



TUGAS AKHIR - TF 181801

**ANALISIS POLA RADIASI *DRIVER SPEAKER* TERHADAP
KINERJA *LOUDSPEAKER POLYHEDRAL***

RIZQINA MARSYA SEPHIA
NRP. 02311640000059

Dosen Pembimbing:
Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***RADIATION PATTERN ANALYSIS OF SPEAKER DRIVERS ON
POLYHEDRAL LOUDSPEAKER'S PERFORMANCE***

RIZQINA MARSYA SEPHIA
NRP. 02311640000059

Supervisors:
Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.

*Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Rizqina Marsya Sephia
NRP : 0231164000059
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS POLA RADIASI DRIVER SPEAKER TERHADAP KINERJA LOUDSPEAKER POLYHEDRAL**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 25 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Rizqina Marsya Sephia

NRP. 0231164000059

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS POLA RADIASI *DRIVER SPEAKER* TERHADAP KINERJA
*LOUDSPEAKER POLYHEDRAL***

Oleh:

Rizqina Marsya Sephia

NRP. 0231164000059

Surabaya, 27 Agustus 2020

Menyetujui,
Pembimbing



Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.

NIP. 19731007 199802 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS ITS



Dr. Suyanto ST., MT.

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS POLA RADIASI *DRIVER SPEAKER* TERHADAP KINERJA *LOUDSPEAKER POLYHEDRAL*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:

RIZQINA MARSYA SEPHIA


NRP. 0231164000059

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.

 (Pembimbing)


2. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc.

 (Ketua Penguji)

3. Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

 (Penguji I)

4. Irwansyah S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.

 (Penguji II)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS POLA RADIASI *DRIVER SPEAKER* TERHADAP KINERJA *LOUDSPEAKER POLYHEDRAL*

Nama : Rizqina Marsya Sephia
NRP : 0231164000059
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Dhany Arifianto S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Pengukuran akustik ruang membutuhkan sumber yang *omnidirectional*. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, susunan geometri *platonic solid* atau RPL (*Regular Polyhedron Loudspeaker*) adalah susunan yang dapat diaplikasikan untuk dapat menghasilkan sumber yang *omnidirectional*. Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai pola radiasi *loudspeaker* dan simulasi *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron* dengan ukuran *driver* yang digunakan adalah 4inch menggunakan bantuan *software* Comsol Multiphysics. Beberapa parameter yang menentukan kinerja *loudspeaker Polyhedron* adalah nilai *omnidirectional cut-off frequency*, frekuensi respon dan nilai tingkat tekanan bunyi untuk mengetahui kinerja dan batasan *loudspeaker Polyhedral*. Dengan menggunakan *boundary* berjarak 1,5 m didapatkan nilai *omnidirectional cut-off frequency* pada *loudspeaker tetrahedron* adalah 500Hz-630Hz, *loudspeaker hexahedron* adalah 1000Hz-1250Hz, *loudspeaker octahedron* dan *icosahedron* adalah 630Hz-800Hz. Frekuensi respon ditunjukkan dengan grafik frekuensi terhadap tingkat tekanan bunyi. Nilai tingkat tekanan bunyi untuk *loudspeaker tetrahedron* adalah 66dB – 98dB, *loudspeaker hexahedron* adalah 66dB-102dB, *loudspeaker octahedron* adalah 56dB hingga 110dB dan *loudspeaker icosahedron* adalah 72dB-114dB. Pola radiasi yang dihasilkan oleh speaker mempengaruhi nilai tingkat tekanan bunyi dan *omnidirectional cut-off frequency* dikarenakan besarnya energi yang terdisipasi kedalam bentuk energi vibrasi dan suara.

Kata Kunci: *Loudspeaker Polyhedral, omnidirectional cut-off frequency, Pola Radiasi*

Halaman ini sengaja dikosongkan

RADIATION PATTERN ANALYSIS OF SPEAKER DRIVERS ON POLYHEDRAL LOUDSPEAKER'S PERFORMANCE

Name : Rizqina Marsya Sephia
NRP : 0231164000059
Department : Engineering Physics INDSYS ITS
Supervisors : Dr. Dhany Arifianto S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Room acoustic measurements require an omnidirectional source. Based on previous research, platonic solid or RPL (Regular Polyhedron Loudspeaker) geometry is an arrangement that can be applied to produce an omnidirectional source. In this research, an analysis of loudspeaker radiation patterns and polyhedral loudspeaker simulations with 4inchs driver using the Comsol Multiphysics software was carried out. Some parameters that are compared are omnidirectional cut-off frequency, response frequency and sound pressure level values to determine the performance and limits of Polyhedral loudspeakers. With 1,5m boundaries, the Omnidirectional cut-off frequency value in tetrahedron loudspeaker is 500Hz-630Hz, hexahedron is 1000Hz-1250Hz, octahedron and icosahedron are 630Hz-800Hz. The frequency of response is indicated by a frequency graph of the sound pressure level. Sound pressure level values for tetrahedron loudspeakers are 66dB - 98dB, hexahedron loudspeakers are 66dB-102dB, octahedron loudspeakers are 56dB to 110dB and icosahedron loudspeakers are 66dB-114dB. Sound pressure level and omnidirectional cut-off frequency are influenced by the amount of energy dissipated into the form of sound and vibrational energy.

Keywords: *Polyhedral Loudspeaker, omnidirectional cut-off frequency, Radiation Pattern*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih Lagi Maha Penyayang, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT. Atas rahmat dan hidayahnya sehingga laporan tugas akhir ini yang berjudul “**Analisis Pola Radiasi Driver Speaker terhadap Kinerja Loudspeaker Polyhedral**” dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam pengerjaan Tugas Akhir dan Laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah dengan sabar membimbing dan memberikan petunjuk, ilmu dan waktu yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc., selaku Kepala Laboratorium Vibrastic yang telah banyak memberikan ilmu dan kesempatan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Bambang Lelono Widjiantoro S.T., M.T. selaku dosen wali penulis yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS yang telah memberikan ilmunya kepada penulis selama berkuliah di Teknik Fisika ini.
6. Segenap keluarga terutama kedua orang tua penulis yang telah memberikan dukungan penuh dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Dewi dan teman – teman dekat penulis yang selalu mendukung, menemani dan mendengarkan keluh kesah penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
8. Teman-teman asisten Laboratorium Vibrasi dan Akustik - Teknik Fisika yang senantiasa memberikan motivasi, perhatian dan dukungan penuh.
9. Teman-teman angkatan 2016 dan warga Teknik Fisika - ITS, yang senantiasa memberikan dukungan moril.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun

penulis berharap laporan ini dapat memberikan kontribusi dan wawasan yang bermanfaat bagi pembaca. Akhir kata, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan mohon maaf apabila masih terdapat banyak kekurangan dalam pembuatan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 21 Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
BAB I LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Hukum Kuadrat Terbalik.....	5
2.2 Keterarahan Suara (<i>Sound Directivity</i>).....	6
2.3 <i>Omnidirectional cut-off frequency</i>	9
2.4 Pendekatan <i>Spherical Harmonics</i>	10
2.5 <i>Driver Speaker</i>	12
2.6 <i>Loudspeaker Polyhedron</i>	13

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Studi literatur dan Identifikasi Masalah.....	15
3.2 Simulasi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i>	17
3.3 Pemodelan <i>Loudspeaker Polyhedron</i>	17
3.4 Simulasi <i>Loudspeaker Polyhedron</i>	20
3.5 Analisis, Evaluasi dan Pembahasan.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Kinerja <i>Loudspeaker Dodecahedron</i>	27
4.2 Pemodelan <i>Loudspeaker Polyhedron</i>	38
4.3 Simulasi <i>Loudspeaker Polyhedron</i>	42
4.4 Hasil dan Rekomendasi	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN	65
BIODATA PENULIS.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi hukum kuadrat terbalik pada pengukuran nilai keterarahan sumber suara (Ristanty, 2017).....	5
Gambar 2.2	Data Polar horizontal dan vertikal pada frekuensi 1250Hz (Long, 2006).....	6
Gambar 2.3	Diagram sistem koordinat dengan sumbu referensi ($\theta = 0$) melewati pusat (tegak lurus) terhadap kabinet <i>loudspeaker</i> . Dua lingkaran merepresentasikan pengukuran orbit vertikal dan horizontal (Tylka & Choueiri, 2014).....	7
Gambar 2.4	Pola keterarahan suara pada medan suara bebas (a) <i>monopol</i> , (b) <i>dipol</i> , (c) <i>lateral quadropol</i> , (d) <i>longitudinal quadropol</i> (Russell, Titlow, & Bemmen, 1999)	7
Gambar 2.5	Plot Balon Direktivitas pada frekuensi 2000Hz. (a) EM/EV <i>tetrahedron</i> . (b) EM <i>hexahedron</i> . (c) EV <i>hexahedron</i> . (d) EM <i>octahedron</i> . (e) EV <i>octahedron</i> . (f) EM <i>dodecahedron</i> . (g) EV <i>dodecahedron</i> (h) EV <i>icosahedron</i> (Leishman, 2006).....	8
Gambar 2.6	<i>Gain</i> yang ditambahkan pada Tingkat Tekanan Bunyi (Pasqual A. , 2014).....	11
Gambar 2.7	Komponen Utama <i>Driver Speaker</i> (Schmidt, 2017)	12
Gambar 2.8	Pola radiasi <i>driver speaker</i> 15" pada frekuensi 1250Hz (Speaker Directivity / Off Axis Response: Theory and Measurement Techniques, 2013)	13
Gambar 2.9	<i>Polyhedron</i> : (a) <i>Tetrahedron</i> , (b) <i>hexahedron</i> , (c) <i>octahedron</i> ,(d) <i>dodecahedron</i> , (e) <i>icosahedron</i> (Pasqual A. , 2014).....	14
Gambar 3.1	Diagram Alir Tugas Akhir.....	15
Gambar 3.2	Plot balon direktivitas pada <i>loudspeaker dodecahedron</i> 5" di frekuensi (a) 1000Hz, (b) 2000Hz	16
Gambar 3.3	Perbandingan <i>omnidirectional cut-off frequency</i> V-Dec.....	17
Gambar 3.4	Pemodelan <i>driver speaker</i> menggunakan <i>software</i> Autocad 2017..	18

Gambar 3.5 Penggabungan <i>driver</i> dan <i>enclosure Tetrahedron</i> pada perangkat lunak Solidwork 2016	18
Gambar 3.6 Hasil penggabungan (<i>assembly</i>) untuk <i>tetrahedron</i> pada <i>software</i> Solidwork 2016	18
Gambar 3.7 Penggabungan <i>driver</i> dan <i>enclosure Hexahedron</i> pada perangkat lunak Solidwork 2016	19
Gambar 3.8 Hasil penggabungan (<i>assembly</i>) untuk <i>hexahedron</i> pada <i>software</i> Solidwork 2016	19
Gambar 3.9 Penggabungan <i>driver</i> dan <i>enclosure Octahedron</i> pada perangkat lunak Solidwork 2016	19
Gambar 3.10 Hasil penggabungan (<i>assembly</i>) untuk <i>octahedron</i> pada <i>software</i> Solidwork 2016	19
Gambar 3.11 Penggabungan <i>driver</i> dan <i>enclosure Icosahedron</i> pada perangkat lunak Solidwork 2016	20
Gambar 3.12 Hasil penggabungan (<i>assembly</i>) untuk <i>Icosahedron</i> pada <i>software</i> Solidwork 2016	20
Gambar 3.13 Geometri Model <i>Loudspeaker</i> pada <i>Software</i> COMSOL Multiphysics a. <i>Tetrahedron</i> , b. <i>hexahedron</i> , c. <i>octahedron</i> , dan d. <i>icosahedron</i>	21
Gambar 3.14 <i>Boundary</i> yang digunakan pada simulasi.....	22
Gambar 3.15 Simetri yang digunakan untuk simulasi a. <i>tetrahedron</i> , b. <i>hexahedron</i> , c. <i>octahedron</i> , d. <i>icosahedron</i>	22
Gambar 3.16 Pendefinisian <i>Boundary</i>	23
Gambar 3.17 <i>Input</i> Data dan Variabel pada simulasi	24
Gambar 3.18 Hasil <i>Meshing</i> dari model <i>loudspeaker</i>	25
Gambar 4.1 Pola Radiasi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i> dengan diameter <i>driver</i> 5inch berdasarkan a. Pengukuran b. Simulasi	29
Gambar 4.2 Perbandingan pola keterarahan <i>loudspeaker dodecahedron</i> dengan diameter <i>driver</i> 5inch berdasarkan pengukuran dan simulasi pada frekuensi a. 500Hz dan b. 2000Hz.....	30
Gambar 4.3 Pola Radiasi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i> dengan diameter <i>driver</i> 4inch berdasarkan a. Pengukuran b. Simulasi	31

Gambar 4.4	Perbandingan pola keterarahan <i>loudspeaker dodecahedron</i> dengan diameter <i>driver</i> 4inch berdasarkan pengukuran dan simulasi pada frekuensi a. 500Hz dan b. 2000Hz	32
Gambar 4.5	Pola Radiasi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i> dengan diameter <i>driver</i> 2,5inch berdasarkan a. Pengukuran b. Simulasi	32
Gambar 4.6	Perbandingan pola keterarahan <i>loudspeaker dodecahedron</i> dengan diameter <i>driver</i> 2,5inch berdasarkan pengukuran dan simulasi pada frekuensi a. 500Hz dan b. 2000Hz	33
Gambar 4.7	Plot 2D dari Spherical Harmonic untuk variasi a. $m=1$ $n=1$; b. $m=2$ $n=2$; c. $m=1$ $n=2$; dan d. $m=2$ $n=3$	35
Gambar 4.8	Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i> Diameter 5inch	36
Gambar 4.9	Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i> Diameter 4inch	37
Gambar 4.10	Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Dodecahedron</i> Diameter 2,5inch	37
Gambar 4.11	Hasil simulasi respon frekuensi <i>driver</i> 4inch	39
Gambar 4.12	Hasil pengukuran respon frekuensi <i>driver</i> 4inch.....	39
Gambar 4.13	Pola keterarahan <i>driver</i> 4inch berdasarkan simulasi	40
Gambar 4.14	Pola keterarahan <i>driver</i> 4inch berdasarkan hasil pengukuran	40
Gambar 4.15	Geometri Model <i>Loudspeaker</i> a. <i>Tetrahedron</i> , b. <i>hexahedron</i> , c. <i>octahedron</i> , dan d. <i>icosahedron</i>	41
Gambar 4.16	Pola persebaran tingkat tekanan bunyi <i>tetrahedron</i> frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz.....	42
Gambar 4.17	Pola persebaran tingkat tekanan bunyi <i>hexahedron</i> frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz.....	43
Gambar 4.18	Pola persebaran tingkat tekanan bunyi <i>octahedron</i> frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz.....	44
Gambar 4.19	Pola persebaran tingkat tekanan bunyi <i>icosahedron</i> frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz.....	45
Gambar 4.20	Deviasi <i>Loudspeaker Tetrahedron</i> berdasarkan ISO 3382-1	46
Gambar 4.21	Deviasi <i>Loudspeaker Hexahedron</i> berdasarkan ISO 3382-1.....	46
Gambar 4.22	Deviasi <i>Loudspeaker Octahedron</i> berdasarkan ISO 3382-1	47
Gambar 4.23	Deviasi <i>Loudspeaker Octahedron</i> berdasarkan ISO 3382-1	47
Gambar 4.24	Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Tetrahedron</i>	48

Gambar 4.25 Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Hexahedron</i>	49
Gambar 4.26 Respon Frekuensi <i>Loudspeaker octahedron</i>	49
Gambar 4.27 Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Icosahedron</i>	50
Gambar 4.28 pola keterarahan <i>loudspeaker tetrahedron</i> pada rentang frekuensi a. 63Hz - 500Hz b. 630Hz - 2000Hz	51
Gambar 4.29 Grafik deviasi <i>Omnidirectional cut-off frequency</i> pada <i>Loudspeaker Tetrahedron</i>	52
Gambar 4.30 pola keterarahan <i>loudspeaker hexahedron</i> pada rentang frekuensi a. 63Hz - 1000Hz b. 1250Hz - 3150Hz	52
Gambar 4.31 Grafik deviasi <i>Omnidirectional cut-off frequency</i> pada <i>Loudspeaker hexahedron</i>	53
Gambar 4.32 pola keterarahan <i>loudspeaker octahedron</i> pada rentang frekuensi a. 63Hz - 630Hz b. 800Hz - 3150Hz	54
Gambar 4.33 Grafik deviasi <i>Omnidirectional cut-off frequency</i> pada <i>Loudspeaker octahedron</i>	54
Gambar 4.34 pola keterarahan <i>loudspeaker icosahedron</i> pada rentang frekuensi a. 63Hz - 630Hz b. 800Hz - 3150Hz	55
Gambar 4.35 Grafik deviasi <i>Omnidirectional cut-off frequency</i> pada <i>Loudspeaker icosahedron</i>	56
Gambar 4.36 perbandingan <i>omnidirectional cut-off frequency</i> pada <i>loudspeaker Polyhedron</i>	57
Gambar 4.37 perbandingan tingkat tekanan bunyi <i>loudspeaker Polyhedron</i> pada ruang <i>anechoic</i>	58
Gambar 4.38 Perbandingan Respon Frekuensi <i>Loudspeaker Polyhedron</i>	59

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Nilai Tingkat Tekanan Bunyi (TTB) <i>Loudspeaker Dodecahedron 2.5inch</i> Pada <i>Anechoic Chamber</i> Berdasarkan Pengukuran Dan Simulasi.....	28
Tabel 4.2 Nilai Tingkat Tekanan Bunyi (TTB) <i>Loudspeaker Dodecahedron 4inch</i> Pada <i>Anechoic Chamber</i> Berdasarkan Pengukuran Dan Simulasi.....	28
Tabel 4.3 Nilai Tingkat Tekanan Bunyi (TTB) <i>Loudspeaker Dodecahedron 5inch</i> Pada <i>Anechoic Chamber</i> Berdasarkan Pengukuran dan Simulasi.....	28
Tabel 4.4 Spesifikasi Dimensi <i>Loudspeaker</i>	41
Tabel 4.5 Perbandingan perubahan prosentase volume terhadap keterarahan	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengalaman pendengaran antar ruang satu dengan yang lainnya akan berbeda mengikuti karakteristik akustik dari ruangan itu sendiri. Untuk mengetahui karakteristik akustik ruangan tersebut dibutuhkan sebuah pengukuran akustik ruang. Namun pada pengukuran akustik ruang, sering muncul ketidakpastian pengukuran. Salah satu penyebab munculnya ketidakpastian tersebut diakibatkan oleh direktivitas dari berbagai tipe sumber suara yang digunakan dalam pengukuran. Semakin besar penyimpangan yang terjadi pada pola radiasi, maka semakin besar pula penyimpangan pada kuantitas akustik yang dihitung dari respon impuls ruangan yang diukur (Knüttel, Witew, & Vorlander, 2013). Besarnya penyimpangan tersebut harus ditangani dengan menggunakan sumber suara yang tepat. Pada pengukuran akustik ruang biasanya digunakan sebuah *speaker* yang mampu mensimulasikan distribusi suara ke segala arah atau sering disebut sebagai sumber suara *omnidirectional*.

Secara teori, penguas suara dengan ukuran kecil diperlukan untuk pengukuran akustik karena menghasilkan gelombang datar (*plane wave*) yang merepresentasikan tipe sumber suara. Di sisi lain, *speaker* dengan (membran) ukuran kecil menghasilkan daya yang kecil dan pola keterarahan atau direktivitas yang terbatas (panjang gelombang kecil/frekuensi tinggi). Untuk mengatasi hal tersebut, *loudspeaker* yang digunakan sebagai sumber *omnidirectional* tersusun dan tersebar dalam bentuk *spheris* atau *Polyhedral* (selanjutnya disebut *Polyhedron*) berdasarkan bentuk *Platonic solid* (Pasqual A. , 2014). *Platonic solid* merupakan suatu bentuk yang tersusun dari sisi-sisi poligon yang kongruen. Terdapat 5 buah bentuk *platonic solid* secara umum yakni *regular Tetrahedron* (4 sisi), *regular hexahedron* (6 sisi), *regular octahedron* (8 sisi), *regular dodecahedron* (12 sisi) dan *regular icosahedron* (20 sisi) (Leishman, 2006). *Loudspeaker* yang umumnya digunakan pada pengukuran akustik ruang adalah *loudspeaker dodecahedron* (12 sisi).

