*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(2), 116–132. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1718760>
- Roychowdhury, D. G. (2020). *Computational Fluid Dynamics For Incompressible Flows (First)*. CRS Press

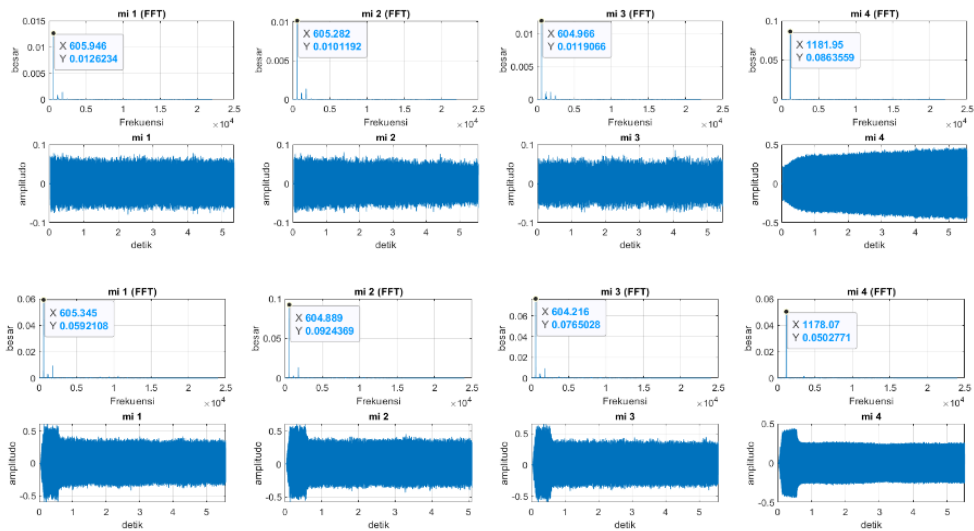
- Salama, A. (2021). Velocity profile representation for fully developed turbulent flows in pipes: A modified power law. *Fluids*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/fluids6100369>
- Supriyono, T. (2019). *Mekanika Fluida Dasar* (1st ed.). Universitas Pasundan Bandung.
- Wange, S. M., & Metkar, R. M. (2013). *Computational analysis of inverted notched fin arrays dissipating heat by natural convection. International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(11), 245-249.
- Welty, J., Wicks, C. E., Rorrer, G. L., & Wilson, R. E. (2007). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (Fifth). John Wiley & Sons, Inc.
- White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow* (3rd ed.). McGraw-Hill.

LAMPIRAN

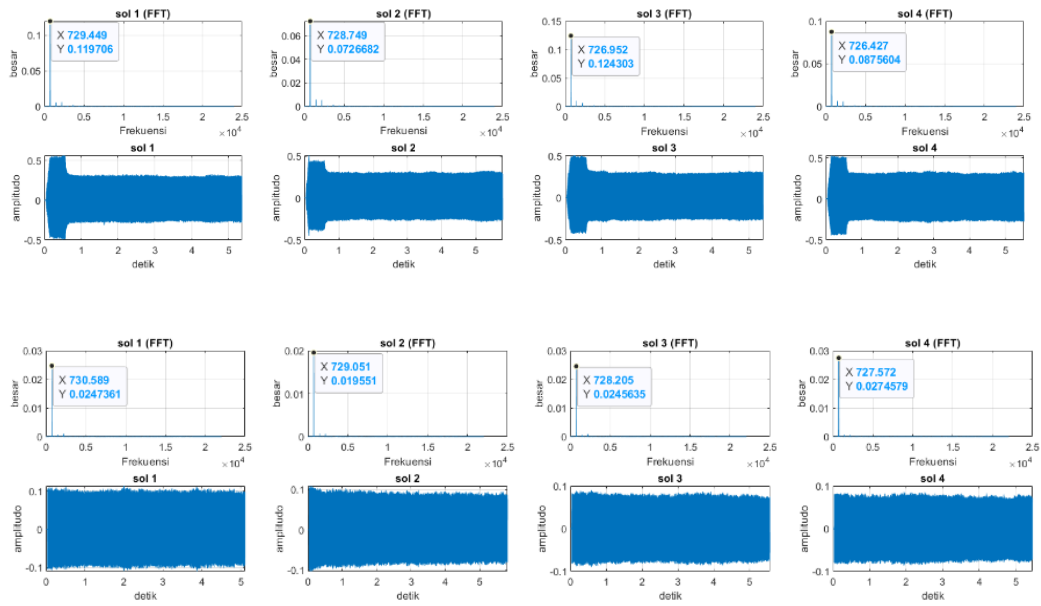
Grafik *Discrete Fourier (DFT)* dan *Discrete Fourier transform Fast Fourier Transform (FFT)* untuk masing-masing tangga nada dan perbedaan kecepatana udara



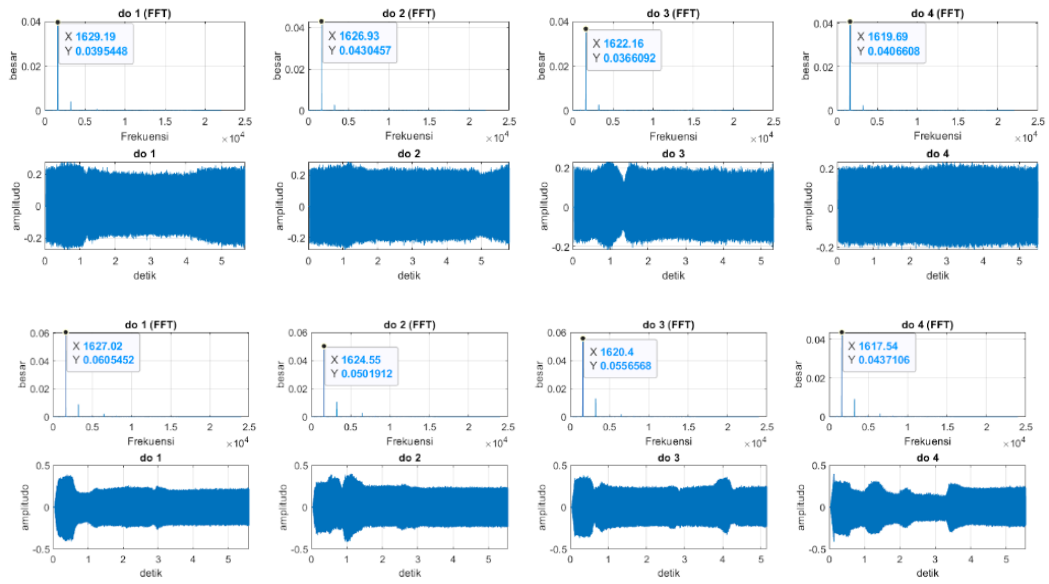
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Do Dengan Kecepatan 0.50 m/s