Berdasarkan penjelasan diatas, sebuah evaluasi eksperimen perbandingan dari *loudspeaker Polyhedron* sebagai sumber suara *omnidirectional* dengan EM (*Equal Mid-Radii*) dan EV (*Equal Volume*) dilakukan oleh (Leishman, 2006). Penelitian tersebut dilakukan dengan tinjauan dari penelitian yang dilakukan oleh (Tarnow, 1974) yang mengatakan bahwa frekuensi *cut off* akan meningkat seiring bertambahnya sisi pada *loudspeaker* dengan *fixed effective enclosure radii*. Frekuensi *cut-off* adalah batas frekuensi di mana sebuah *loudspeaker Polyhedron* akan bersifat *omnidirectional*. Hasil dari kedua penelitian tersebut hampir sama di mana *loudspeaker dodecahedron* tetap dianggap sebagai sumber suara *omnidirectional* yang paling baik dan *loudspeaker tetrahedron* dapat dijadikan alternatif karena memiliki *radiation uniformity* yang paling baik pada rentang frekuensi 4kHz meskipun memiliki *frekuensi cut-off* yang paling rendah. Selain itu, seluruh *loudspeaker Polyhedron* memiliki *omnidirectional directivity* pada frekuensi dibawah 1000Hz. Pada frekuensi 2000Hz, *loudspeaker Polyhedron* EV dengan jumlah sisi lebih banyak memiliki sifat *multidirectional* daripada *Loudspeaker Polyhedron* EM yang memiliki sisi lebih sedikit

Selain meninjau dari bentuk, perubahan dimensi berupa perubahan nilai ka juga diamati. (Pasqual A. , 2014) dalam penelitiannya menghitung nilai *radial vibration velocity* di seluruh permukaan *speaker* di mana nilai *cone velocity* bergantung pada nilai ka . K adalah bilangan gelombang yang bergantung pada frekuensi dan a adalah *radius cone speaker*. Semakin kecil frekuensi akan menyebabkan *cone velocity* semakin besar dan *displacement* pada *cone speaker* menjadi semakin besar sehingga SPL yang dihasilkan merendah. Pada pengerjaan tugas akhir sebelumnya telah dianalisis tiga buah generasi *loudspeaker dodecahedron* yang diberi nama V-Dec (*Vibrastic Dodecahedron*) dengan panjang sisi poligon sesuai urutan generasi yakni 15 cm, 13 cm dan 9 cm. Perubahan dimensi tersebut bertujuan untuk memudahkan dalam instalasi dan penggunaannya. Untuk pembuatan V-Dec generasi setelahnya, perlu memperhatikan beberapa dimensi antara lain dimensi *driver speaker* yang digunakan, dimensi *enclosure* dari *speaker dodecahedron* serta frekuensi suara yang dibangkitkan oleh *speaker dodecahedron* (Purwanto, 2019). Pemilihan *driver speaker* ini sangat berpengaruh terhadap kinerja *loudspeaker Polyhedron*. Namun, karena keterbatasan pasar akan

ketersediaan *driver speaker* yang dibutuhkan sesuai harapan, maka perlu dilakukan penelitian mengenai analisis batas penggunaan *driver* berdasarkan direktivitasnya untuk menghasilkan sumber yang *omnidirectional* di seluruh frekuensi pada *loudspeaker Polyhedron*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka didapatkan rumusan masalah dalam penelitian Tugas Akhir yang akan diselesaikan sebagai berikut:

- a) Bagaimana pengaruh Pola Radiasi *Driver Speaker* terhadap *omnidirectional directivity* dari *loudspeaker Polyhedron*?
- b) Bagaimana kinerja *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron*?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian Tugas Akhir ini adalah:

- a) Untuk menganalisis pengaruh pola radiasi *driver speaker* terhadap *omnidirectional directivity* dari *loudspeaker Polyhedron*.
- b) Untuk mengetahui kinerja dari *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan topik diluar tugas akhir ini, terdapat beberapa batasan masalah diantaranya:

- a) Ruang lingkup penelitian hanya dilakukan pada *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron* secara simulasi.
- b) Objek penelitian adalah *driver speaker* termasuk direktivitasnya.
- c) Kinerja dari *loudspeaker Polyhedron* yang diukur dan dibandingkan adalah keterarahan suara (*directivity*), respon frekuensi, frekuensi *cut-off* dan kuat suara yang dihasilkan.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika Laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab I menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan pada tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab II berisi tentang studi pustaka materi yang berkaitan dengan tugas akhir yang dilakukan yaitu meliputi *loudspeaker polyhedral*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III menjelaskan mengenai langkah-langkah yang berkaitan dengan tugas akhir yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV menjelaskan mengenai data dari hasil penelitian simulasi *single driver speaker*, simulasi *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron* serta hasil simulasi yang akan disesuaikan dengan standarisasi yang sudah ditetapkan untuk menjawab rumusan masalah yang telah diberikan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab V berisi mengenai kesimpulan tentang tugas akhir yang dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh pada bab IV untuk menjawab rumusan masalah yang diberikan serta saran untuk pengembangan tugas akhir selanjutnya.

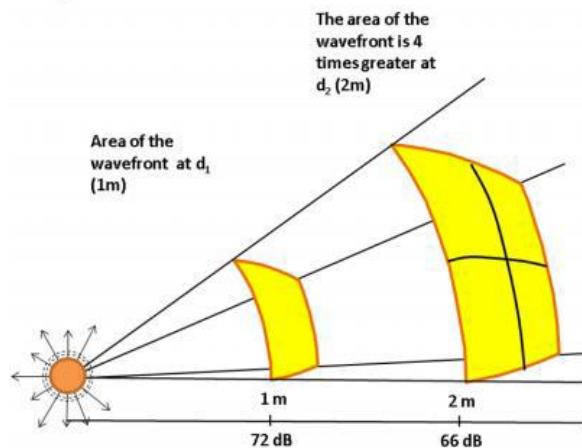
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Hukum Kuadrat Terbalik

Medan suara merupakan area dari medium perambatan suara yang masih mengandung gelombang suara dari sumber suara asli (Acoustic Glossary (Sound Fields and related terms ...), n.d.). Dalam pengaplikasiannya, medan suara terbagi menjadi dua jenis yakni *near field* dan *far field*. *Near field* adalah medan suara di mana tingkat tekanan bunyi dari suatu sumber hanya mengalami peluruhan atau perbedaan 3dB. Sedangkan *far field* merupakan medan suara diluar daerah *near field* yang terbagi menjadi dua yakni *free field* dan *reverberant field*.

Pada *near field*, bentuk muka gelombang yang terbentuk masih berbentuk spheris. Ketika tingkat tekanan bunyi sudah meluruh sebesar 6 dB pada dua kali jarak maka medan suara menjadi medan suara bebas (*free field*) dan akan berubah menjadi medan pantul (*reverberant field*) ketika suara sudah mengenai bidang pantul. Medan bebas dan medan pantul ini termasuk medan jauh (*far field*) yang muka gelombangnya berbentuk planar. Penentuan batas *near field* dilakukan dengan menggunakan hukum kuadrat terbalik (*Inverse square law*).



Gambar 2. 1 Ilustrasi hukum kuadrat terbalik pada pengukuran nilai keterarahan sumber suara (Ristanty, 2017)

Hukum kuadrat terbalik menjelaskan bahwa akan terjadi peluruhan monoton tekanan suara seiring dengan meningkatnya jarak dari pusat efektif sumber. Hal ini

diilustrasikan pada gambar 2.1 di mana jumlah energi yang sama yang melewati area empat kali lebih besar pada jarak dua kali lipat menghasilkan tingkat tekanan dan intensitas 6 dB yang lebih rendah.

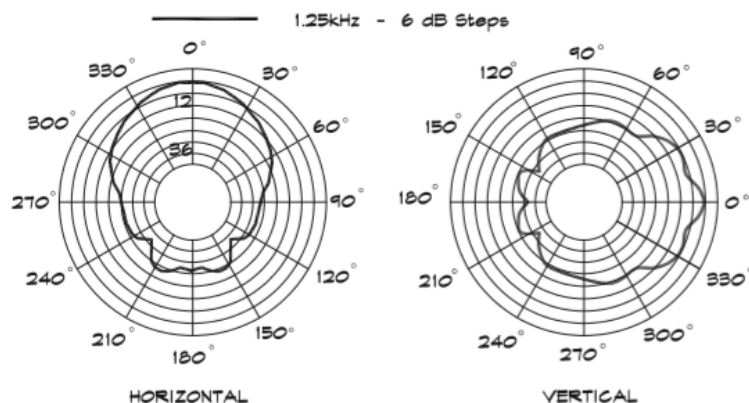
Hukum kuadrat terbalik ini dapat dibuktikan dengan penurunan persamaan Tingkat Tekanan Bunyi fungsi jarak sesuai dengan persamaan (2.1). Pada persamaan (2.1), selisih nilai tingkat tekanan bunyi pada jarak pertama (L_1) dengan nilai tingkat tekanan bunyi pada jarak kedua (L_2) sama dengan nisbah logaritmik antara jarak kedua dengan (R_2) dengan jarak pertama (R_1).

$$L_1 - L_2 = 20 \log \frac{R_2}{R_1} \quad (2.1)$$

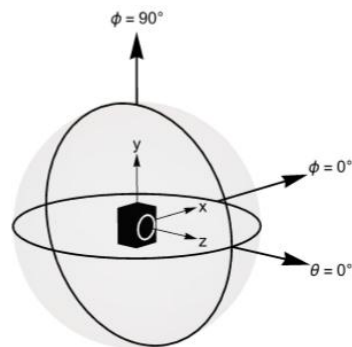
di mana, L_1 merupakan tingkat tekanan bunyi pada jarak R_1 sedangkan L_2 merupakan tingkat tekanan bunyi pada jarak R_2 .

2.2 Keterarahan Suara (*Sound Directivity*)

Tingkat tekanan bunyi (*sound pressure level*) yang dimiliki oleh berbagai macam sumber pada jarak tertentu dari pusatnya tidak sama pada semua arah. Hal ini disebut dengan *directionality*. Perubahan nilai tingkat tekanan bunyi terhadap arah suatu sumber suara disebut dengan keterarahan suara (*Sound Directivity*). Keterarahan suara ini pada umumnya digambarkan dengan pola kontur level yang sama secara 2 atau 3 dimensi. Ketika kontur level digambarkan secara 2 dimensi, seperti yang umumnya ada pada deskripsi *loudspeaker*, maka pola biasa disebut sebagai vertikal dan horizontal *polar pattern* (Long, 2006).

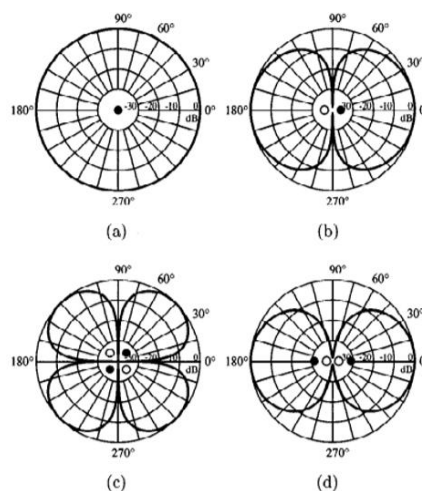


Gambar 2. 2 Data Polar horizontal dan vertikal pada frekuensi 1250Hz (Long, 2006)



Gambar 2. 3 Diagram sistem koordinat dengan sumbu referensi ($\theta = 0$) melewati pusat (tegak lurus) terhadap kabinet *loudspeaker*. Dua lingkaran merepresentasikan pengukuran orbit vertikal dan horizontal (Tylka & Choueiri, 2014)

Keterarahan suara ditentukan oleh tingkat tekanan bunyi terukur pada jarak (r) dari sumber suara dengan sudut angular (θ) tertentu. (Russell, Titlow, & Bemmen, 1999) dalam penelitiannya mengatakan bahwa pola keterarahan bervariasi bergantung pada radiasi sumber *monopol*, *dipole* atau *quadrapole*. Sebuah sumber *monopol* meradiasikan suara yang sama diseluruh arah sudut angular. Hubungan antara panjang gelombang dan dimensi untuk *monopole* dijelaskan sebagai $ka < 1$ di mana $k = 2\pi/\lambda$ adalah bilangan gelombang, λ adalah panjang gelombang dan a adalah karakteristik dimensi dari sumber suara (Russell, Titlow, & Bemmen, 1999). Oleh karena itu pada penelitian ini diharapkan *loudspeaker* memiliki pola keterarahan yang sama di seluruh sudut angular atau bersifat *monopol*.

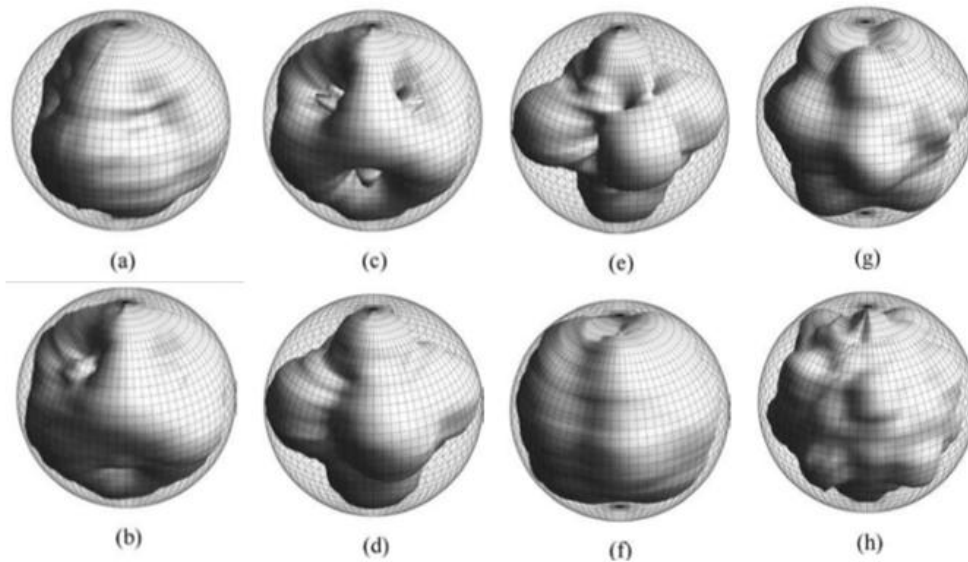


Gambar 2. 4 Pola keterarahan suara pada medan suara bebas (a) *monopol*, (b) *dipol*, (c) *lateral quadrapole*, (d) *longitudinal quadrapole* (Russell, Titlow, & Bemmen, 1999)

Untuk *Loudspeaker Polyhedron*, (Leishman, 2006) mengatakan bahwa pola keterarahan didapatkan dari persamaan (2.2). Persamaan (2.2) merupakan nisbah logaritmis antara *modulus of the complex frequency response function* pada titik (m, n) sebuah bola dengan *modulus of the complex frequency response function* tertinggi pada frekuensi tertentu.

$$L_{m,n}(f) = 20 \log \left[\frac{|H_{m,n}(f)|}{|H_{m,n}(f)|_{max}} \right] \quad (2.2)$$

Di mana variabel m dan n merupakan titik pengukuran $m=0,1,2,\dots$ pada posisi sudut $\theta_m = m\Delta\theta$ sedangkan $n=0,1,2,\dots$ pada posisi sudut $\phi_n = n\Delta\phi$.



Gambar 2. 5 Plot Balon Direktivitas pada frekuensi 2000Hz. (a) EM/EV tetrahedron. (b) EM hexahedron. (c) EV hexahedron. (d) EM octahedron. (e) EV octahedron. (f) EM dodecahedron. (g) EV dodecahedron (h) EV icosahedron (Leishman, 2006)

Pada umumnya, pola radiasi keterarahan dari sebuah *loudspeaker Polyhedron* akan *omnidirectional* ketika frekuensi yang dibangkitkan berada dibawah 1000Hz. Apabila ditinjau dari frekuensi 2000Hz dan 4000Hz, berdasarkan penelitian (Leishman, 2006) *tetrahedron* memiliki *radiation uniformity* yang lebih baik dibandingkan dengan *dodecahedron* dan *loudspeaker Polyhedron* lainnya.

Gambar 2.5 merupakan plot direktivitas *loudspeaker Polyhedron* pada frekuensi 2000Hz yang dilakukan oleh (Leishman, 2006) di mana pada penelitian tersebut didapatkan bahwa *loudspeaker* yang memiliki pola keterarahan paling baik

atau menyebar secara merata keseluruh arah di rentang frekuensi terbesar adalah *loudspeaker dodecahedron* dengan jumlah sisi sebanyak 12.

2.3 *Omnidirectional cut-off frequency*

Omnidirectional cut-off frequency merupakan batas nilai frekuensi yang dapat dibangkitkan oleh sebuah sumber suara agar sumber suara tersebut masih menghasilkan pola keterarahan yang merata kesegala arah (*omnidirectional directivity*). Apabila sumber suara tersebut dibangkitkan pada frekuensi lebih rendah dari *omnidirectional cut-off frequency* maka sumber suara tersebut akan menghasilkan *omnidirectional directivity*. Begitu pula sebaliknya, apabila sumber suara dibangkitkan diatas *omnidirectional cut-off frequency*, maka sumber suara tersebut akan menghasilkan *directional directivity*. Batas deviasi tingkat tekanan bunyi yang dapat ditoleransi untuk dianggap sebagai *omnidirectional source* pada pita frekuensi tertentu diseluruh titik ukur adalah tidak lebih besar dari 0,5 dB.

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh (Tarnow, 1974), dengan menggunakan *spherical harmonic expansions*, *group representation theory*, dan beberapa teori lainnya untuk mengetahui karakteristik frekuensi rendah hingga menengah dan *omnidirectional cut-off frequency*, didapatkan bahwa semakin banyak jumlah muka dari *loudspeaker Polyhedron* dengan *fixed effective enclosure radii*, maka semakin meningkat pula nilai *omnidirectional cut-off frequency* yang dihasilkan.

Berdasarkan penelitian tersebut, (Leishman, 2006) melakukan evaluasi eksperimental terhadap *loudspeaker Polyhedron* dengan dua macam variasi yakni EM (*Equivalent Midradii* = 11,0 cm) dan EV (*Equivalent Volume* = 887,4 cm³). Hasil penelitian yang didapatkan mengatakan bahwa untuk variasi EM, urutan *omnidirectional cut-off frequency* dari frekuensi terendah hingga tertinggi adalah (1) *tetrahedron*, (2) *octahedron*, (3) *hexahedron*, dan (4) *dodecahedron*. Sedangkan untuk variasi EV urutannya adalah (1) *tetrahedron*, (2) *octahedron*, (2) *icosahedron*, (3) *hexahedron*, dan (4) *dodecahedron* (sesuai dengan tabel 2.1). Sebagian dari hasil penelitian tersebut sesuai dengan yang dikemukakan oleh (Tarnow, 1974) dan nilai *omnidirectional cut-off frequency* tertinggi dimiliki oleh

dodecahedron. Untuk *Loudspeaker Polyhedron* diluar dimensi yang telah diteliti akan menghasilkan nilai *omnidirectional cut-off frequency* yang berbeda pula.