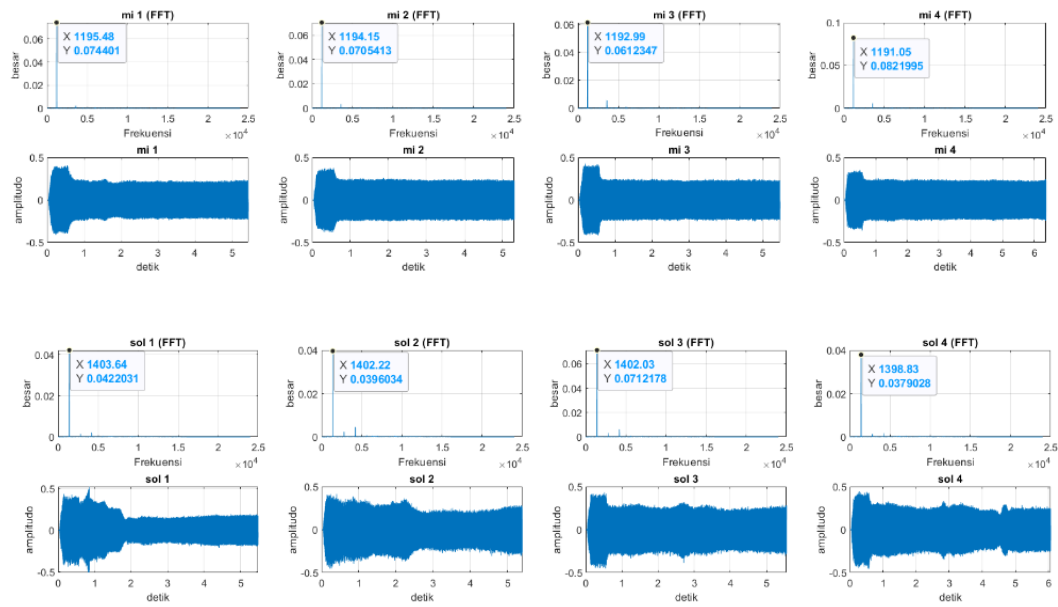
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan 0.50 m/s



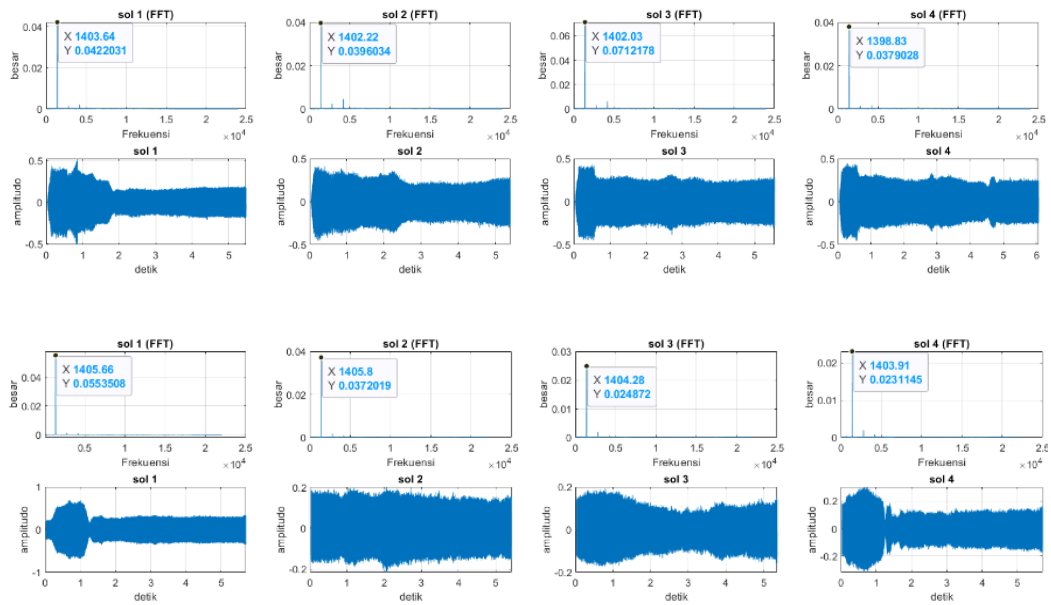
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan **0.50 m/s**



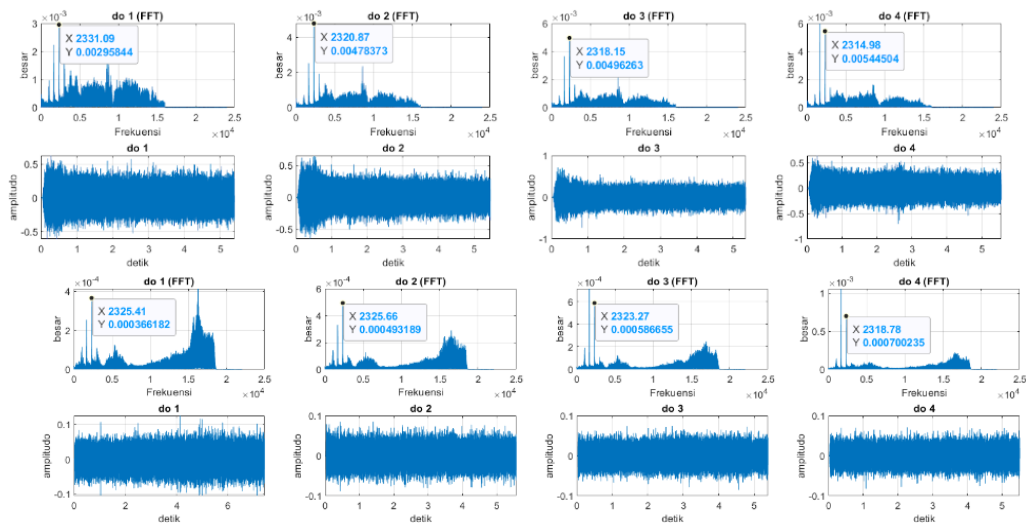
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Do Dengan Kecepatan **1 m/s**