Tabel 2. 1 *Omnidirectional cut-off frequency RPL* (Leishman, 2006)

RPL	Measured cutoff frequency f_c (Hz)	Measured cutoff ratio $f_c/f_{c,t}$	Tarnow cutoff ratio $f_c/f_{c,t}$	EM/EV cutoff ratio $f_{c,EM}/f_{c,EV}$	Radius Ratio a/a_t	Adjusted measured cutoff ratio $f_c/f_{c,t} \times a/a_t$
EM/EV tetrahedron	975	1,00	1,0	1,00	1,00	1,00
EM hexahedron	1562,5	1,60	1,2	1,11	1,00	1,60
EM octahedron	1437,5	1,47	1,4	1,14	1,00	1,47
EM dodecahedron	1712,5	1,76	2,2	1,17	1,00	1,76
EV hexahedron	1412,5	1,49	1,0	1,11	1,12	1,67
EV octahedron	1262,5	1,29	1,3	1,14	1,12	1,44
EV dodecahedron	1462,5	1,50	1,6	1,17	1,33	2,00
EV icosahedron	1300	1,33	1,5	N/A	1,48	1,97

2.4 Pendekatan *Spherical Harmonics*

Metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan reproduksi suara 3D terbagi menjadi dua yakni pendekatan Kirchoff-Helmholtz dan pendekatan *Spherical Harmonics*. Pendekatan Kirchoff-Helmholtz menunjukkan bahwa sebuah medan bunyi dalam sebuah volume dapat dihasilkan apabila tekanan dan *normal velocity* pada permukaan volume diketahui (Poletti, 2005). Sedangkan pendekatan *Spherical Harmonics* merupakan kumpulan persamaan harmonik yang didefinisikan pada sebuah permukaan bola. Persamaan *Spherical Harmonics* ditunjukkan pada persamaan (2.3).

$$Y_n^m(\theta, \phi) \equiv (-1)^m \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) e^{im\phi} \quad (2.3)$$

di mana nilai m dan n merupakan nilai orde dan degree nya, P_n^m adalah persamaan Legendre. Semakin tinggi nilai n , maka osilasi akan terjadi semakin cepat pada sumbu azimuth (ϕ) dan sumbu zenith (θ) sehingga harmonik orde tinggi berkaitan dengan *high spatial frequency*. Dikarenakan *spherical harmonics* adalah fungsi

orthogonal dalam unit spheris maka dapat diketahui bahwa fungsi $f(\theta, \phi)$ dapat didekomposisi menjadi *spherical harmonic basis* sesuai persamaan (2.4).

$$f(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n F_{mn} Y_n^m(\theta, \phi) \quad (2.4)$$

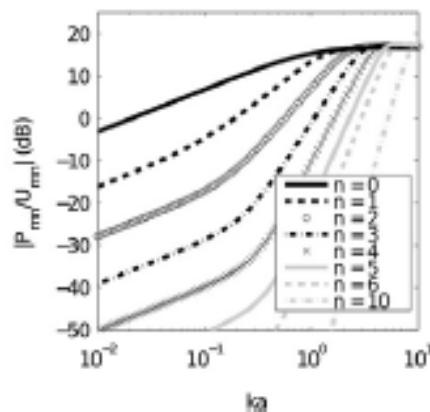
(Pasqual A. , 2014) dalam penelitiannya menggunakan pendekatan ini untuk menghitung nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan oleh sumber spheris pada suatu medan bunyi. Persamaan tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan dengan menggunakan pendekatan ini sesuai dengan persamaan (2.5).

$$p(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n P_{m,n}(r) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (2.5)$$

Di mana $P_{m,n}(r)$ merupakan *spherical wave spectrum* (persamaan (2.6))

$$P_{m,n}(r) = \left[l\rho c \frac{h_n(kr)}{h'_n(ka)} \right] U_{m,n}(r) \quad (2.6)$$

Nilai $\frac{P_{m,n}(r)}{U_{m,n}(r)}$ merupakan nilai *gain* yang diaplikasikan pada komponen harmonik akibat propagasi gelombang suara pada arah positif radial, yang bergantung pada properti medan, orde harmonik dan dua parameter tak berdimensi yakni ka dan r/a . Nilai ka merupakan perkalian antara bilangan gelombang ($k=\omega/c$) dengan *radius midsphere* (a) sedangkan nilai r/a merupakan rasio perbandingan antara jarak *free field* dengan *radius midsphere*. Dengan menggunakan nilai orde $n \leq 6$ dan $n = 10$, nilai *gain* yang dihasilkan sesuai dengan gambar 2.6.

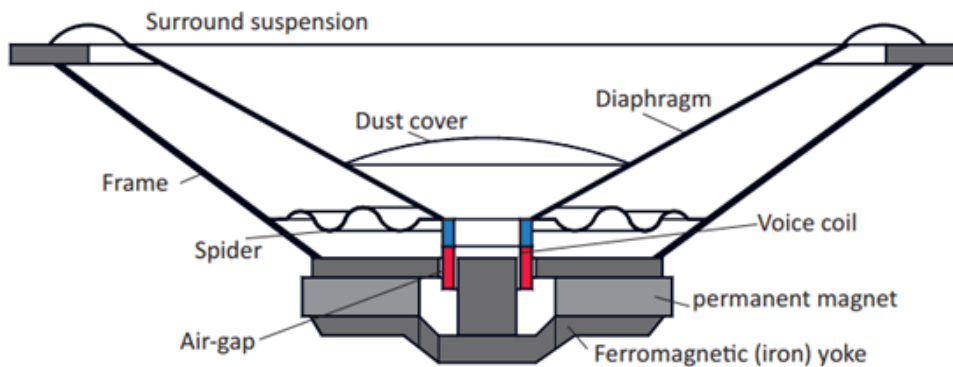


Gambar 2. 6 Gain yang ditambahkan pada Tingkat Tekanan Bunyi (Pasqual A. , 2014)

Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin kecil nilai ka yang digunakan maka semakin kecil penambahan *gain* pada tingkat tekanan bunyi sehingga keterarahan suara menjadi *omnidirectional*. Sebaliknya, apabila nilai ka yang digunakan semakin besar maka nilai penambahan *gain* pada tingkat tekanan bunyi akan semakin besar pula yang mengakibatkan keterarahan menjadi semakin *directional*.

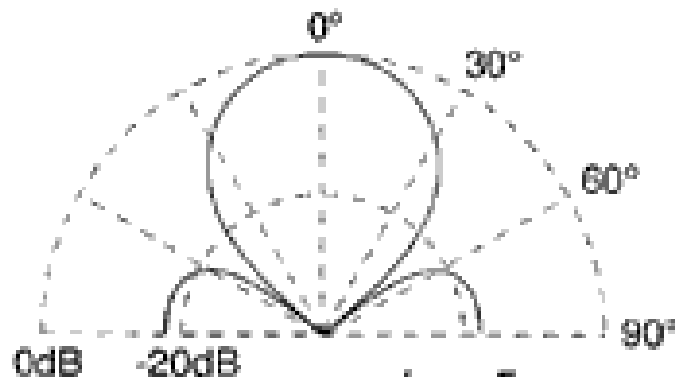
2.5 Driver Speaker

Speaker merupakan sebuah transduser yang mengubah sinyal elektrik menjadi sinyal suara. *Driver speaker* terdiri dari beberapa komponen utama yang berfungsi untuk menghasilkan sinyal suara, diantaranya adalah magnet, *voice coil*, *diaphragm/cone*, *surround suspension* dan *spider*. Dalam mengubah sinyal elektrik menjadi sinyal suara, *speaker* memiliki komponen elektromagnetik yang terdiri dari kumparan (*voice coil*) untuk membangkitkan medan magnet dan berinteraksi dengan magnet permanen sehingga menggerakkan *diaphragm / cone speaker* maju dan mundur. Semakin besar dimensi *cone*, semakin besar pula permukaan yang bergetar dan suara yang dihasilkan akan semakin besar. *Surround suspension speaker* berfungsi untuk meredam getaran dari *cone speaker*.



Gambar 2. 7 Komponen Utama *Driver Speaker* (Schmidt, 2017)

Driver loudspeaker memiliki pola radiasi sesuai dengan spesifikasinya masing-masing. Pada umumnya pola radiasi ini bergantung pada radius dan frekuensi yang dibangkitkan oleh *driver speaker* itu sendiri. Berikut merupakan salah satu contoh pola radiasi yang dihasilkan oleh *driver 15"* pada frekuensi 1250Hz.



Gambar 2. 8 Pola radiasi *driver speaker* 15" pada frekuensi 1250Hz (Speaker Directivity / Off Axis Response: Theory and Measurement Techniques, 2013)

Frekuensi yang dibangkitkan oleh sebuah *driver speaker* juga bergantung pada beberapa hal yakni sebagai berikut (Schmidt, 2017):

a. *Displacement of Diaphragm*

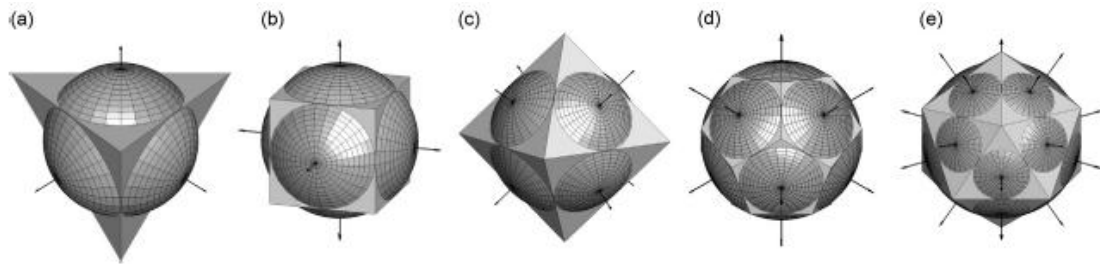
Untuk menghasilkan nilai Tingkat Tekanan Bunyi yang tinggi pada frekuensi rendah, dibutuhkan amplitudo *displacement* yang besar.

b. *Surface of diaphragm / Cone Speaker*

Amplitudo *displacement* hanya bisa dikurangi dengan menambah ukuran permukaan *diaphragm* atau memperbesar ukuran *driver*.

2.6 *Loudspeaker Polyhedron*

Loudspeaker dengan geometri *Polyhedron/polytopes* merupakan beberapa bentuk *loudspeaker* yang mampu menghasilkan pola keterarahan spheris atau sumber *omnidirectional*. *Loudspeaker Polyhedron* dibentuk oleh beberapa bidang datar yang mempunyai ukuran dan sudut yang sama sehingga setiap tepi dari *loudspeaker Polyhedron* memiliki panjang yang sama. Beberapa bentuk geometri *Polyhedron* diantaranya adalah regular *Tetrahedron*, regular *hexahedron*, regular *octahedron*, regular *dodecahedron*, dan regular *icosahedron* (Coxeter, 1963). Gambar 2.8 merupakan konfigurasi *Polyhedron* dan *midsphere*-nya (*midsphere* adalah bola yang bersinggungan dengan setiap tepi dari *loudspeaker polyhedral/Polyhedron*) serta panah menunjukkan posisi dari titik tengah muka *loudspeaker*.



Gambar 2. 9 Polyhedron : (a) *Tetrahedron*, (b) *hexahedron*, (c) *octahedron*, (d) *dodecahedron*, (e) *icosahedron* (Pasqual A. , 2014)

Dalam membuat sebuah *speaker Polyhedron*, dimensi merupakan parameter penting yang harus diperhatikan. Persamaan (2.7) merupakan rasio antara luas daerah yang mengalami vibrasi, dalam hal ini adalah luas daerah yang dibutuhkan oleh *speaker*, dengan luas total dari *speaker*.

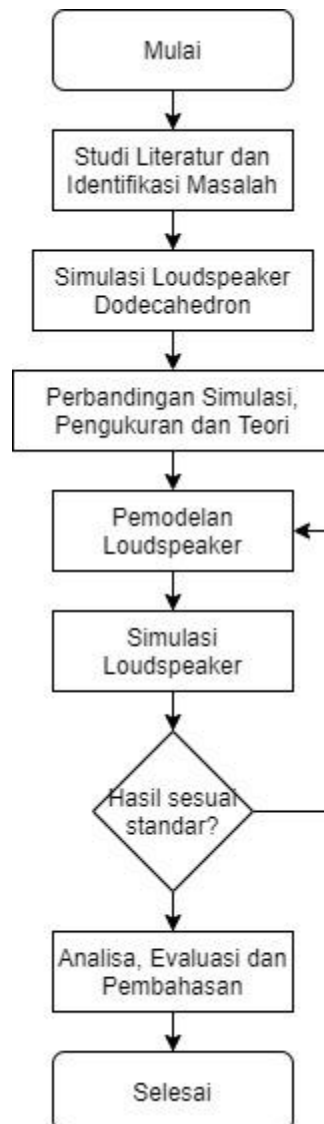
$$\frac{2\pi a_1^2(1 - \cos\theta_0)L}{4\pi a_2^2} \leq \begin{cases} 0,844 \rightarrow \textit{tetrahedron} \\ 0,879 \rightarrow \textit{hexahedron} \\ 0,731 \rightarrow \textit{octahedron} \\ 0,895 \rightarrow \textit{dodecahedron} \\ 0,658 \rightarrow \textit{icosahedron} \end{cases} \quad (2.7)$$

di mana, a_1 merupakan radius *driver speaker*, a_2 merupakan radius *speaker*, θ_0 merupakan *cap aperture angle* dan L merupakan banyaknya *driver speaker* yang digunakan.

θ_0 memiliki nilai maksimum sebesar $54,7^\circ$ untuk *Tetrahedron*, 45° untuk *hexahedron*, $35,2^\circ$ untuk *octahedron*, $31,7^\circ$ untuk *dodecahedron* dan $20,9^\circ$ untuk *icosahedron*. L memiliki nilai sebesar 4 untuk *Tetrahedron*, 6 untuk *hexahedron*, 8 untuk *octahedron*, 12 untuk *dodecahedron* dan 20 untuk *icosahedron* (Pasqual A. , 2014).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan memperhatikan langkah-langkah sebagai berikut:

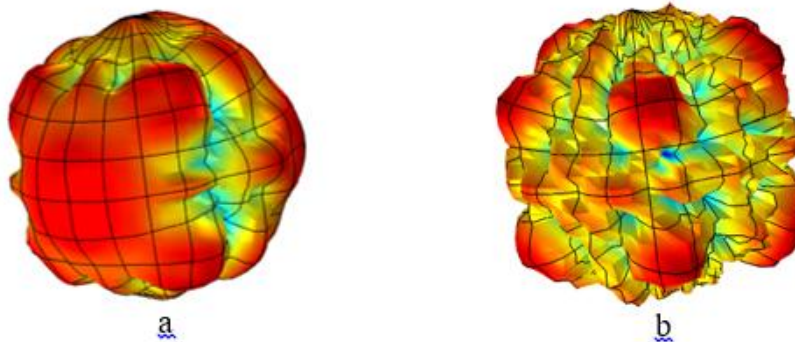


Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.1 Studi literatur dan Identifikasi Masalah

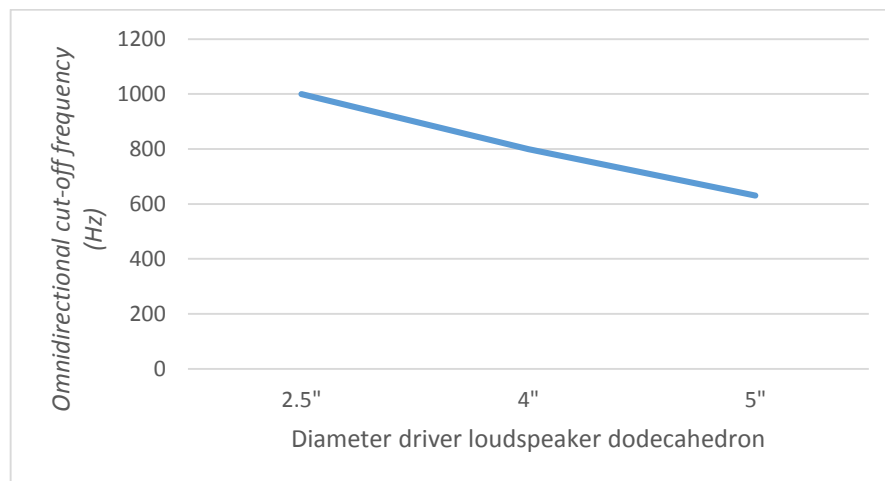
Sebelum dilakukan sebuah penelitian perlu dilakukan identifikasi masalah dan pencarian informasi serta berbagai fakta terkait yang menunjang (studi

literatur) agar penelitian tersebut dapat dilakukan. Studi literatur yang dilakukan meliputi pemahaman konsep tentang usulan tugas akhir yang akan dikerjakan mulai dari *review* jurnal pendukung sampai pengumpulan data termasuk *data sheet* dan informasi *driver* serta berbagai macam informasi lainnya yang dibutuhkan untuk menunjang pengerjaan tugas akhir ini.



Gambar 3. 2 Plot balon direktivitas pada *loudspeaker dodecahedron* 5" di frekuensi (a) 1000Hz, (b) 2000Hz

Pada pengerjaan tugas akhir sebelumnya, telah dilakukan analisis perubahan dimensi terhadap kinerja *loudspeaker dodecahedron* dengan variasi ukuran *driver speaker* 5 inch, 4 inch dan 2,5 inch yang telah dibuat dengan bantuan *software COMSOL Multiphysics 5.4*. Berdasarkan pengerjaan tugas akhir sebelumnya didapatkan bahwa semakin tinggi frekuensi suara yang dihasilkan, maka direktivitas yang dimiliki *loudspeaker dodecahedron* semakin tidak *omnidirectional* sesuai dengan gambar 3.1. Selain itu, berdasarkan gambar 3.2, dapat diketahui bahwa semakin kecil dimensi *loudspeaker dodecahedron* yang dibuat maka nilai *omnidirectional cut-off frequency* yang dihasilkan semakin besar. Namun dengan mengecilnya dimensi *loudspeaker dodecahedron*, maka nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan akan mengecil dan respon frekuensi semakin tidak *flat*. Oleh karena itu perlu dilakukan sebuah analisis mengenai pengaruh pola radiasi *driver speaker* pada *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron* (*tetrahedron*, *hexahedron*, *octahedron* dan *icosahedron*) untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhinya.



Gambar 3. 3 Perbandingan *omnidirectional cut-off frequency* V-Dec

Analisis yang digunakan oleh *software* COMSOL Multiphysics 5.4 mengenai pola radiasi bergantung pada persamaan dasar gelombang Helmholtz pada koordinat spheris. Namun pada tugas akhir ini, analisis dilakukan dengan pendekatan *Spherical harmonic function* sesuai dengan subbab 2.4 di mana persamaan ini digunakan untuk mengetahui bagaimana perambatan gelombang pada suatu sumber ketika melewati sebuah *boundary*.

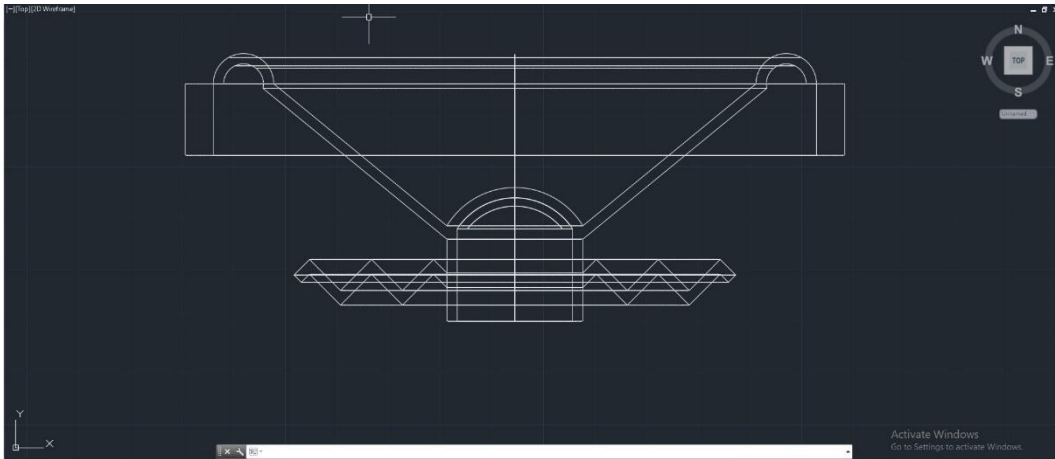
3.2 Simulasi *Loudspeaker Dodecahedron*

Simulasi *Loudspeaker Dodecahedron* yang telah dilakukan pada tugas akhir sebelumnya, dianalisis lebih lanjut lagi pada bagian pola radiasi. Analisis ini dilakukan untuk menganalisis pola yang terjadi pada jarak 1,5m dari sumber yang diibaratkan sebagai titik pengambilan data di medan jauh. Analisis dilakukan pada frekuensi 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, dan 2000Hz menggunakan fitur *Exterior-field Calculation* pada *anechoic chamber*.

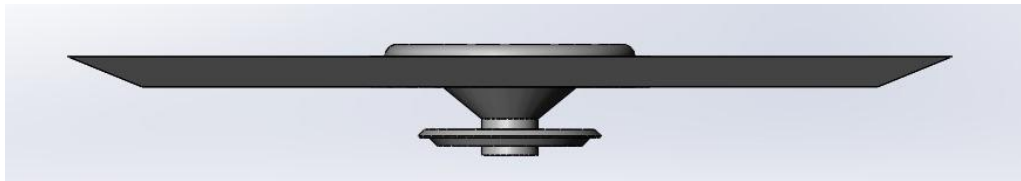
3.3 Pemodelan *Loudspeaker Polyhedron*

Pemodelan *loudspeaker* dilakukan untuk *loudspeaker tetrahedron*, *hexahedron*, *octahedron* dan *icosahedron* dengan bantuan 2 *software* yakni menggunakan Autocad2017 dan Solidwork2016. *Software* Autocad digunakan untuk membuat model masing masing *driver* sesuai dengan spesifikasi *driver* SBAcoutics 4" SB12CAC25-8 yang terdiri dari *apex*, *spider*, *cone*, dan *surround* dan *enclosure*nya sesuai dengan gambar 3.3. *Software* solidwork digunakan untuk

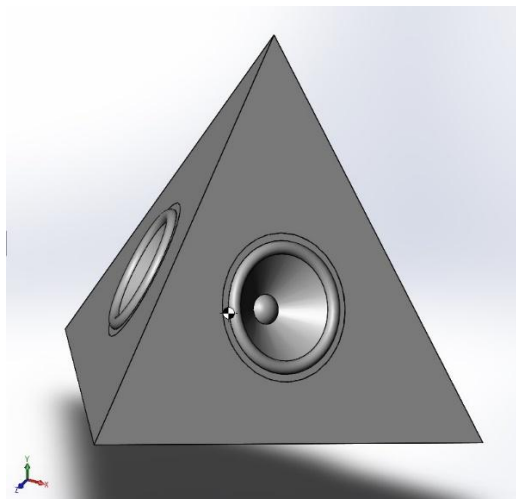
menggabungkan (*assembly*) bagian *driver* dan *enclosure* yang telah dibuat menjadi bentuk *loudspeaker Polyhedron* sesuai dengan gambar 3.4 hingga gambar 3.12.



Gambar 3. 4 Pemodelan *driver speaker* menggunakan *software* Autocad 2017



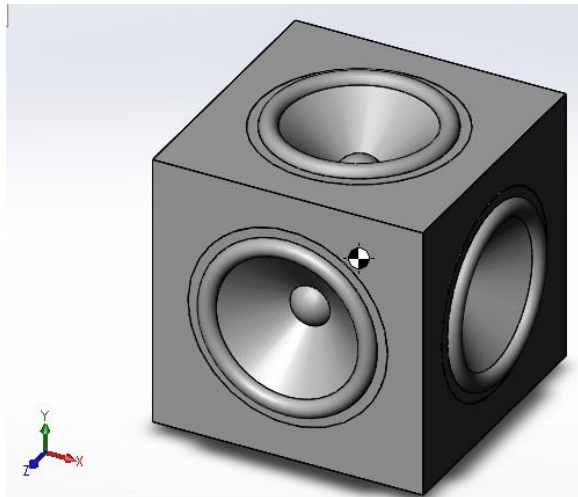
Gambar 3. 5 Penggabungan *driver* dan *enclosure Tetrahedron* pada perangkat lunak Solidwork 2016



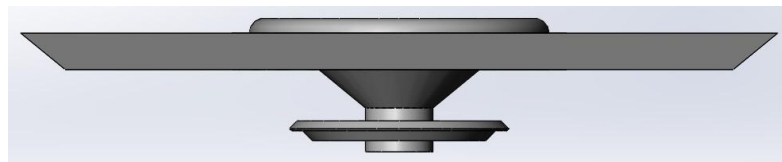
Gambar 3. 6 Hasil penggabungan (*assembly*) untuk *tetrahedron* pada *software* Solidwork 2016



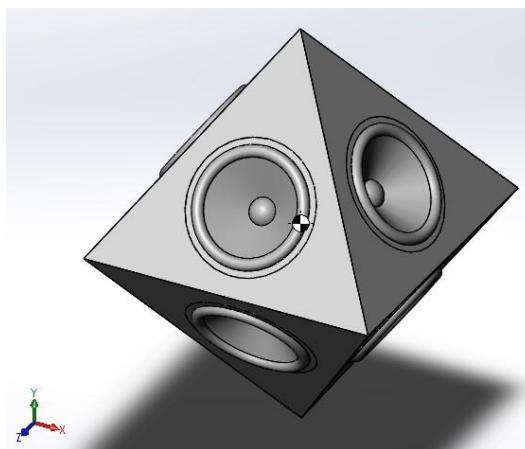
Gambar 3. 7 Penggabungan *driver* dan *enclosure Hexahedron* pada perangkat lunak Solidwork 2016



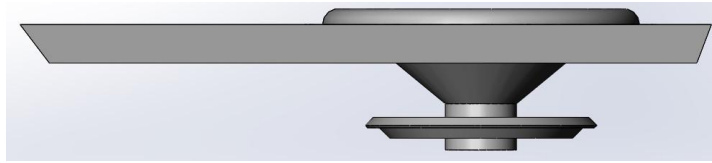
Gambar 3. 8 Hasil penggabungan (*assembly*) untuk *hexahedron* pada *software* Solidwork 2016



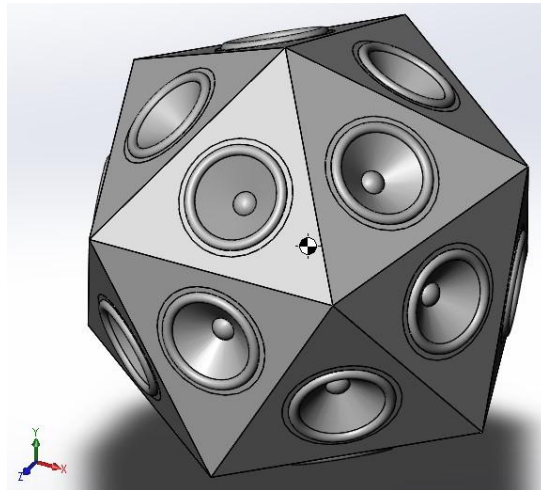
Gambar 3. 9 Penggabungan *driver* dan *enclosure Octahedron* pada perangkat lunak Solidwork 2016



Gambar 3. 10 Hasil penggabungan (*assembly*) untuk *octahedron* pada *software* Solidwork 2016



Gambar 3. 11 Penggabungan *driver* dan *enclosure Icosahedron* pada perangkat lunak Solidwork 2016



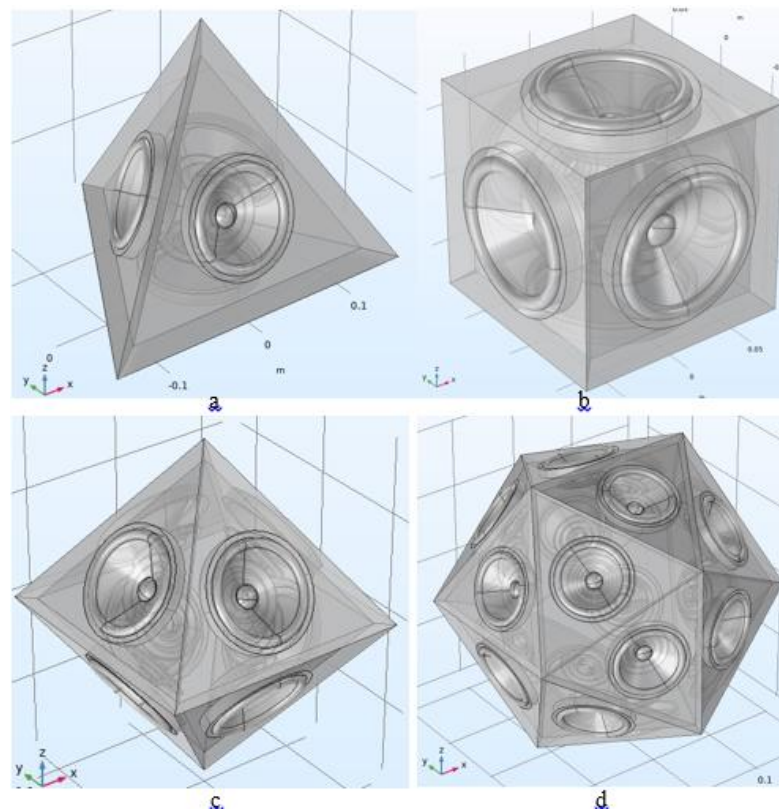
Gambar 3. 12 Hasil penggabungan (*assembly*) untuk *Icosahedron* pada *software* Solidwork 2016

3.4 Simulasi *Loudspeaker Polyhedron*

Simulasi *Loudspeaker* dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* COMSOL Multiphysics. *Software* ini merupakan *software* yang dapat digunakan untuk mensimulasikan *finite element analysis*, *solver* dan *Multiphysics*. Pengerjaan tugas akhir ini menggunakan *physics interface Acoustic-Shell Interaction, Frequency Domain* yang menggabungkan *interface pressure acoustic frequency domain* dan *Shell* untuk menghubungkan variasi tekanan akustik pada domain fluida dengan *shell deformation* pada *shell boundary*. Pengerjaan dalam *software* ini terbagi menjadi 5 tahap yakni pembuatan geometri, pendefinisian *boundary*, *input* data dan variabel, *meshing* dan *running*.

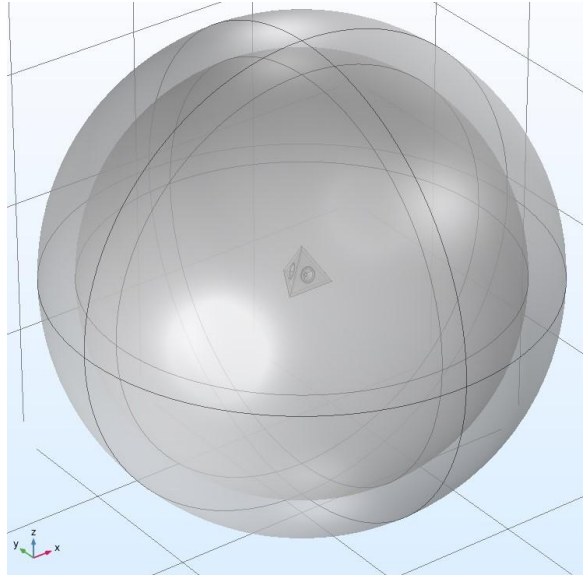
3.4.1 Pembuatan geometri

Pembuatan geometri dilakukan untuk membuat model *loudspeaker* dan *boundary* yang akan digunakan dalam simulasi. Pembuatan geometri *loudspeaker* dilakukan dengan cara *import* model dari perangkat lunak solidwork 2016 sesuai gambar 3.13.



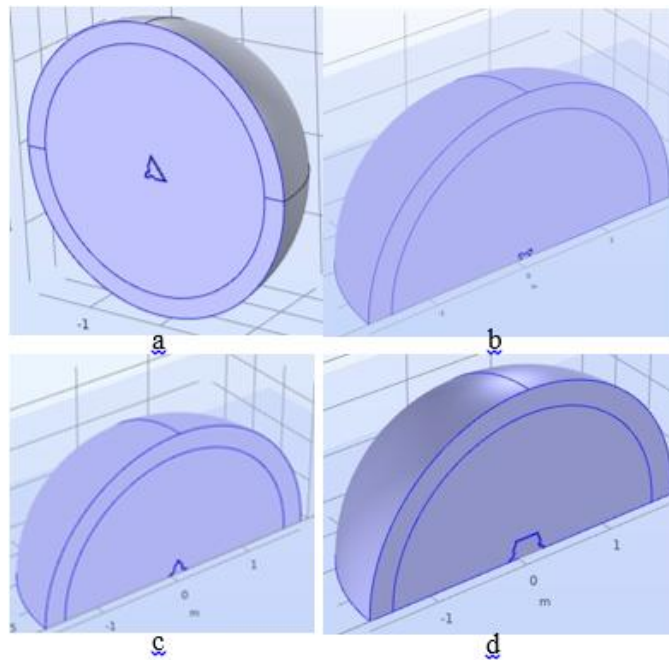
Gambar 3. 13 Geometri Model *Loudspeaker* pada *Software COMSOL Multiphysics* a. *Tetrahedron*, b. *hexahedron*, c. *octahedron*, dan d. *icosahedron*

Setelah dilakukan *import*, pembuatan geometri *boundary* untuk seluruh *loudspeaker Polyhedron* dibuat sesuai gambar 3.7. Geometri *boundary* dibuat menyerupai bola dengan 2 lapisan. Lapisan pertama yang memiliki radius 1,5m merupakan *boundary* udara yang mengelilingi model *loudspeaker*. Sedangkan lapisan kedua yang memiliki radius 1,75m merupakan *boundary* udara yang sifatnya sangat menyerap suara.



Gambar 3. 14 *Boundary* yang digunakan pada simulasi

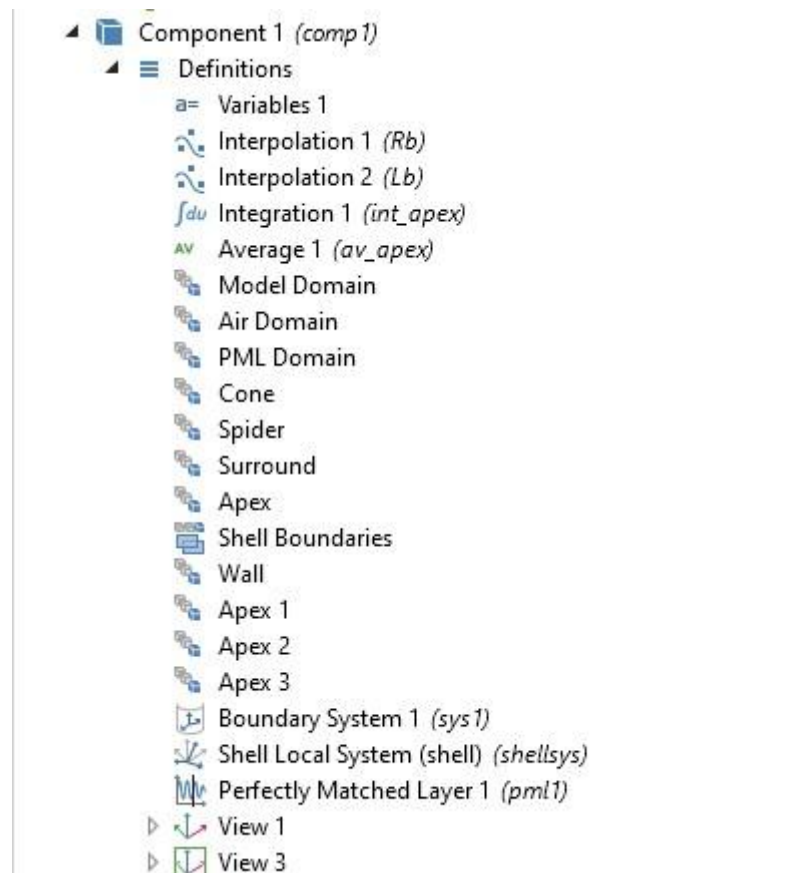
Geometri *loudspeaker Polyhedron* yang dibuat memiliki simetrinya masing-masing sehingga geometri tersebut dapat dipotong menjadi 2 bagian untuk *tetrahedron* dan 4 bagian simetris untuk *hexahedron*, *octahedron* dan *icosahedron* sesuai gambar 3.15. Pemotongan ini dilakukan untuk menghemat waktu komputasi dan penggunaan *memory* PC. Sehingga hasil dari simulasi akan dicerminkan pada arah vertikal sesuai dengan gambars 3.15.



Gambar 3. 15 Simetri yang digunakan untuk simulasi a. *tetrahedron*, b. *hexahedron*, c. *octahedron*, d. *icosahedron*

3.4.2 Pendefinisian *Boundary*

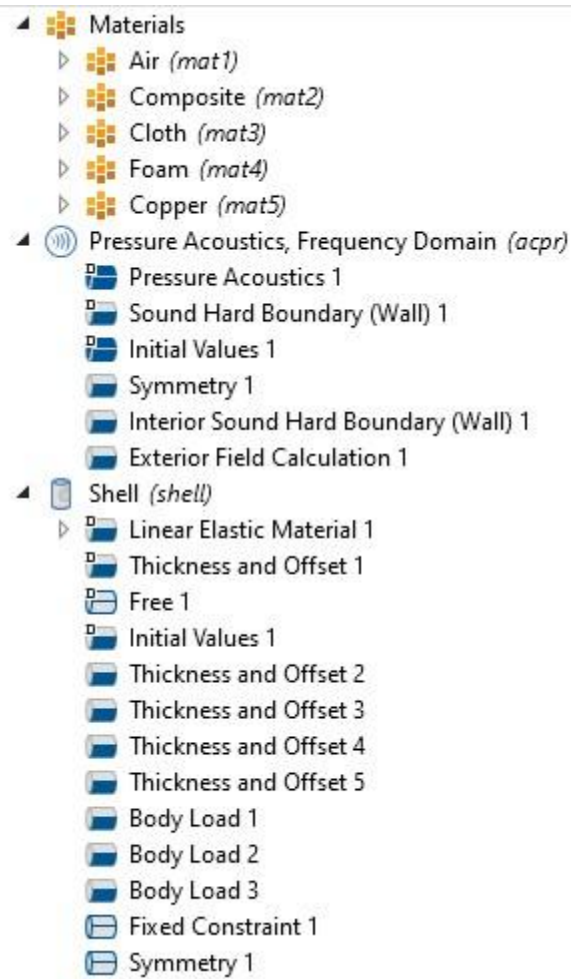
Pendefinisian geometri dilakukan setelah seluruh geometri dibuat. Pendefinisian geometri ini dilakukan dengan tujuan untuk memberikan batasan dan inisiasi pada geometri yang digunakan mulai dari pendefinisian *apex*, *spider*, *cone*, *surround*, model domain, *air* domain, PML domain dan beberapa pendefinisian lainnya sesuai dengan gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Pendefinisian *Boundary*

3.4.3 *Input Data dan Variabel*

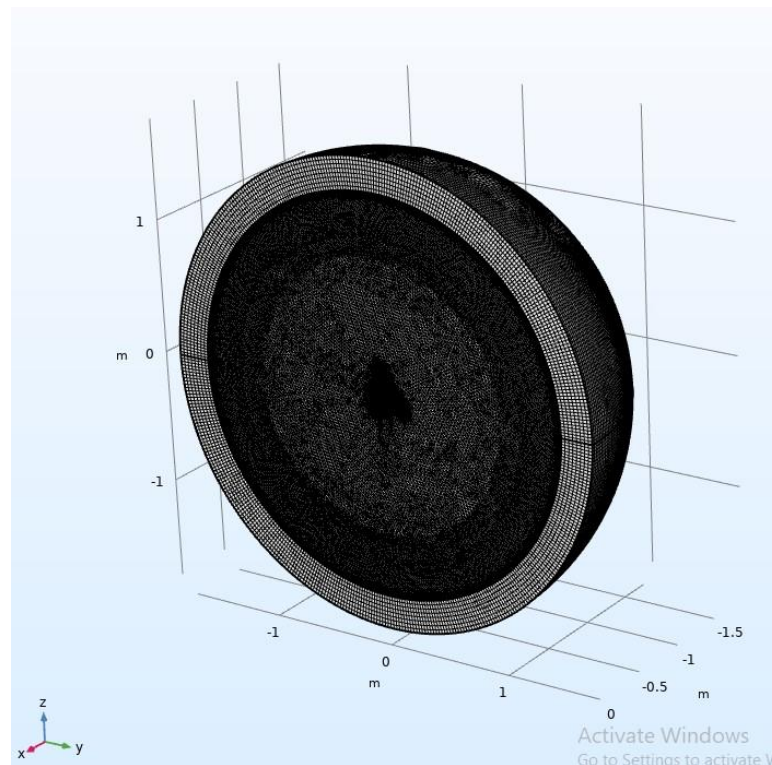
Setelah dilakukan pendefinisian *boundary*, beberapa data dan variabel yang digunakan termasuk pemilihan material pada setiap *boundary* dilakukan. Material yang digunakan antara lain udara (*air*) untuk *boundary* udara, *composite* untuk *cone speaker*, *cloth* untuk *spider speaker*, *foam* untuk *surround speaker* dan *copper* untuk *apex/voice coil speaker*. Variabel seperti *driving voltage*, *body load* dan beberapa variabel lainnya dari *loudspeaker* yang dibutuhkan untuk simulasi juga di-*input* pada tahap ini sesuai dengan gambar 3.17.