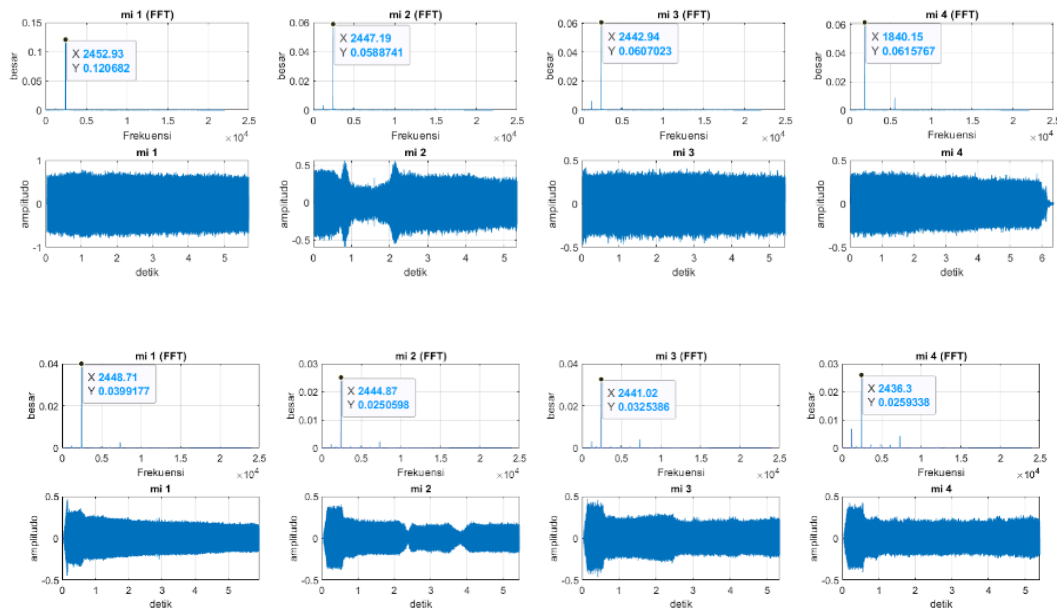
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan 1 m/s



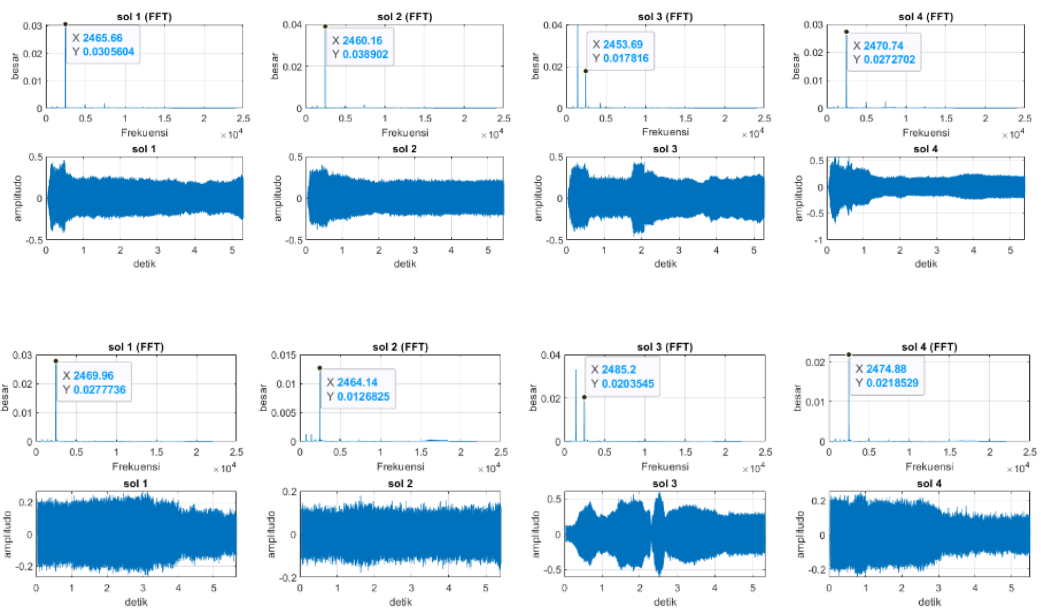
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan 1 m/s