Gambar 3. 17 *Input Data dan Variabel pada simulasi*

3.4.4 Meshing

Meshing dilakukan setelah seluruh pendefinisian dan *input data* dan variabel dilakukan. Metode *meshing* yang dilakukan adalah *user-controlled mesh* atau *manual meshing*. Dengan metode ini, pengguna bisa menyesuaikan ukuran dan bentuk yang diinginkan untuk menyesuaikan dengan kondisi dan bentuk geometri yang digunakan. Dalam perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*, nilai tingkat konvergen terbesar yang dapat diproses sebesar 0,1. Hasil *meshing* dari model *loudspeaker* yang dibuat terdapat pada gambar 3.18 untuk *tetrahedron* sebagai salah satu contoh hasil *meshing*.



Gambar 3. 18 Hasil *Meshing* dari model *loudspeaker*

3.4.5 *Running*

Running simulasi dilakukan setelah seluruh persiapan dilakukan termasuk *meshing* mencapai ketentuan yang diinginkan. Pada saat *running* dilakukan pula inisiasi variabel berupa variabel frekuensi yang ingin di analisis. Frekuensi yang digunakan adalah frekuensi sepertiga oktaf pada rentang 63Hz-2000Hz karena terbatasnya *memory* PC untuk melakukan komputasi.

3.5 Analisis, Evaluasi dan Pembahasan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, diperlukan analisis dan evaluasi untuk mengetahui kinerja dari masing-masing *loudspeaker*. Variabel yang diamati pada tahap ini adalah nilai *sound pressure level*, *directivity*, frekuensi *cut-off* dan respon frekuensi. Dari hasil tersebut, dilakukan pembahasan untuk memberikan rekomendasi yang dapat digunakan untuk membuat *loudspeaker Polyhedron* yang sesuai dengan standar yang berlaku.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kinerja Loudspeaker Dodecahedron

Loudspeaker Dodecahedron yang pada tugas akhir sebelumnya telah dianalisis, dilakukan analisis lebih lanjut pada pola radiasi dan beberapa parameter lainnya menggunakan bantuan *software* Comsol Multiphysics 5.4. Beberapa parameter tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran yang telah dilakukan. Dari analisis ini diharapkan didapatkan batasan-batasan tertentu untuk menghasilkan *loudspeaker Polyhedron* dengan kinerja maksimal sesuai dengan standar yang berlaku. Selain itu, pola radiasi dari *loudspeaker dodecahedron* juga dibandingkan dengan plot *spherical harmonic function*.

4.1.1 Tingkat Tekanan Bunyi

(Pasqual A. , 2014) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa semakin rendah nilai k_a , maka *gain* pada setiap komponen harmonik perambatan suara pada arah radial akan semakin kecil. Penambahan *gain* yang semakin kecil ini membuat nilai tingkat tekanan bunyi menjadi seragam dan keterarahan dari *loudspeaker* akan semakin mendekati *omnidirectional*. Simulasi yang dilakukan dengan bantuan *software* COMSOL Multiphysics untuk *loudspeaker dodecahedron* dengan variasi dimensi *driver* 2,5inch, 4inch, dan 5inch menggunakan *boundary layer* dengan jarak 1,5m dari pusat *loudspeaker*. Jarak tersebut dipilih karena berada pada medan jauh (*far field*). Berikut merupakan nilai tingkat tekanan bunyi berdasarkan simulasi dengan *software* COMSOL Multiphysics dan pengukuran untuk ketiga variasi dimensi *driver* pada ruangan *anechoic* berdasarkan (Purwanto, 2019).

Tabel 4. 1 Nilai Tingkat Tekanan Bunyi (TTB) *Loudspeaker Dodecahedron* 2.5inch Pada *Anechoic Chamber* Berdasarkan Pengukuran Dan Simulasi

NO.	FREKUENSI (Hz)	TINGKAT TEKanan BUNYI (TTB/SPL) dBA		
		Simulasi	<i>Anechoic Chamber</i>	Error (%)
1.	125Hz	71	64	11
2.	250Hz	87	68	28
3.	500Hz	99	64	55
4.	1000Hz	61	59	3
5.	2000Hz	58	56	4

Tabel 4. 2 Nilai Tingkat Tekanan Bunyi (TTB) *Loudspeaker Dodecahedron* 4inch Pada *Anechoic Chamber* Berdasarkan Pengukuran Dan Simulasi

NO.	FREKUENSI (Hz)	TINGKAT TEKanan BUNYI (TTB/SPL) dBA		
		Simulasi	<i>Anechoic Chamber</i>	Error (%)
1.	125Hz	96	91	5
2.	250Hz	107	83	29
3.	500Hz	964	72	31
4.	1000Hz	69	65	6
5.	2000Hz	68	67	1

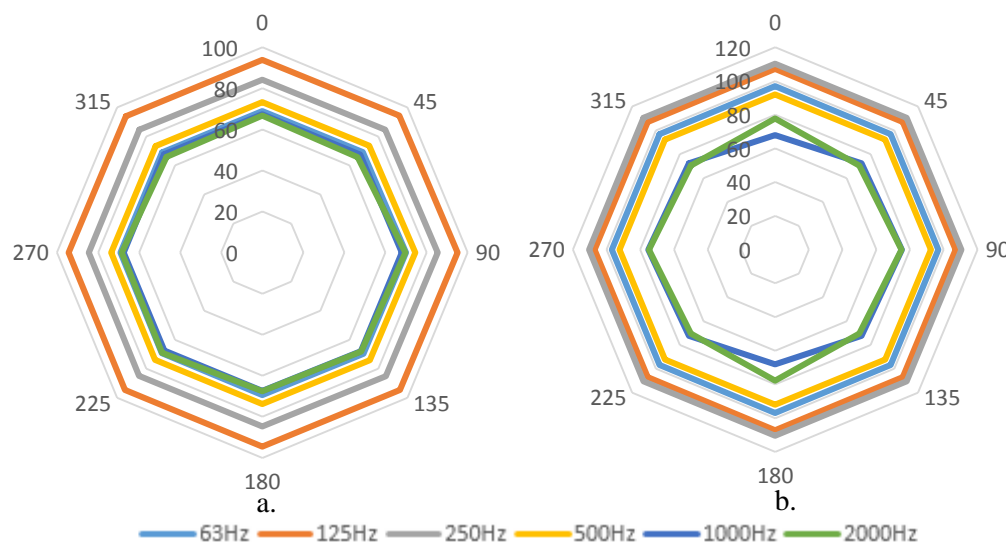
Tabel 4. 3 Nilai Tingkat Tekanan Bunyi (TTB) *Loudspeaker Dodecahedron* 5inch Pada *Anechoic Chamber* Berdasarkan Pengukuran dan Simulasi

NO.	FREKUENSI (Hz)	TINGKAT TEKanan BUNYI (TTB/SPL) dBA		
		Simulasi	<i>Anechoic Chamber</i>	Error (%)
1.	125Hz	107	94	14
2.	250Hz	111	85	31
3.	500Hz	93	74	26
4.	1000Hz	73	68	7
5.	2000Hz	75	68	10

Berdasarkan *error* yang dihasilkan dari penelitian sebelumnya, dapat diprediksi nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan dari *loudspeaker Polyhedron* lain saat pengukuran ketika hanya dilakukan simulasi. *Error* yang dihasilkan dapat terjadi karena pada sebuah pengukuran terdapat *displacement* yang mengakibatkan nilai Tingkat Tekanan Bunyi menurun. Sedangkan pada simulasi *displacement* tidak memberi pengaruh terhadap nilai Tingkat Tekanan Bunyi yang dihasilkan.

4.1.2 Pola Radiasi

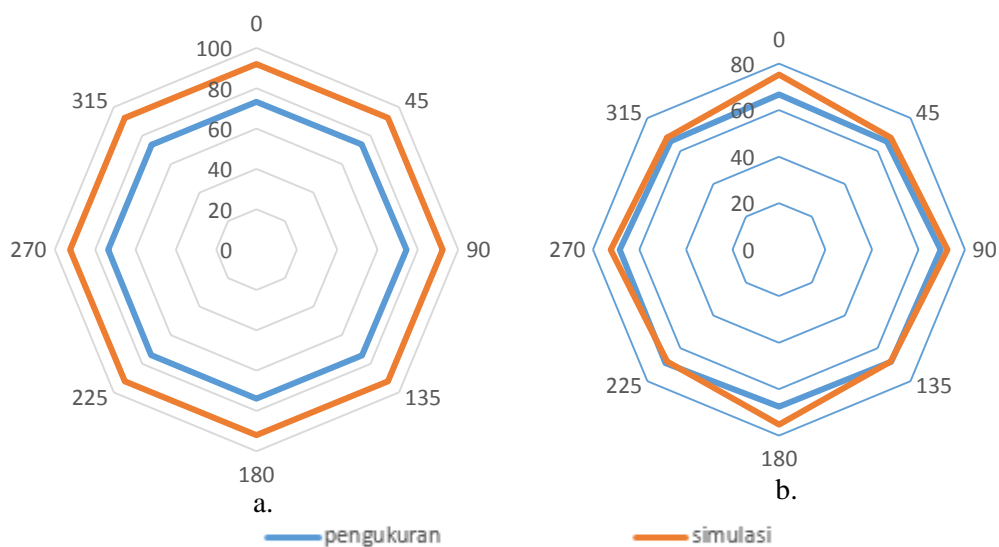
Pola Radiasi yang dihasilkan oleh *loudspeaker dodecahedron* berdasarkan simulasi dibandingkan dengan hasil pengukuran yang telah dilakukan oleh (Hanindita, 2018) dan (Ristanty, 2017). Pengukuran tersebut dilakukan pada *anechoic chamber*. Pengukuran dilakukan pada sudut 0° - 360° dengan interval sebesar 45° sesuai ISO 3745. Berikut merupakan pola radiasi yang dihasilkan oleh *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter 5inch, 4inch dan 2,5inch.



Gambar 4. 1 Pola Radiasi *Loudspeaker Dodecahedron* dengan diameter *driver* 5inch berdasarkan a. Pengukuran b. Simulasi

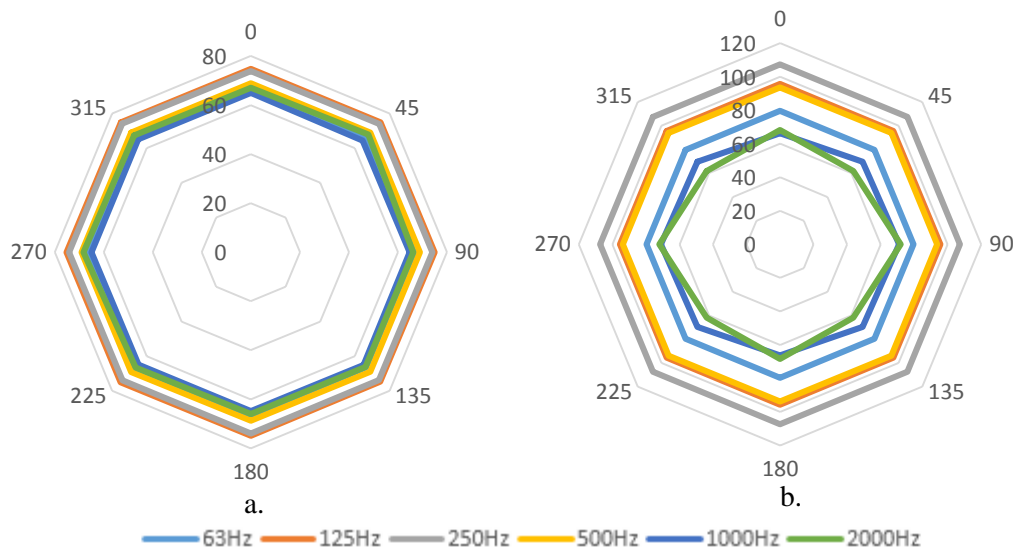
Berdasarkan gambar 4.1 didapatkan bahwa *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* 5inch memiliki pola radiasi yang baik pada frekuensi 63Hz-2000Hz. Pola ini ditunjukkan dengan nilai TTB pada setiap titik ukur memiliki nilai yang hampir sama dan memiliki bentuk menyerupai segi delapan sempurna yang menandakan bahwa *loudspeaker* ini memiliki pola keterarahan yang *omnidirectional* baik berdasarkan pengukuran (Gambar 4.1a). Gambar 4.1b

menunjukkan pola keterarahan dari *loudspeaker dodecahedron* berdasarkan simulasi, di mana ditunjukkan bahwa pada frekuensi 63Hz-1000Hz, *loudspeaker* memiliki pola keterarahan yang *omnidirectional*. Namun pada frekuensi 2000Hz nilai pada masing-masing titik ukur sudah hampir tidak serupa sehingga *loudspeaker* memiliki pola keterarahan yang *directional*. Apabila dibandingkan pada frekuensi tertentu didapatkan bahwa pada pengukuran dan simulasi terjadi selisih pada tiap titik ukurnya yakni pada sudut 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° . Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.2a dan 4.2b.



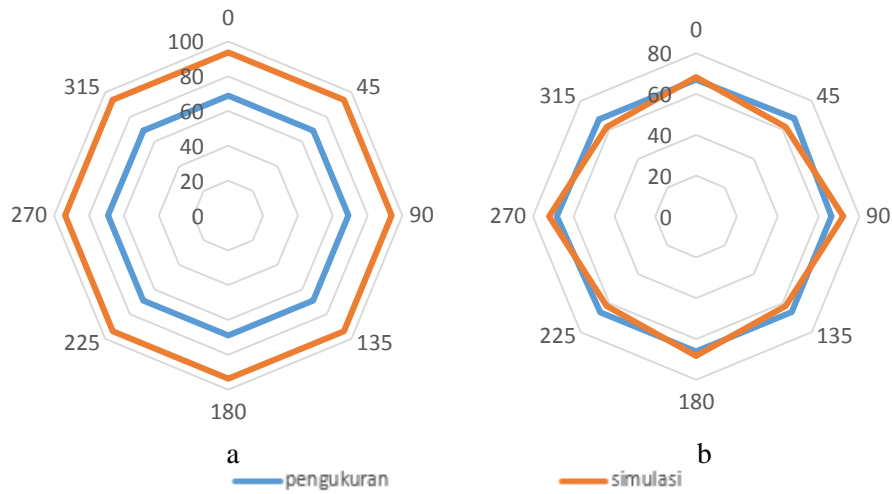
Gambar 4. 2 Perbandingan pola keterarahan *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* 5inch berdasarkan pengukuran dan simulasi pada frekuensi a. 500Hz dan b. 2000Hz

Gambar 4.2a dan 4.2b menunjukkan bahwa pada frekuensi rendah, selisih nilai TTB pada tiap sudut berdasarkan pengukuran dan simulasi sama. Hal ini dikarenakan nilai TTB pada masing-masing titik ukur memiliki nilai yang serupa yakni 18dB. Namun pada frekuensi tinggi, selisih nilai TTB pada tiap sudut berdasarkan simulasi dan pengukuran berbeda terutama pada sudut 0° dan 180° yang memiliki selisih paling besar yakni 11dB dibandingkan dengan titik sudut lainnya. Hal ini dikarenakan pada frekuensi tinggi nilai TTB yang dihasilkan pada titik ukur sudah tidak sama lagi dan bersifat *directional* sehingga nilai selisih yang dihasilkanpun berbeda.



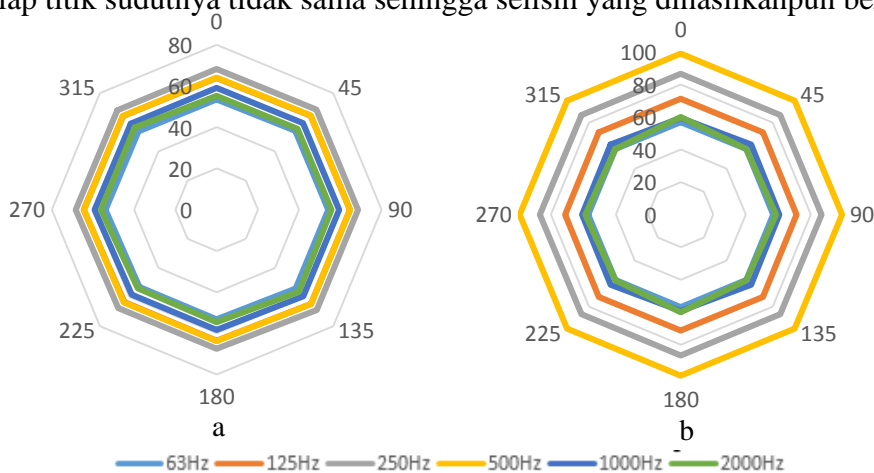
Gambar 4. 3 Pola Radiasi *Loudspeaker Dodecahedron* dengan diameter *driver* 4inch berdasarkan a. Pengukuran b. Simulasi

Berdasarkan gambar 4.3a didapatkan bahwa *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* 4inch memiliki pola keterarahan yang baik berdasarkan pengukuran pada rentang frekuensi 63Hz-2000Hz. Hal ini ditunjukkan dengan nilai TTB pada titik ukur sama dan memiliki bentuk menyerupai segi delapan sempurna sehingga dapat dikatakan bahwa *loudspeaker* ini bersifat *omnidirectional*. Namun, pada gambar 4.3b, *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter 4inch berdasarkan simulasi hanya memiliki pola keterarahan yang *omnidirectional* pada rentang frekuensi 63Hz-1000Hz. Pada frekuensi 2000Hz, *loudspeaker* tidak mampu menunjukkan pola keterarahan yang *omnidirectional*. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.3b, bahwa pada frekuensi 2000Hz, nilai TTB pada tiap titik ukurnya berbeda sehingga *loudspeaker* memiliki pola keterarahan yang *directional*. Pada pengukuran dan simulasi terjadi selisih pada tiap titik ukurnya yakni pada sudut 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, dan 315°. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.4a dan 4.4b.



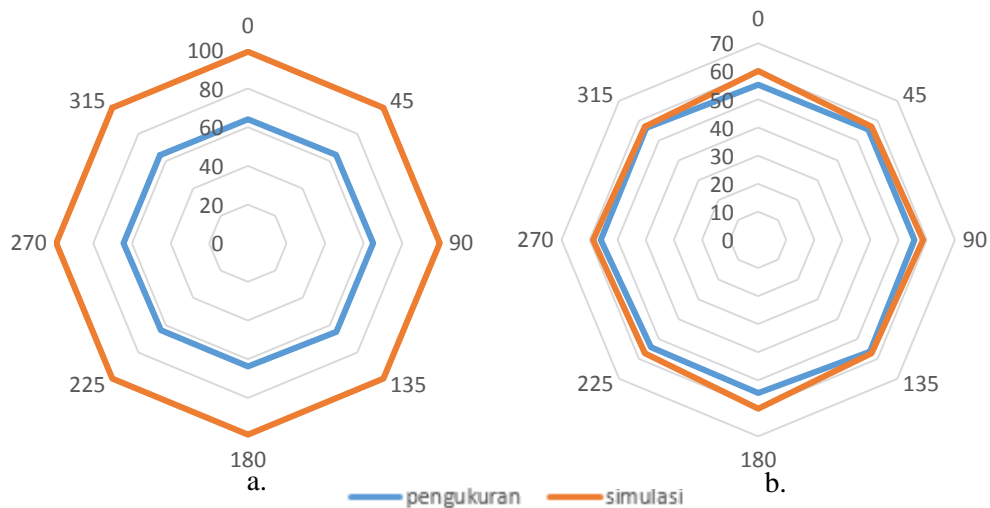
Gambar 4. 4 Perbandingan pola keterarahan *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* 4inch berdasarkan pengukuran dan simulasi pada frekuensi a. 500Hz dan b. 2000Hz

Gambar 4.4a menunjukkan bahwa pada frekuensi rendah, selisih nilai TTB berdasarkan pengukuran dan simulasi di tiap titik sudutnya adalah sama. Hal ini dikarenakan pada frekuensi tersebut, nilai TTB pada masing-masing titik sudut atau titik ukur, baik pada simulasi maupun pengukuran, adalah sama yakni sebesar 25dB. Namun pada frekuensi tinggi, selisih TTB berdasarkan pengukuran dan simulasi di tiap titik sudutnya berbeda terutama pada titik sudut 45°, 90° dan 315° yang memiliki nilai selisih TTB tertinggi yakni sebesar 6dB dibandingkan pada titik sudut lainnya. Hal ini dikarenakan pada frekuensi tinggi nilai TTB yang dihasilkan pada tiap titik sudutnya tidak sama sehingga selisih yang dihasilkan pun berbeda.



Gambar 4. 5 Pola Radiasi *Loudspeaker Dodecahedron* dengan diameter *driver* 2,5inch berdasarkan a. Pengukuran b. Simulasi

Berdasarkan gambar 4.5a didapatkan bahwa pada pengukuran, *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter 2,5inch memiliki pola keterarahan yang baik direntang frekuensi 63Hz-2000Hz. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.5a, bahwa nilai TTB yang diukur pada masing-masing sudut memiliki nilai yang sama dan memiliki bentuk yang menyerupai segi delapan sempurna sehingga dapat dikatakan bahwa *loudspeaker* ini memiliki pola keterarahan yang *omnidirectional*. Namun berdasarkan simulasi sesuai dengan dengan gambar 4.5b, didapatkan bahwa *loudspeaker* hanya bersifat *omnidirectional* pada rentang frekuensi 63Hz-1000Hz. Pada frekuensi 2000Hz, bentuk yang dihasilkan sudah tidak menyerupai segi delapan sempurna. Hal ini dibuktikan dengan gambar 4.5b di mana nilai TTB yang dihasilkan pada tiap titik ukur atau titik sudut di frekuensi 2000Hz tidak sama. Oleh karena itu, *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter 2,5inch tidak bersifat *omnidirectional* pada frekuensi diatas 2000Hz. Apabila dibandingkan pada frekuensi tertentu, dapat dikatakan bahwa terjadi selisih pada pengukuran dan simulasi pada sudut 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° . Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.6a dan 4.6b.



Gambar 4. 6 Perbandingan pola keterarahan *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* 2,5inch berdasarkan pengukuran dan simulasi pada frekuensi a. 500Hz dan b. 2000Hz

Gambar 4.6a menunjukkan bahwa pada frekuensi rendah, selisih yang dihasilkan antara pengukuran dan simulasi adalah sama pada masing-masing titik ukur yakni sebesar 18dB. Namun pada frekuensi tinggi, selisih yang dihasilkan

antara pengukuran dan simulasi berbeda pada tiap titik ukurnya terutama pada titik sudut 0° dan 180° yang memiliki nilai selisih terbesar yakni 5dB dibandingkan dengan titik ukur lainnya. Hal ini dikarenakan pada frekuensi tinggi nilai TTB yang dihasilkan pada tiap titik ukur tidak sama sehingga selisih yang dihasilkan pun tidak sama pula.

Dari ketiga *loudspeaker dodecahedron* diatas, dapat dikatakan bahwa pada frekuensi tinggi *loudspeaker* cenderung untuk bersifat *directional*. Hal ini sesuai dengan apa yang dikatakan oleh (Leishman, 2006) di mana sebuah *loudspeaker* yang tersusun dengan geometri *platonic solid* atau RPL (*Regular Polyhedral Loudspeaker*) tidak mampu menghasilkan pola radiasi yang *omnidirectional* di seluruh frekuensinya. Hal ini diakibatkan karena *loudspeaker* memiliki batasan atau yang disebut dengan *omnidirectional cut-off frequency*.

Selain itu, nilai selisih yang besar berdasarkan pengukuran dan simulasi cenderung terjadi pada frekuensi rendah. Hal ini dikarenakan pada frekuensi rendah dalam pengukuran, energi listrik yang dihasilkan untuk diubah menjadi energi bunyi cenderung berubah menjadi energi vibrasi pada *cone*, sedangkan pada simulasi faktor perubahan ini tidak dijadikan parameter atau tidak diperhitungkan, sehingga selisih yang dihasilkan semakin besar.

Pola Radiasi dari sebuah *loudspeaker dodecahedron* yang telah dihasilkan pada *loudspeaker* dibandingkan dengan plot yang dibentuk oleh *spherical harmonics function* pada persamaan (2.3). Terdapat empat nilai variasi dari m dan n di mana m merupakan *degree* dari *spherical harmonics function* dan n merupakan *order* dari *spherical harmonics function*. Variasi tersebut meliputi nilai m dan n sama-sama genap, nilai m dan n sama-sama ganjil, nilai m bernilai genap dan n ganjil serta nilai m bernilai ganjil dan n genap. Berikut merupakan hasil persamaan dengan variasi nilai *order* dan *degree*.

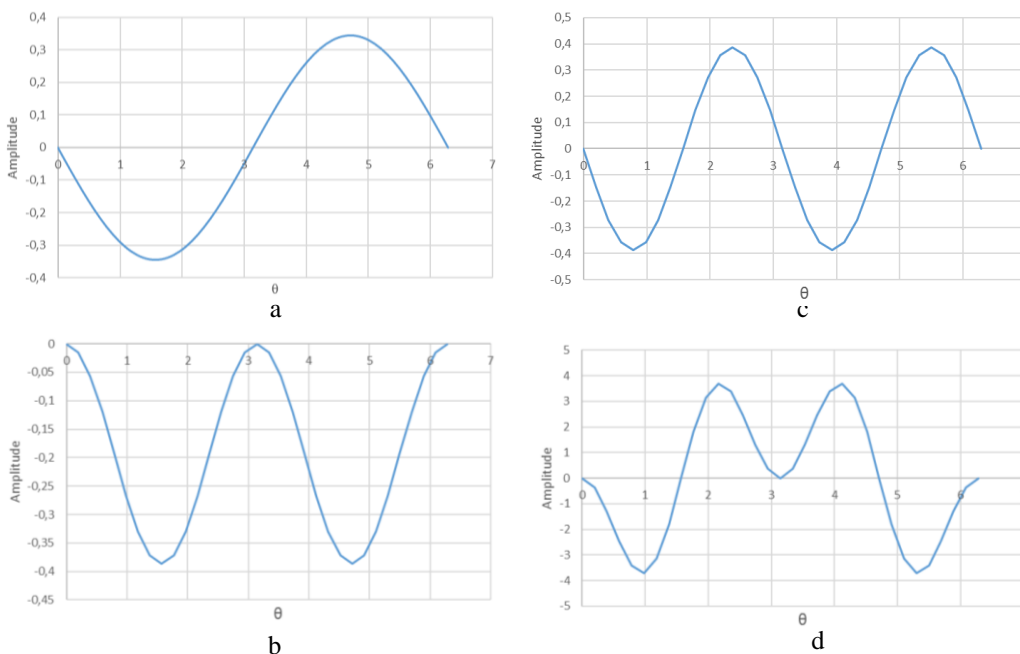
$$Y_1^1(\theta, \varphi) = -\sqrt{\frac{3}{8\pi}} 3 \sin \theta e^{i\varphi} \quad (4.1)$$

$$Y_2^2(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{5}{96\pi}} 3 \sin^2 \theta e^{2i\varphi} \quad (4.2)$$

$$Y_2^1(\theta, \varphi) = -\sqrt{\frac{5}{24\pi}} 3 \sin \theta \cos \theta e^{i\varphi} \quad (4.2)$$

$$Y_3^2 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{105}{2\pi}} \sin^2 \theta \cos \theta e^{2i\varphi} \quad (4.2)$$

Berdasarkan persamaan tersebut dihasilkan grafik secara dua dimensinya sesuai dengan gambar 4.7. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai orde yang digunakan maka semakin kecil nilai *amplitude* atau *gain* yang dihasilkan dari persamaan *spherical harmonics*. Semakin kecilnya nilai *amplitude* atau *gain* ini menandakan bahwa nilai tingkat tekanan bunyi yang dikeluarkan oleh suatu sumber akan semakin besar. Hal ini juga ditunjukkan pada grafik di mana pada *order* yang tinggi akan terjadi interferensi dari gelombang yang terbentuk.

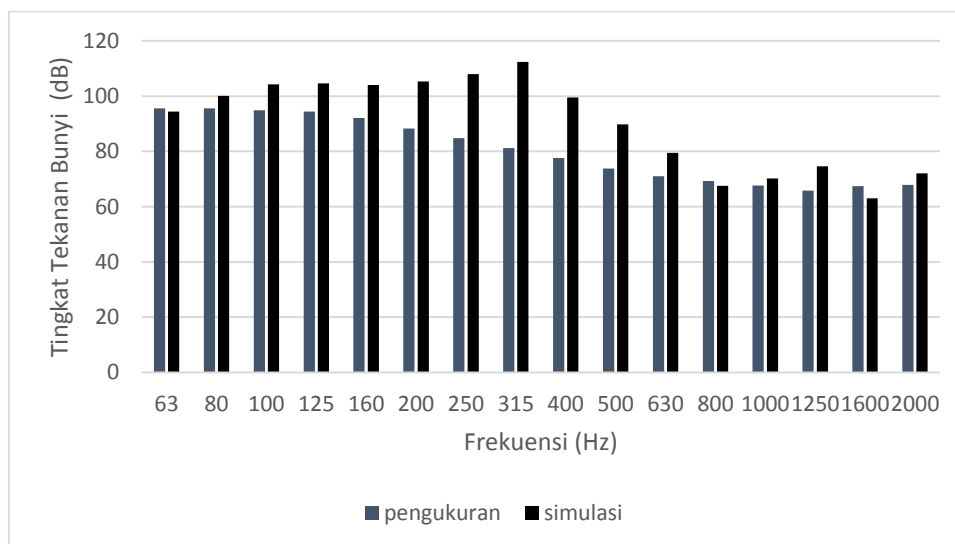


Gambar 4. 7 Plot 2D dari Spherical Harmonic untuk variasi a. $m=1$ $n=1$; b. $m=2$ $n=2$; c. $m=1$ $n=2$; dan d. $m=2$ $n=3$

(Pasqual A. , 2014) dalam penelitiannya mengatakan bahwa semakin tinggi nilai *order* yang digunakan maka osilasi akan bergerak lebih cepat pada sumbu (θ, ϕ) . Pada frekuensi rendah, dengan orde *harmonic spheris* yang tinggi mengakibatkan *radiation efficiency* rendah. Namun seiring dengan meningkatnya frekuensi, *radiation efficiency* akan meningkat dan menyebabkan sebuah *loudspeaker* tidak mampu menghasilkan sumber yang omni (Pasqual A. M., 2010).

4.1.3 Respon Frekuensi

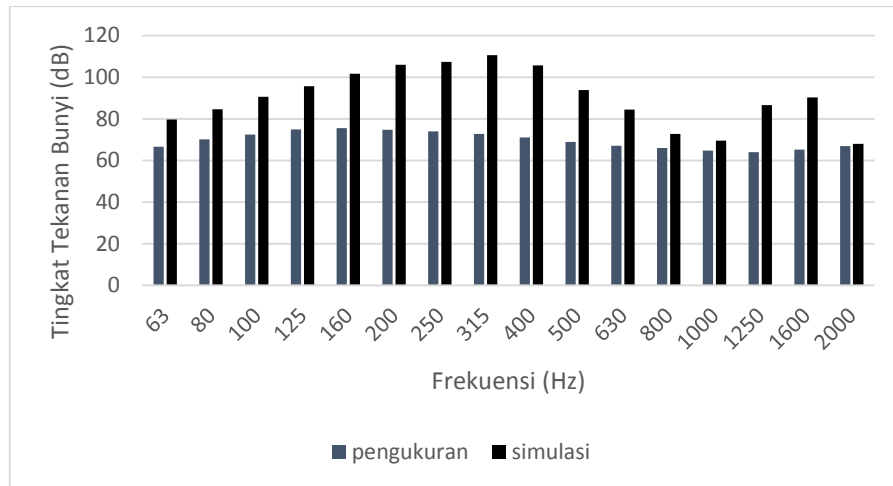
Respon frekuensi menunjukkan rentang frekuensi yang dapat didengarkan oleh manusia ketika *loudspeaker* dibunyikan. Respon frekuensi biasanya ditunjukkan dalam bentuk grafik tingkat tekanan bunyi terhadap frekuensi. Berikut merupakan respon frekuensi dari *loudspeaker dodecahedron* 5inch, 4inch dan 2,5inch berdasarkan simulasi dan pengukuran.



Gambar 4. 8 Respon Frekuensi *Loudspeaker Dodecahedron* Diameter 5inch

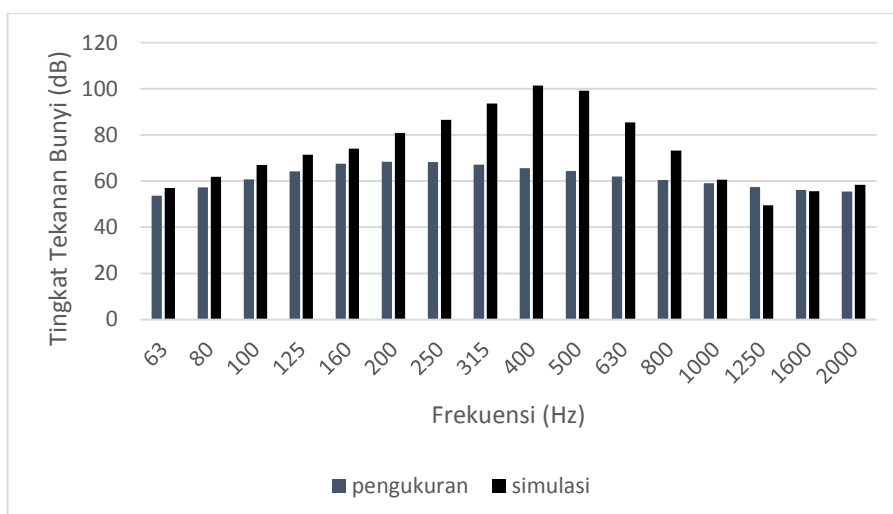
Gambar 4.8 menunjukkan bahwa *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* 5inch mampu menghasilkan rentang frekuensi yang dapat didengar manusia sebesar 63Hz-2000Hz baik secara simulasi maupun pengukuran. *Loudspeaker* ini mampu menghasilkan tingkat tekanan bunyi dengan rentang 66dB – 96dB secara pengukuran dan 63dB – 112dB secara simulasi. Namun berdasarkan gambar tersebut, respon dari *loudspeaker* menurun mulai frekuensi 800Hz. Hal ini menunjukkan bahwa pada frekuensi tersebut *loudspeaker* kurang mampu untuk

menghasilkan suara yang baik. Tetapi hal tersebut dapat diatasi dengan cara mengatur *gain* yang diberikan kepada *loudspeaker*.



Gambar 4. 9 Respon Frekuensi *Loudspeaker Dodecahedron* Diameter 4inch

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa *loudspeaker* dengan diameter *driver* 4inch mampu menghasilkan suara yang *audible* pada rentang frekuensi 63Hz-2000Hz. *Loudspeaker* ini mampu menghasilkan tingkat tekanan bunyi pada rentang 64dB – 76dB secara pengukuran dan 68dB – 111dB secara simulasi. Namun pada frekuensi tinggi, *loudspeaker* mengalami penurunan respon mulai dari frekuensi 1000Hz. Penurunan sensitivitas ini menyebabkan *loudspeaker* tidak mampu menghasilkan suara yang baik. Hal ini dapat diatasi dengan mengatur *gain* yang diberikan kepada *loudspeaker* dengan memperhatikan frekuensi lainnya.



Gambar 4. 10 Respon Frekuensi *Loudspeaker Dodecahedron* Diameter 2,5inch

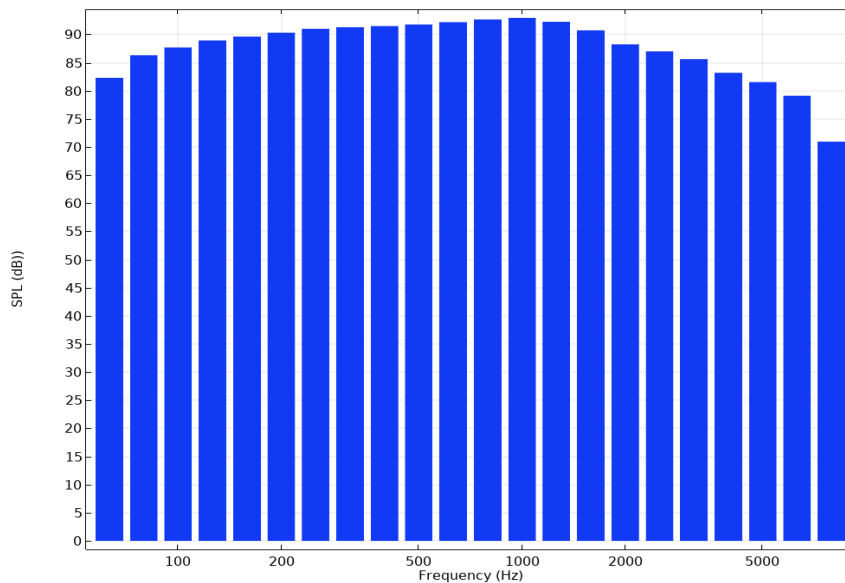
Gambar 4.10 menunjukkan respon frekuensi *loudspeaker dodecahedron* dengan diameter *driver* sebesar 2,5inch. Grafik tersebut menunjukkan bahwa *loudspeaker* hanya mampu menghasilkan respon frekuensi yang flat pada rentang 63Hz-800Hz. Ketika frekuensi yang dibunyikan melebihi 1000Hz, *loudspeaker* tidak mampu menghasilkan suara yang baik dikarenakan respon yang dihasilkan menurun. Untuk mengatasi hal tersebut, *gain* yang diberikan pada *loudspeaker* dapat diubah dengan mempertimbangkan frekuensi lainnya. *Loudspeaker* ini mampu menghasilkan nilai tingkat tekanan bunyi dengan rentang 54dB – 68dB berdasarkan pengukuran dan 49dB – 101dB berdasarkan simulasi. Perbedaan hasil pengukuran dan simulasi tersebut dapat disebabkan oleh adanya beberapa parameter yang tidak dimasukkan kedalam simulasi antara lain besarnya *cone displacement* atau perubahan energi listrik ke energi vibrasi yang dihasilkan oleh *loudspeaker* (Purwanto, 2019).

4.2 Pemodelan Loudspeaker Polyhedron

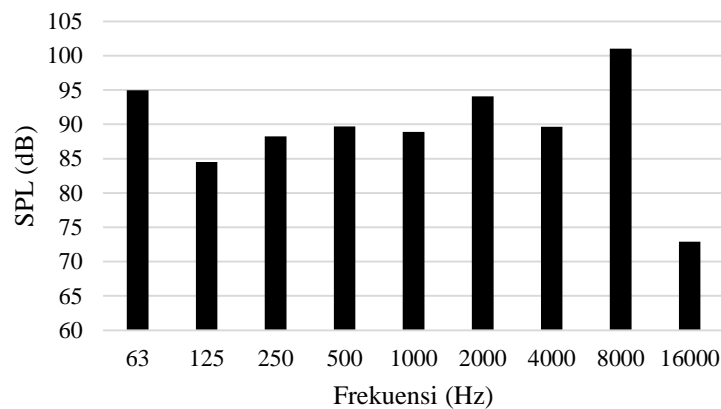
Loudspeaker yang disimulasikan akan digunakan sebagai alternatif dari *loudspeaker dodecahedron* untuk pengukuran akustik ruang. Oleh karena itu, desain target yang diajukan sesuai dengan penelitian (Purwanto, 2019) (Hanindita, 2018) (Ristanty, 2017) sebelumnya yakni sebagai berikut:

- a. Mampu menghasilkan respon frekuensi yang *flat* pada rentang frekuensi 80Hz-4000Hz
- b. Memiliki tingkat tekanan bunyi sebesar 90-100dB
- c. Memiliki *omnidirectional directivity*

Pemodelan *loudspeaker* yang dibuat untuk dilakukan simulasi mengacu pada batasan yang terdapat pada persamaan 2.7. *Driver speaker* yang digunakan mengacu pada *driver* yang umumnya tersedia di pasaran dengan diameter 4inch dengan merek dagang SBAcoustics 4” SB12CACS25-8 (spesifikasi tertera di lampiran).