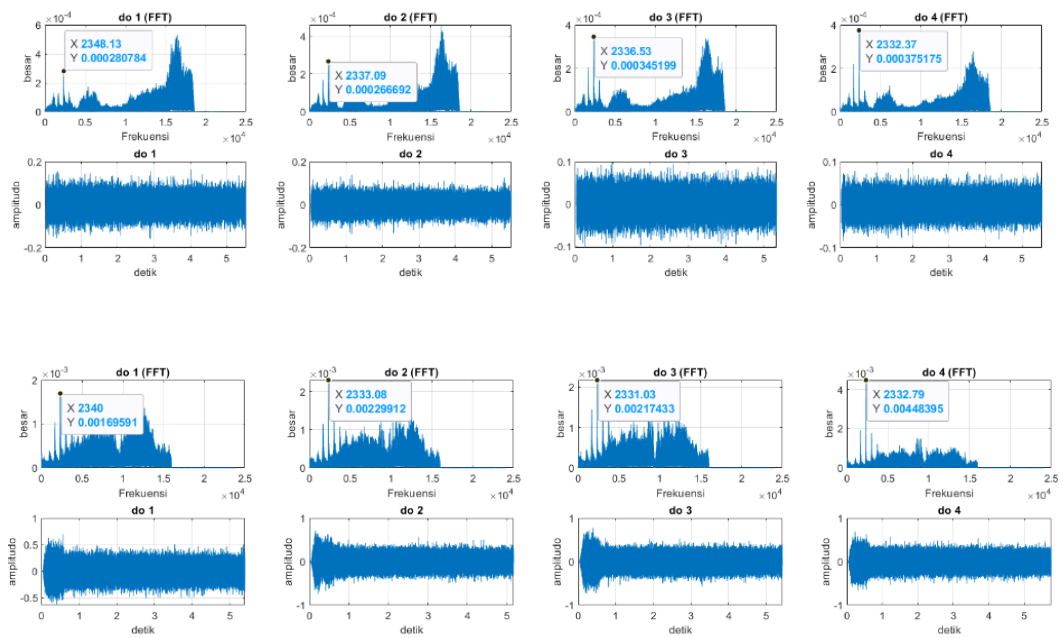
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Do Dengan Kecepatan **1.50 m/s**



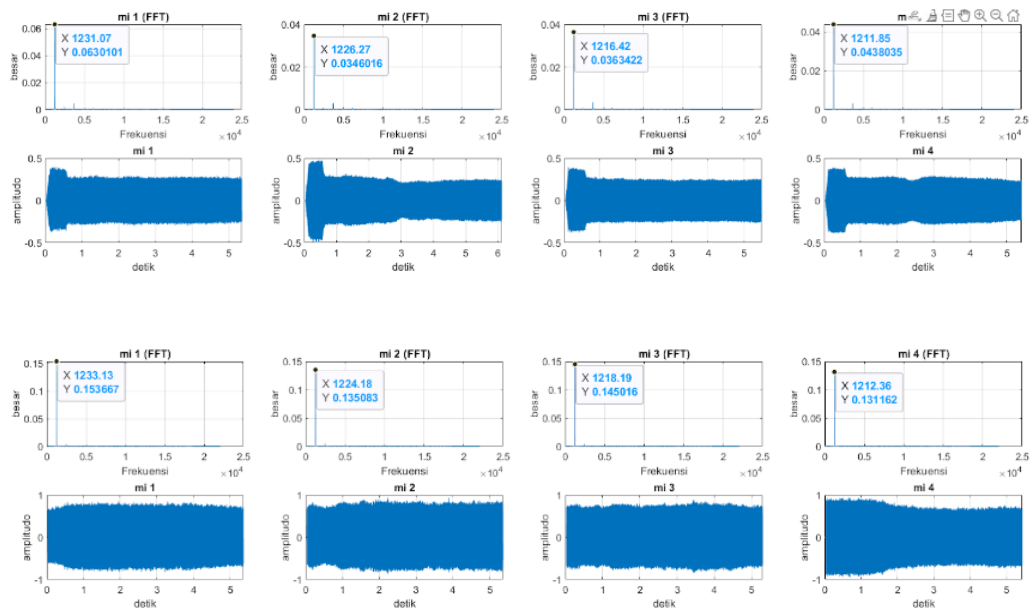
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan **1.50 m/s**



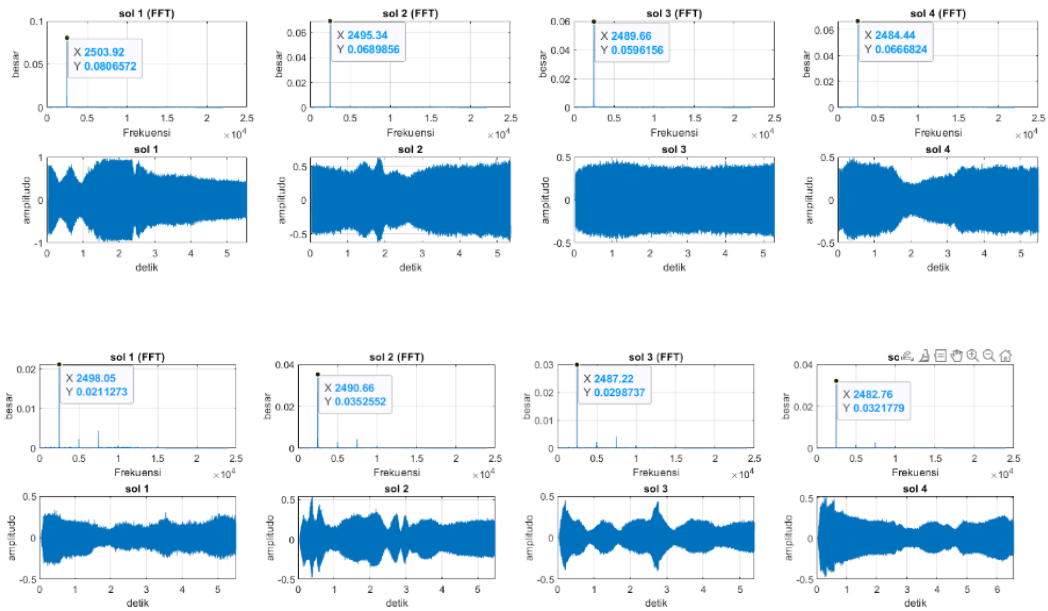
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan 1.50 m/s