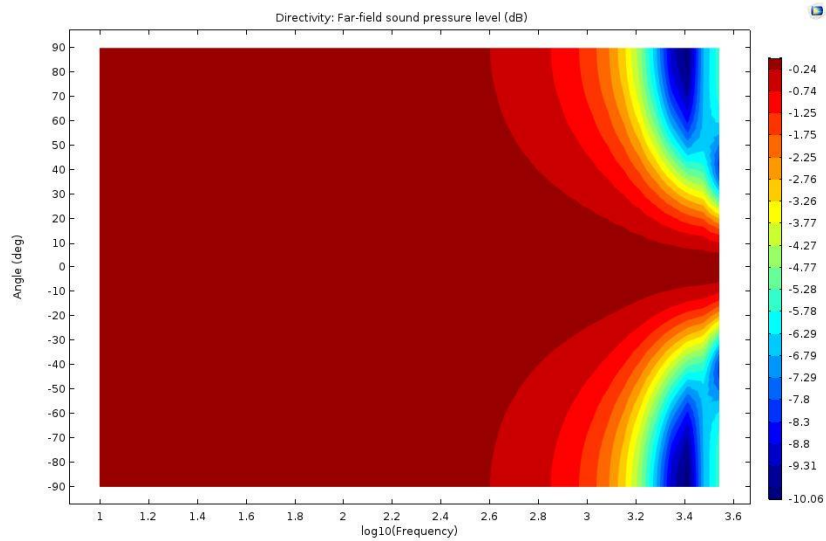


Gambar 4.11 Hasil simulasi respon frekuensi *driver* 4inch

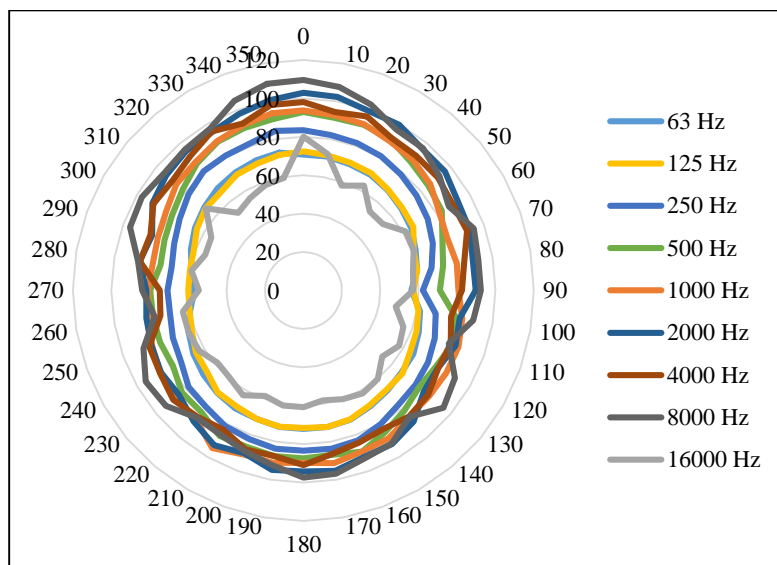


Gambar 4.12 Hasil pengukuran respon frekuensi *driver* 4inch

Gambar 4.11 merupakan gambar yang menunjukkan respon frekuensi dari *driver* 4inch berdasarkan hasil simulasi. Sedangkan gambar 4.12 merupakan gambar yang menunjukkan respon frekuensi dari *driver* 4inch berdasarkan hasil pengukuran. Berdasarkan kedua gambar tersebut dapat dikatakan bahwa *driver* ini tidak memiliki respon frekuensi yang *flat*. Namun berdasarkan simulasi, *driver* mampu menghasilkan tingkat tekanan bunyi 79dB-90dB dan berdasarkan pengukuran *driver* mampu menghasilkan tingkat tekanan bunyi 89dB-90dB. Hal ini menunjukkan bahwa *driver* menunjukkan kinerja yang lebih baik pada hasil pengukuran.



Gambar 4. 13 Pola keterarahan *driver* 4inch berdasarkan simulasi

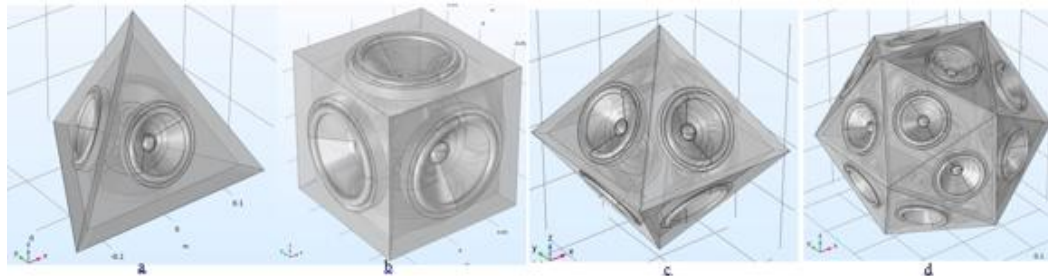


Gambar 4. 14 Pola keterarahan *driver* 4inch berdasarkan hasil pengukuran

Gambar 4.13 menunjukkan pola keterarahan dari *driver speaker* berdasarkan simulasi yang akan digunakan dengan kontur warna menunjukkan nilai *directivity index*nya di mana warna merah pekat menyatakan bahwa nilai *directivity index* tidak melebihi 0,5dB. Dari gambar 4.14 tersebut didapatkan bahwa *driver* memiliki pola keterarahan yang *omnidirectional* pada frekuensi dibawah 63Hz dan menjadi *directional* pada rentang 63Hz-16000Hz. Berdasarkan pengukuran dengan hasil yang ditunjukkan pada gambar 4.14, didapatkan bahwa *driver* tidak memiliki pola keterarahan yang *omnidirectional* pada rentang frekuensi 63Hz-16000Hz. Hal ini

ditunjukkan pada gambar 4.14 di mana pola yang terbentuk tidak ada yang menyerupai lingkaran.

Berdasarkan data yang didapatkan dari simulasi dan pengukuran untuk *driver* SBAcoustics 4" SB12CACS25-8 dibuat pemodelan untuk *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron*. Berikut merupakan spesifikasi dimensi dan model dari *loudspeaker*.



Gambar 4. 15 Geometri Model *Loudspeaker* a. *Tetrahedron*, b. *hexahedron*, c. *octahedron*, dan d. *icosahedron*

Tabel 4. 4 Spesifikasi Dimensi *Loudspeaker*

No	Parameter	<i>Tetrahedron</i>	<i>Hexahedron</i>	<i>Octahedron</i>	<i>Icosahedron</i>
1	Panjang sisi poligon (a)	31 (cm)	15(cm)	25 (cm)	25 (cm)
2	Radius <i>Speaker</i> (a_1)	49,64 (cm)	49,64 (cm)	49,64 (cm)	49,64 (cm)
3	Sudut Poligon	60°	90°	60°	60°
4	Radius <i>midsphere</i> (a_2)	10.96 (cm)	10.67 (cm)	12.5 (cm)	20.22 (cm)
5	<i>Cap Aperture Angle</i> (θ_0)	38°	33.5°	25.9°	14.7°
6	Jumlah <i>Driver</i> (L)	4	6	8	20

Berdasarkan spesifikasi pada tabel 4.4 mengacu pada persamaan (2.7), didapatkan nilai rasio dimensi secara berurutan untuk *tetrahedron*, *hexahedron*, *octahedron* dan *icosahedron* sebesar 0,087; 0,109; 0,077; dan 0,0212. Nilai ini

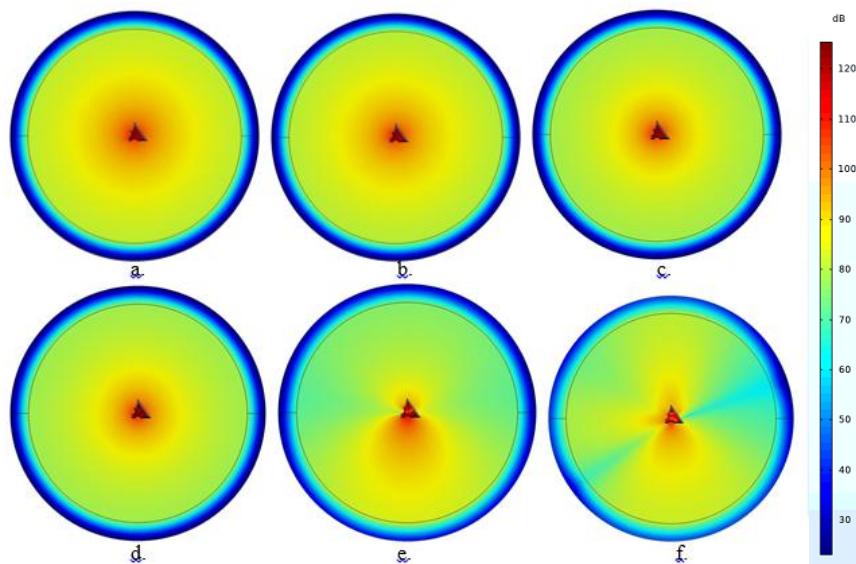
menunjukkan bahwa keempat *loudspeaker Polyhedron* yang dibuat telah memenuhi syarat besar rasio dimensi.

4.3 Simulasi *Loudspeaker Polyhedron*

Simulasi *loudspeaker* ini dilakukan dengan bantuan *software* COMSOL Multiphysics 5.4. Simulasi yang dilakukan menggunakan *physics interface* *Acoustic-Shell Interaction, Frequency Domain* yang mensimulasi *speaker* di mana suara yang dihasilkan oleh *speaker* berasal dari vibrasi dari elemen *speaker*. Beberapa parameter yang dibandingkan pada penelitian tugas akhir ini adalah nilai tingkat tekanan bunyi, respon frekuensi, keterarahan suara (*directivity*), dan *omnidirectional cut-off frequency* dari *loudspeaker*.

4.3.1 Tingkat Tekanan Bunyi

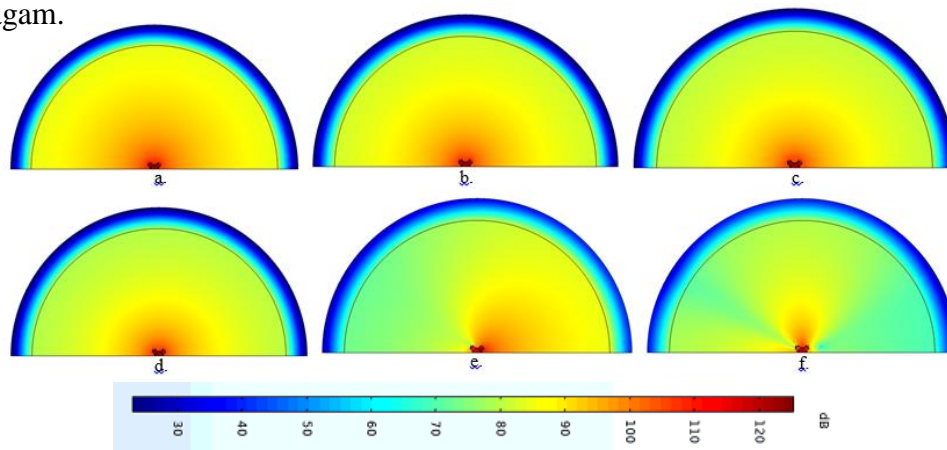
Simulasi dilakukan dengan bantuan *software* Comsol Multiphysics 5.4 di mana didalamnya digunakan *boundary layer* dengan jarak 1,5m dari pusat *loudspeaker*. Persebaran tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan oleh *loudspeaker Polyhedron* digambarkan sesuai dengan gambar 4.16 - 4.19.



Gambar 4. 16 Pola persebaran tingkat tekanan bunyi *tetrahedron* frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz

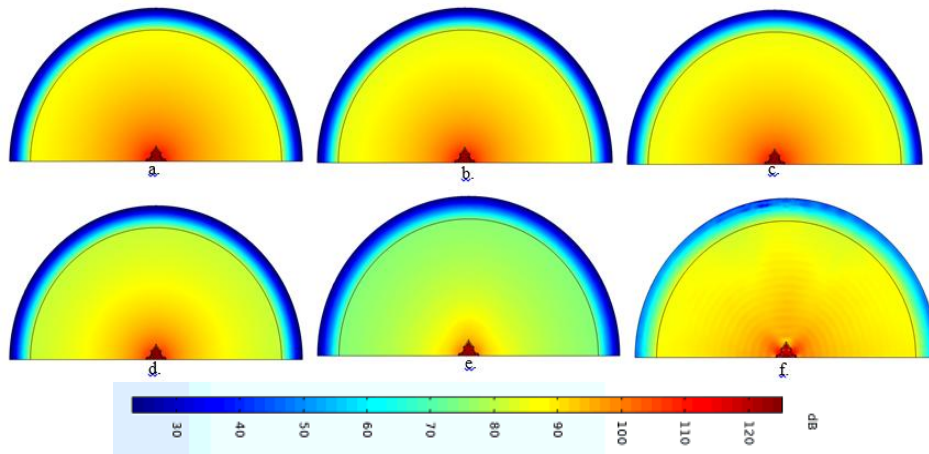
Gambar 4.16 menunjukkan pola persebaran tingkat tekanan bunyi *loudspeaker tetrahedron* secara berturut-turut pada frekuensi 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz dan 2000Hz yang ditunjukkan dengan kontur warna. Berdasarkan

gambar tersebut dapat dikatakan bahwa pada frekuensi 63Hz hingga 500Hz, pola persebaran atau kontur warna yang dihasilkan merata dan seragam. Pola persebaran yang merata dan seragam ini menunjukkan bahwa *loudspeaker tetrahedron* memiliki keterarahan yang *omnidirectional*. Pada frekuensi 1000Hz dan 2000Hz *loudspeaker* bersifat *directional* karena nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan pada tiap titik ukur berbeda terlihat dari pola persebarannya yang tidak merata dan seragam.



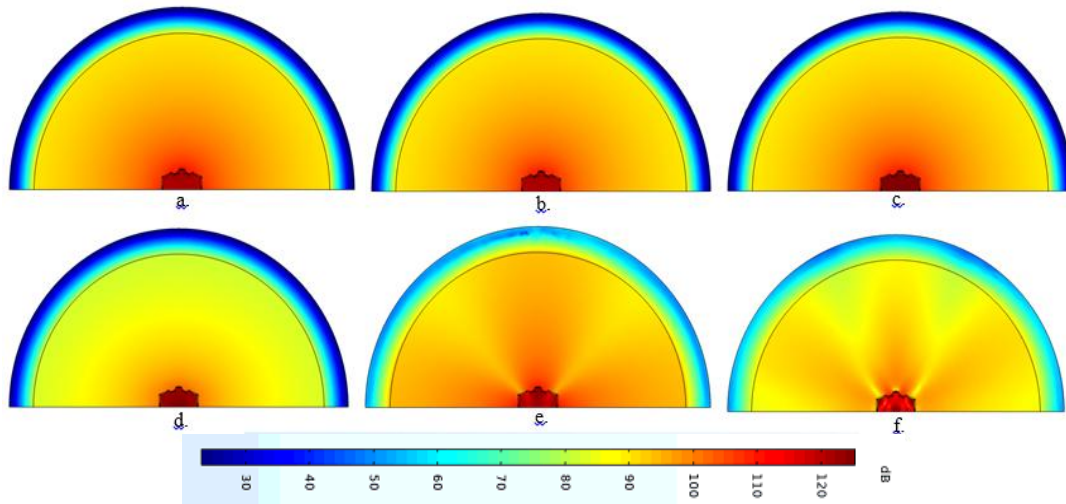
Gambar 4. 17 Pola persebaran tingkat tekanan bunyi *hexahedron* frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz

Gambar 4.17 menunjukkan pola persebaran tingkat tekanan bunyi *loudspeaker hexahedron* secara berturut-turut pada frekuensi 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz dan 2000Hz yang ditunjukkan dengan kontur warna. Berdasarkan gambar tersebut dapat dikatakan bahwa pada frekuensi 63Hz hingga 500Hz, pola persebaran atau kontur warna yang dihasilkan merata dan seragam karena nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan di tiap titik ukur seragam sehingga *loudspeaker hexahedron* memiliki keterarahan yang *omnidirectional*. Pada frekuensi 1000Hz dan 2000Hz *loudspeaker* bersifat *directional* karena nilai tingkat tekannya bunyi yang dihasilkan pada tiap titik ukur berbeda terlihat dari pola persebarannya yang tidak merata dan seragam.



Gambar 4. 18 Pola persebaran tingkat tekanan bunyi *octahedron* frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz

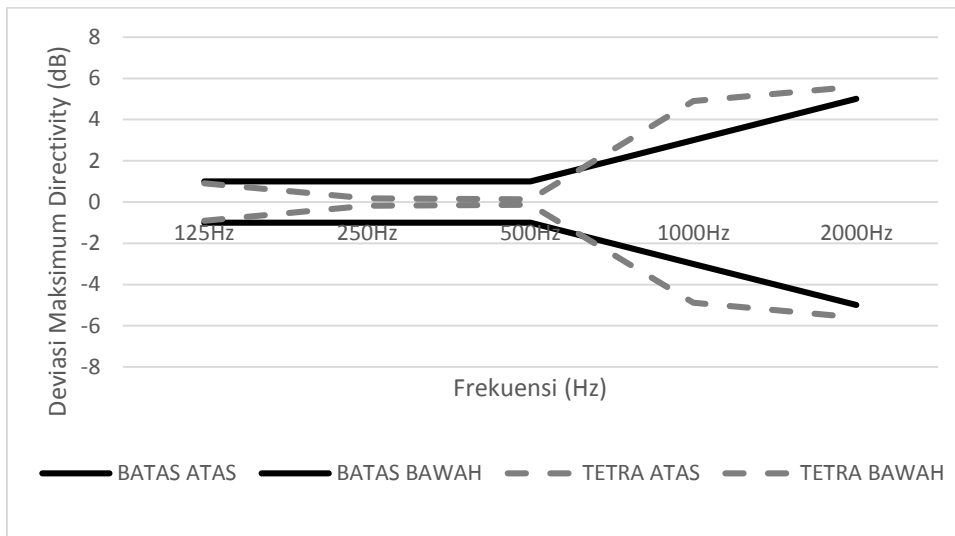
Gambar 4.18 menunjukkan pola persebaran tingkat tekanan bunyi *loudspeaker octahedron* secara berturut-turut pada frekuensi 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz dan 2000Hz yang ditunjukkan dengan kontur warna. Berdasarkan gambar tersebut dapat dikatakan bahwa pada frekuensi 63Hz hingga 500Hz, pola persebaran atau kontur warna yang dihasilkan merata dan seragam sehingga *loudspeaker hexahedron* memiliki keterarahan yang *omnidirectional*. Sesuai dengan apa yang dikatakan oleh (Pasqual A. , 2014) bahwa ketika nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan ditiap titik ukur seragam dan sama maka *loudspeaker* tersebut memiliki keterarahan yang *omnidirectional*, sedangkan apabila nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan ditiap titik ukur berbeda maka *loudspeaker* tersebut memiliki keterarahan yang *directional* seperti pada *loudspeaker octahedron* di frekuensi 1000Hz dan 2000Hz.



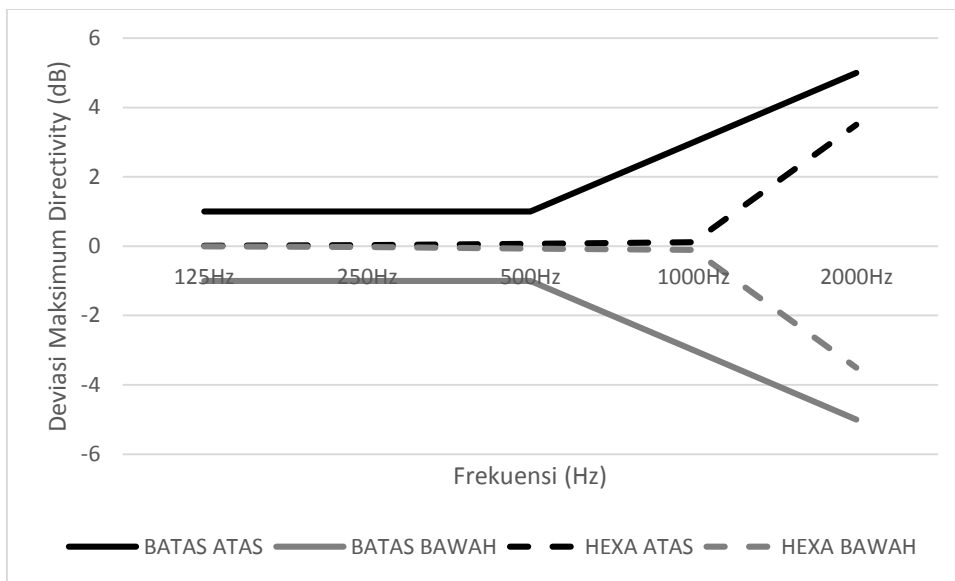
Gambar 4. 19 Pola persebaran tingkat tekanan bunyi *icosahedron* frekuensi a. 63Hz b. 125Hz c. 250Hz d. 500Hz e. 1000Hz f. 2000Hz

Gambar 4.19 menunjukkan pola persebaran tingkat tekanan bunyi *loudspeaker tetrahedron* secara berturut-turut pada frekuensi 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz dan 2000Hz yang ditunjukkan dengan kontur warna. Berdasarkan gambar tersebut dapat dikatakan bahwa pada frekuensi 63Hz hingga 500Hz, pola persebaran atau kontur warna yang dihasilkan merata dan seragam. Pola persebaran yang merata dan seragam ini menunjukkan bahwa *loudspeaker tetrahedron* memiliki keterarahan yang *omnidirectional*. Pada frekuensi 1000Hz dan 2000Hz *loudspeaker* bersifat *directional* karena nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan pada tiap titik ukur berbeda terlihat dari pola persebarannya yang tidak merata dan seragam.