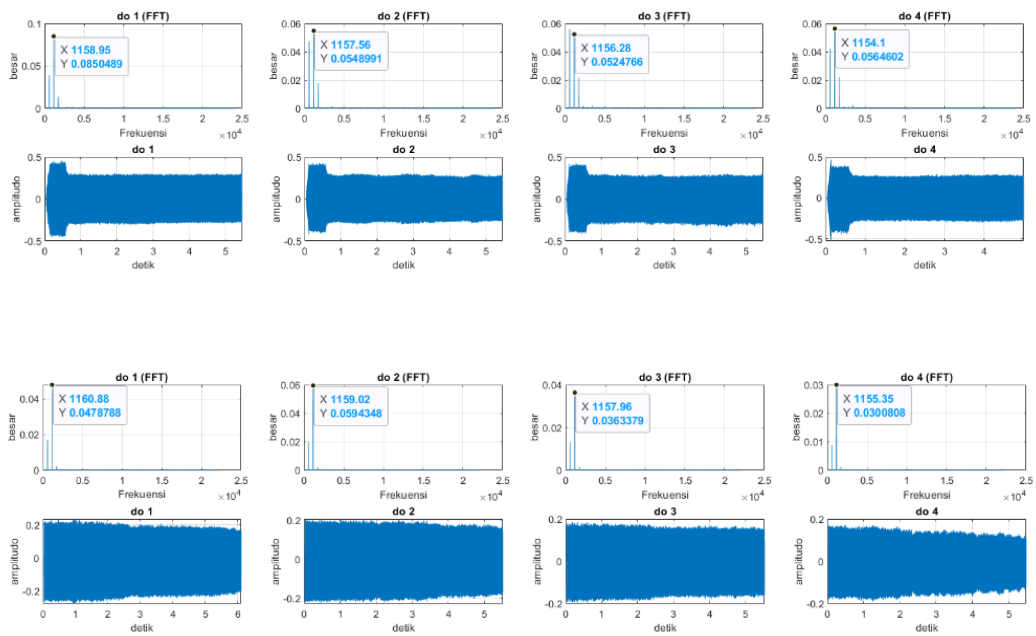
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Do Dengan Kecepatan 2 m/s



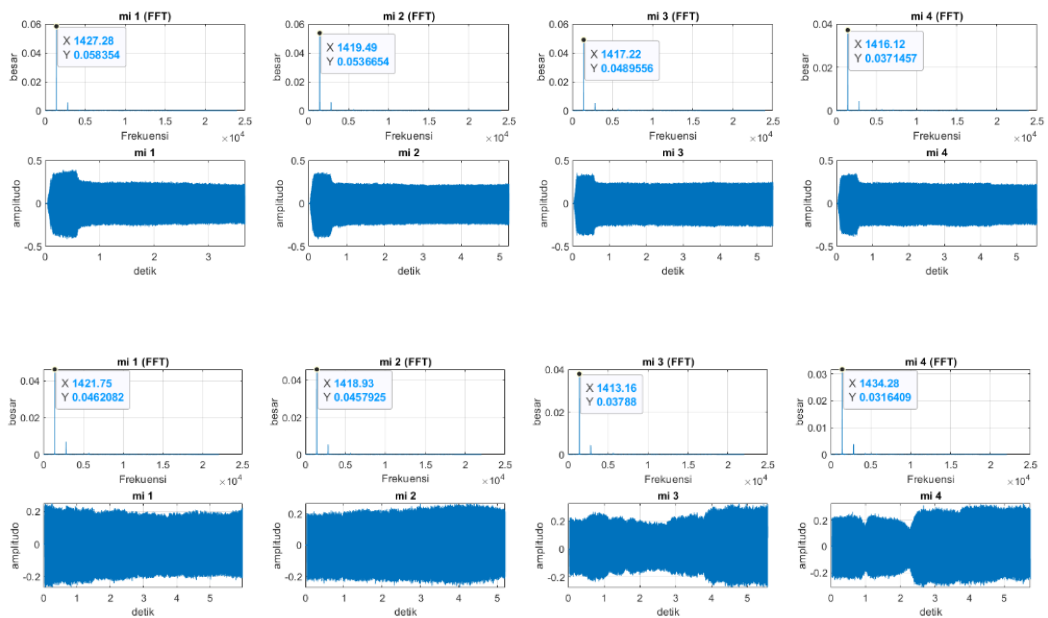
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan 2 m/s



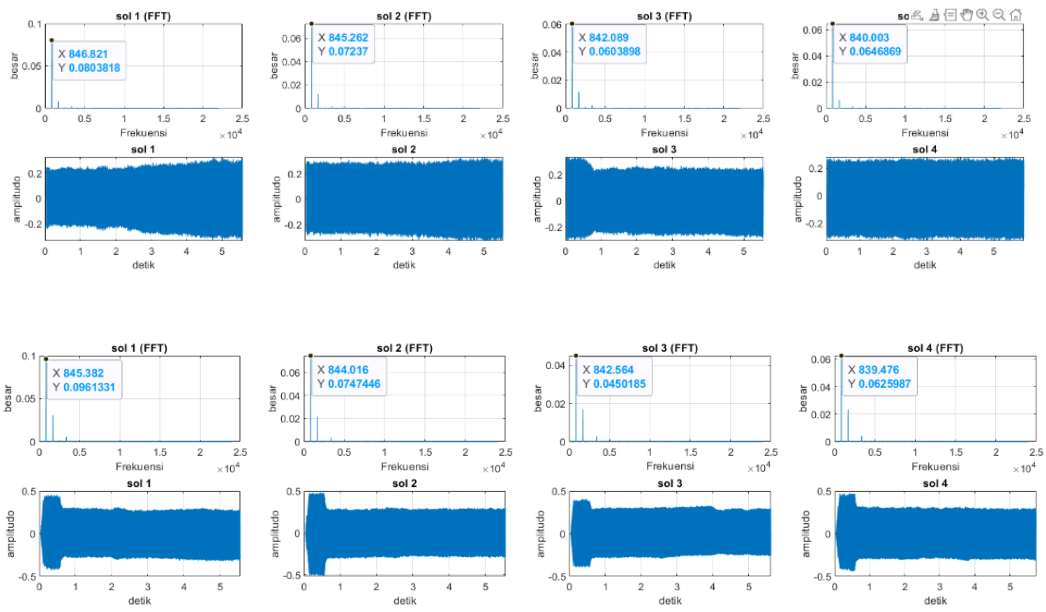
Hasil Rekaman Suling Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan 2 m/s



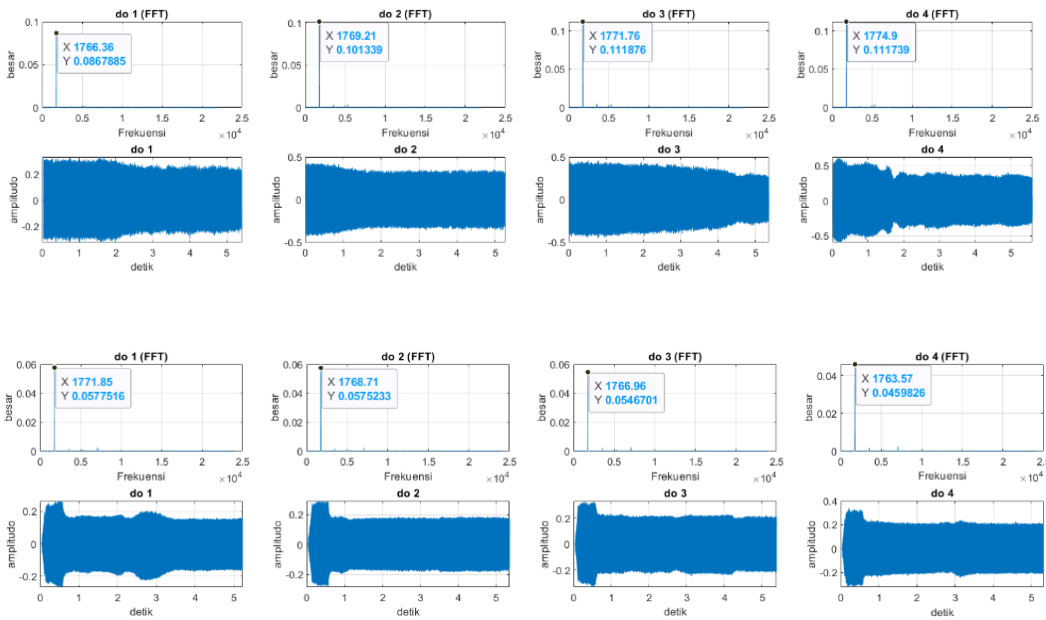
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Do Dengan Kecepatan **0.50 m/s**



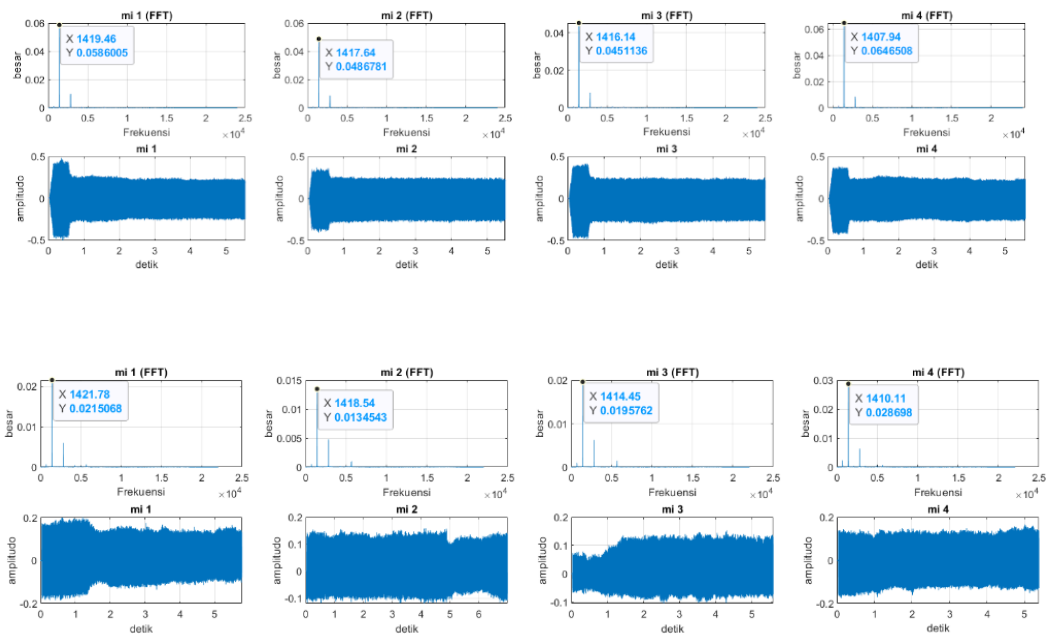
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan **0.50 m/s**



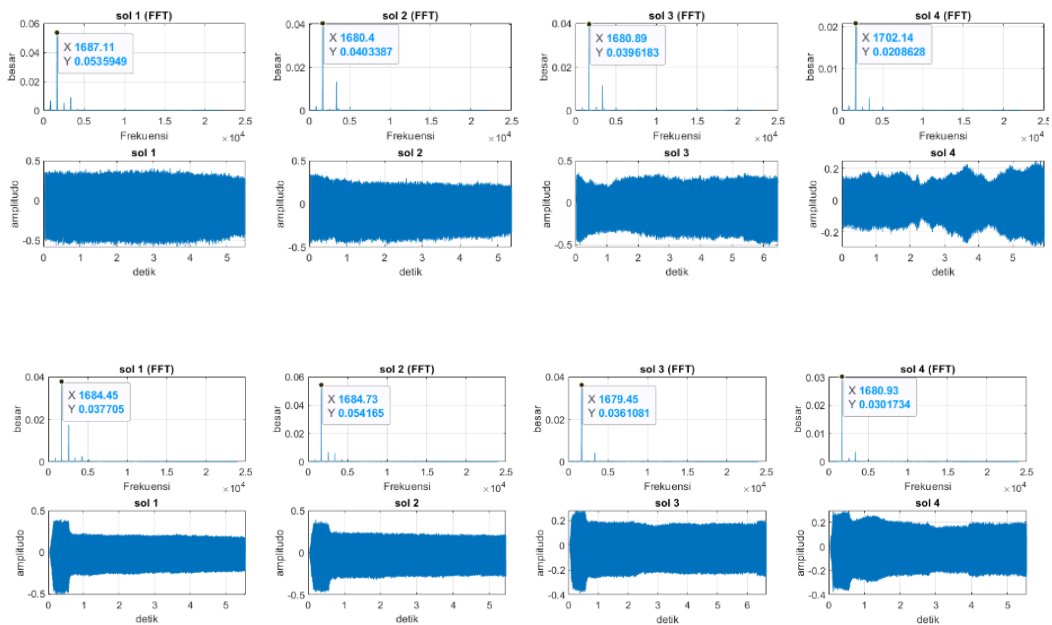
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan **0.50 m/s**



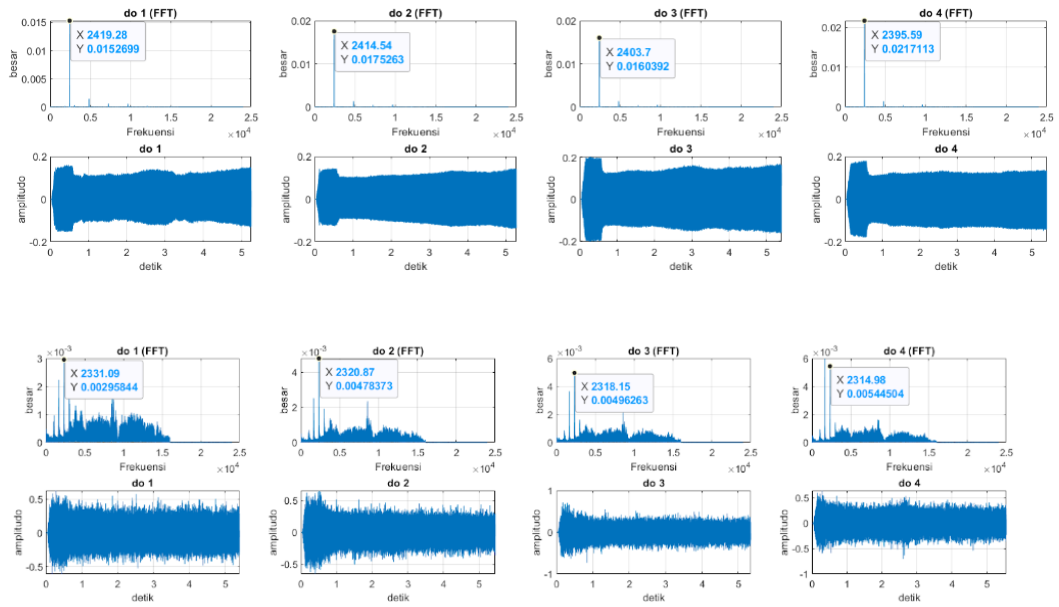
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Do Dengan Kecepatan **1 m/s**



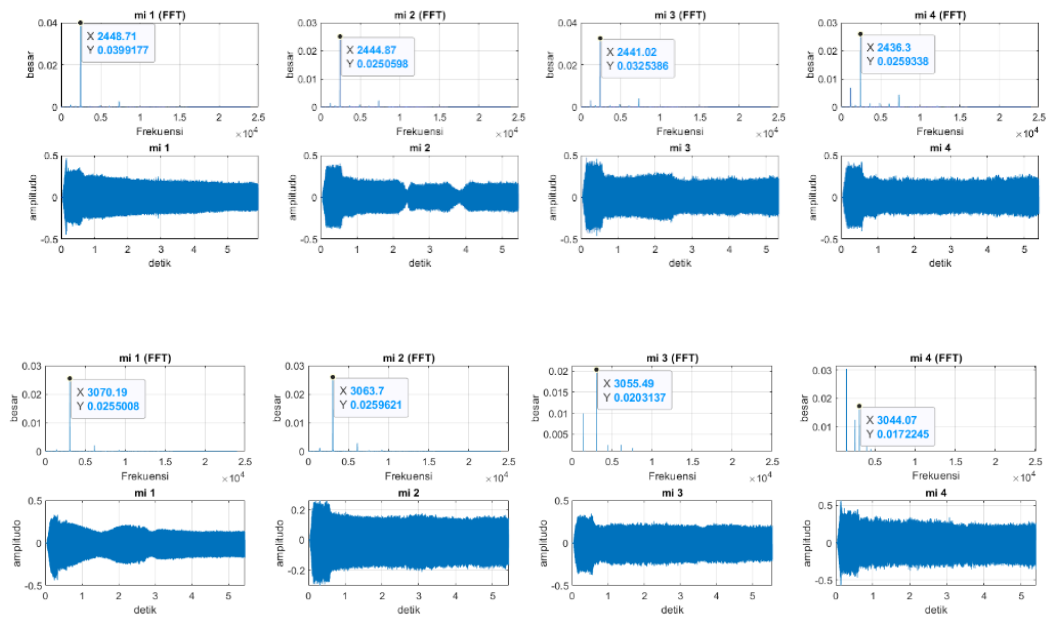
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan 1 m/s



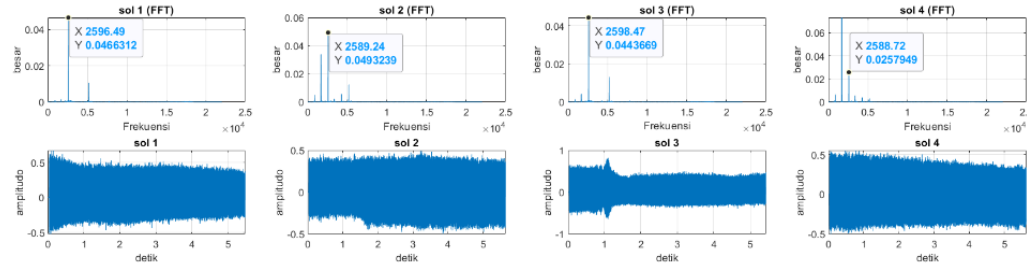
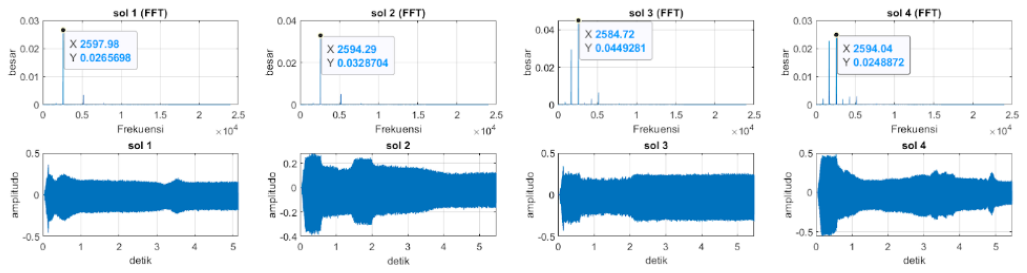
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan 1 m/s



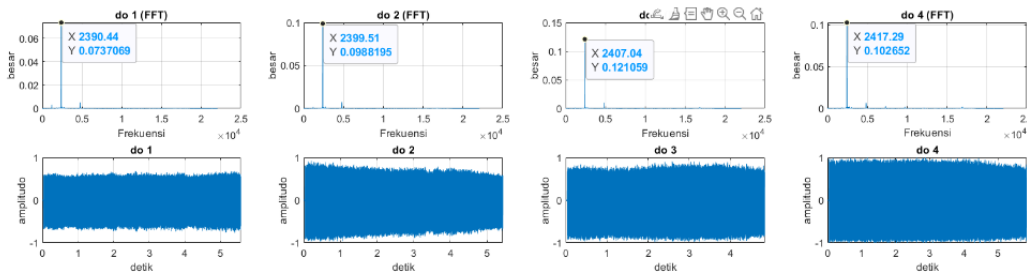
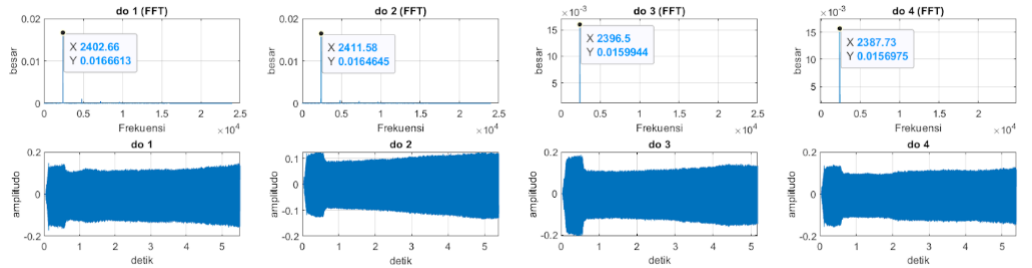
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Do Dengan Kecepatan 1.50 m/s



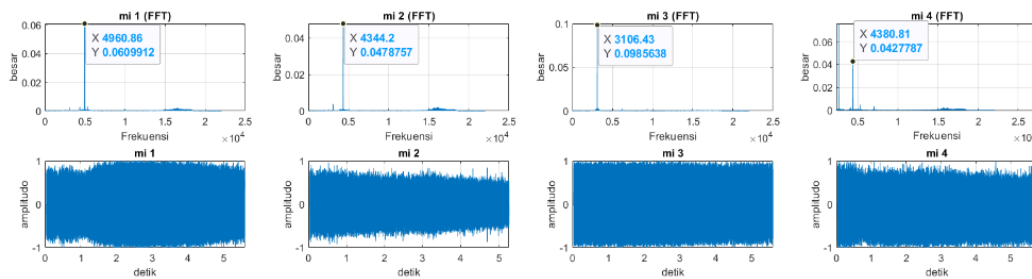
Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan 1.50 m/s

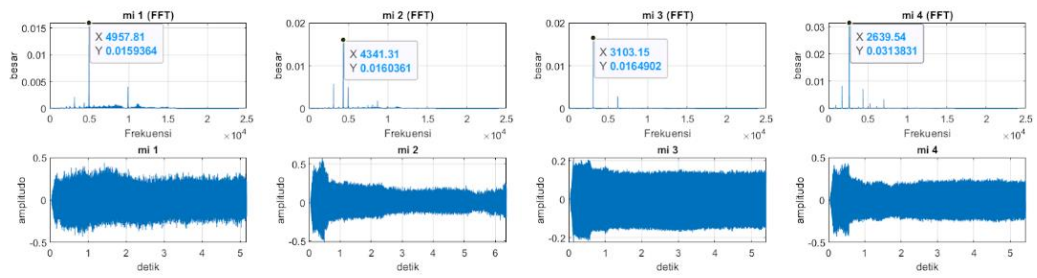


Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan 1.50 m/s

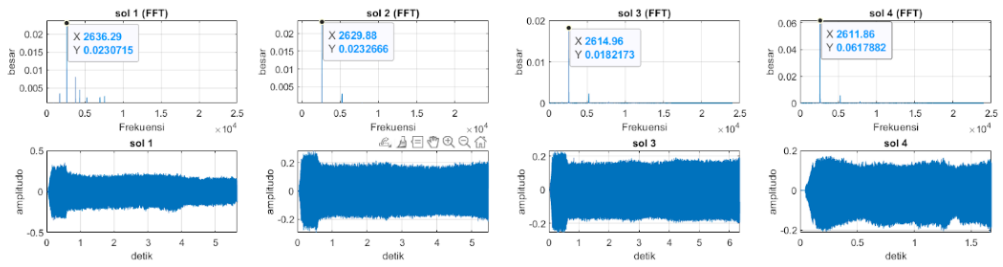


Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Do Dengan Kecepatan 2 m/s





Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Mi Dengan Kecepatan 2 m/s



Hasil Rekaman Rekorder Tangga Nada Sol Dengan Kecepatan 2 m/s