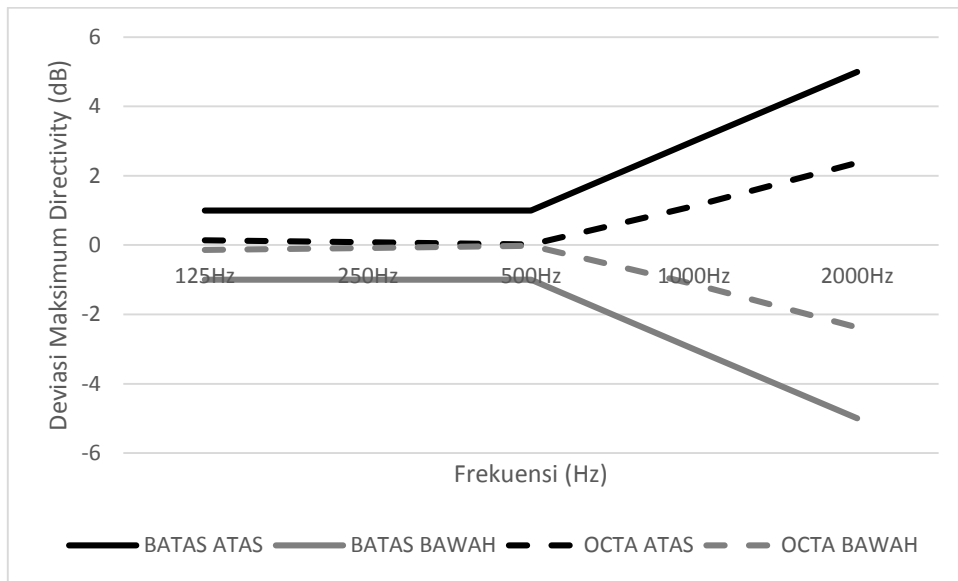
Dalam pengukuran akustik ruang, sebuah sumber suara harus memenuhi persyaratan yang tercantum pada ISO 3382-1. ISO 3382-1 mengatur tentang deviasi maksimum dan minimum yang dapat ditolerir dari nilai TTB yang dibangkitkan oleh *speaker*. Untuk mengetahui apakah *loudspeaker* memenuhi standar tersebut maka dilakukan simulasi sehingga didapatkan data sesuai dengan gambar 4.20 – 4.23.



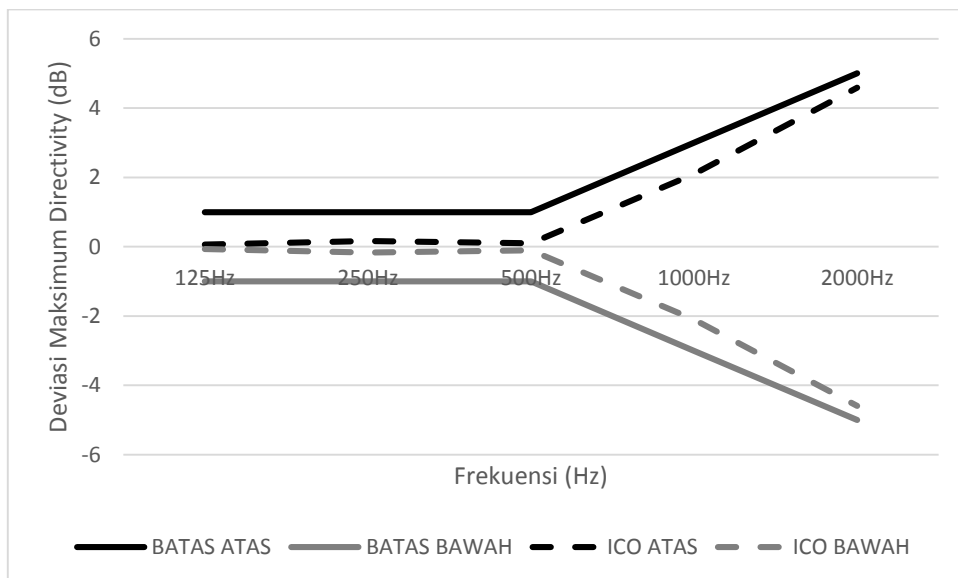
Gambar 4. 20 Deviasi *Loudspeaker Tetrahedron* berdasarkan ISO 3382-1



Gambar 4. 21 Deviasi *Loudspeaker Hexahedron* berdasarkan ISO 3382-1



Gambar 4.22 Deviasi *Loudspeaker Octahedron* berdasarkan ISO 3382-1



Gambar 4.23 Deviasi *Loudspeaker Octahedron* berdasarkan ISO 3382-1

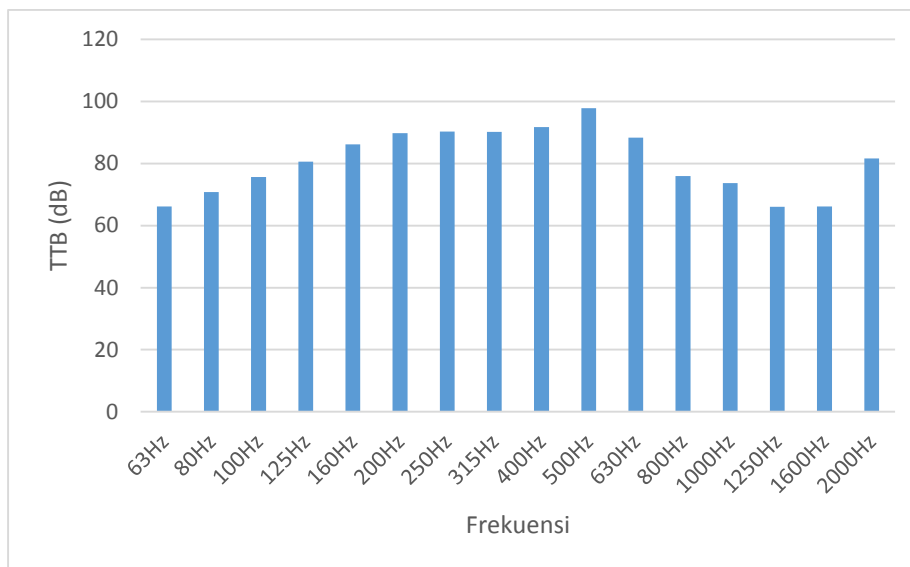
Berdasarkan gambar 4.20 – 4.23, dapat diketahui bahwa dari keempat *loudspeaker* yang disimulasikan, hanya *tetrahedron* saja yang tidak memenuhi standar ISO3382-1 karena nilai deviasi yang dihasilkan melewati batas maksimum dan minimum yang ditentukan dimulai pada frekuensi 1000Hz. *Loudspeaker Polyhedron* lain yakni *octahedron*, *hexahedron* dan *icosahedron* memenuhi dikarenakan deviasi tidak melebihi batas yang diajukan. Hasil simulasi berdasarkan ISO 3382-1 ini kemudian perlu dilakukan validasi secara pengukuran.

Selain itu, dari keempat *loudspeaker Polyhedron* yang disimulasikan didapatkan bahwa seluruh *loudspeaker Polyhedron* memenuhi desain target tingkat tekanan bunyi yakni mampu menghasilkan tingkat tekanan bunyi dengan rentang 90-100dB.

4.3.2 Respon Frekuensi

Respon Frekuensi yang dihasilkan dari *loudspeaker Polyhedron* ini diharapkan untuk *flat* pada seluruh pita frekuensi. Namun pada umumnya respon frekuensi yang *flat* yang diperhatikan pada *loudspeaker* terletak pada rentang 100Hz-4000Hz (Ristanty, 2017). Respon frekuensi sendiri akan dikatakan *flat* apabila pada rentang frekuensi tertentu hanya memiliki sedikit perbedaan (3dB) atau sama pada nilai tingkat tekanan bunyinya. Perbedaan ini ditetapkan berdasarkan nilai ambang yang dapat didengarkan oleh manusia apabila terjadi perubahan penambahan atau pengurangan 3dB.

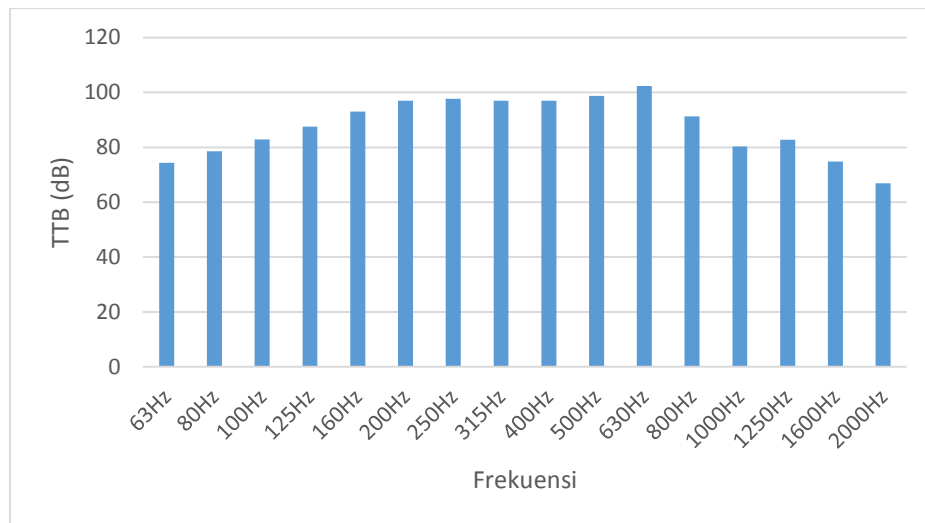
Untuk mengetahui respon frekuensi dari *loudspeaker* yang dibuat dapat dilakukan simulasi dengan hasil sebagai berikut:



Gambar 4. 24 Respon Frekuensi *Loudspeaker Tetrahedron*

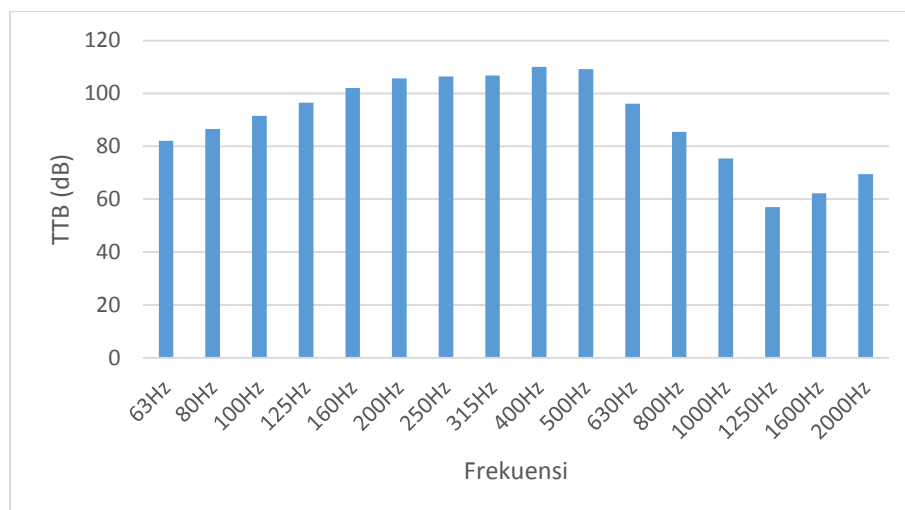
Berdasarkan gambar 4.24 didapatkan bahwa *loudspeaker tetrahedron* tidak memiliki respon frekuensi yang *flat* pada seluruh pita frekuensinya namun respon frekuensi yang *flat* hanya terjadi pada rentang frekuensi 160Hz-400Hz dengan tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan mencapai 98dB. *Loudspeaker tetrahedron*

mampu menghasilkan nilai tingkat tekanan bunyi pada frekuensi 63Hz-2000Hz dengan rentang 66dB – 98dB.



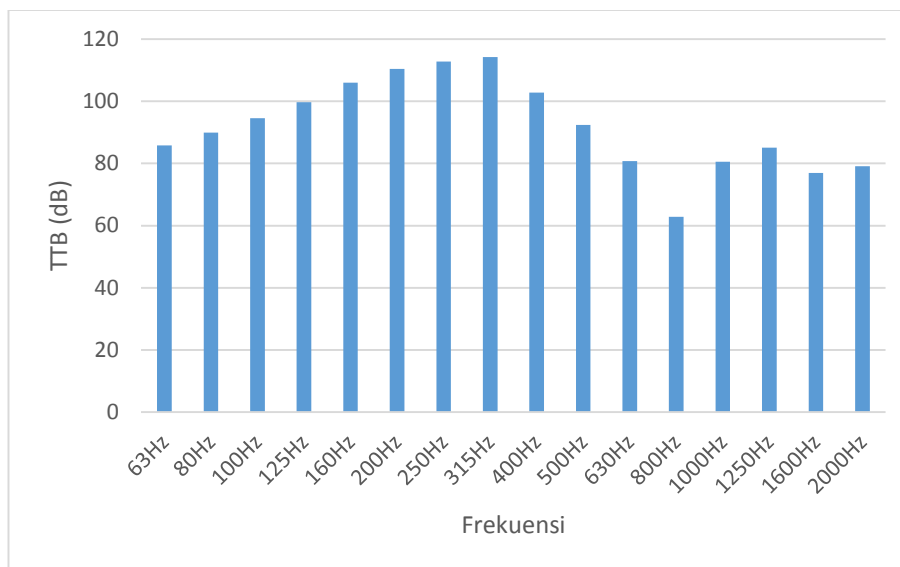
Gambar 4. 25 Respon Frekuensi *Loudspeaker Hexahedron*

Berdasarkan gambar 4.25, didapatkan bahwa *loudspeaker hexahedron* tidak memiliki respon frekuensi yang *flat* pada seluruh pita frekuensi, namun hanya terjadi pada rentang 200Hz-500Hz dan nilai tingkat tekanan bunyi tertingginya mencapai 102dB pada frekuensi 630Hz. *Loudspeaker* ini mampu menghasilkan tingkat tekanan bunyi pada rentang frekuensi 63Hz-3150Hz sebesar 66dB - 102dB. Nilai tingkat tekanan bunyi berdasarkan gambar 4.25 akan menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi yang digunakan.



Gambar 4. 26 Respon Frekuensi *Loudspeaker octahedron*

Berdasarkan gambar 4.26, didapatkan bahwa *loudspeaker octahedron* tidak mampu menghasilkan respon frekuensi yang *flat* pada seluruh pita suaranya. Namun *loudspeaker* ini dapat menghasilkan tingkat tekanan bunyi mencapai 110dB pada frekuensi 400Hz. Pada rentang frekuensi 63Hz-2000Hz, rentang tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan adalah 56dB hingga 110dB.

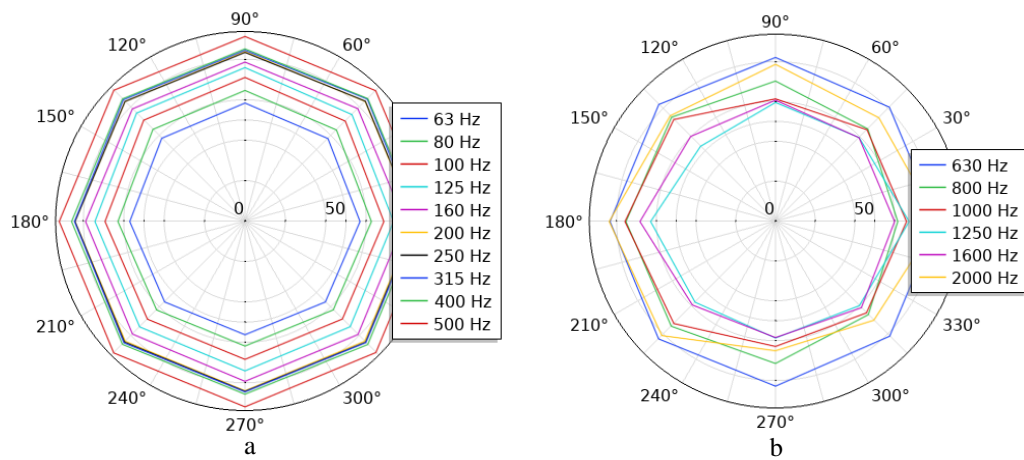


Gambar 4. 27 Respon Frekuensi *Loudspeaker Icosahedron*

Berdasarkan gambar 4.27, didapatkan bahwa *loudspeaker icosahedron* tidak mampu menghasilkan respon frekuensi yang *flat* pada seluruh pita frekuensinya. Namun *loudspeaker* ini mampu menghasilkan nilai tingkat tekanan bunyi pada frekuensi 63Hz-2000Hz dengan rentang 72dB – 114dB di mana nilai tingkat tekanan bunyi tertingginya berada pada frekuensi 315Hz.

4.3.3 Keterarahan Suara (*Directivity*)

Keterarahan suara dari suatu *loudspeaker* dapat diamati melalui nilai *omnidirectional frequency cut-off*nya. Nilai *omnidirectional frequency cut-off* ini merupakan nilai frekuensi maksimum yang memiliki deviasi maksimum sebesar 0,5dB pada seluruh titik ukur. (Leishman, 2006) mengungkapkan bahwa *loudspeaker* dengan susunan geometri *platonic solid* atau RPL (*Reguler Polyhedral Loudspeaker*) tidak dapat menghasilkan keterarahan yang *omnidirectional* di seluruh frekuensinya oleh karena itu digunakan batasan yang disebut *omnidirectional frequency cut-off* ini.

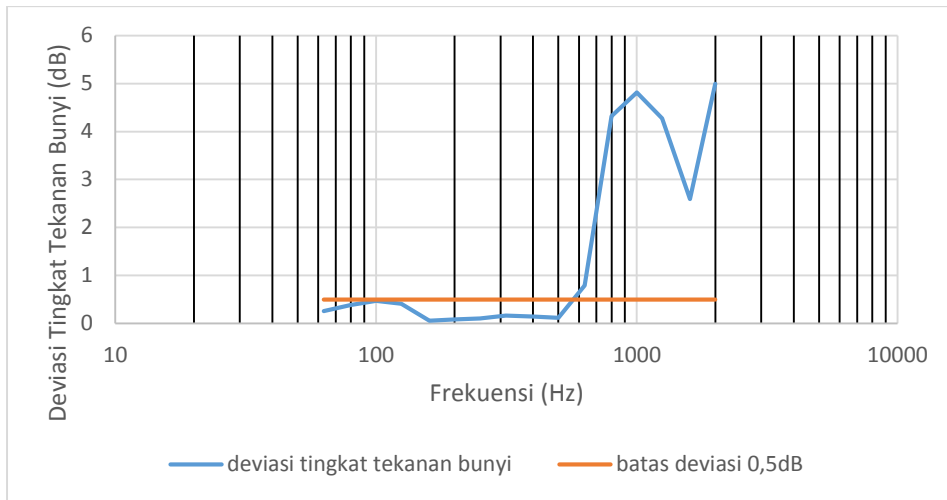


Gambar 4. 28 pola keterarahan *loudspeaker tetrahedron* pada rentang frekuensi a. 63Hz - 500Hz b. 630Hz - 2000Hz

Beberapa hal yang mempengaruhi keterarahan sebuah *loudspeaker* antara lain adalah properti medium, *orde harmonic* dan parameter tak berdimensi yakni ka dan r/a , di mana ka adalah perkalian antara bilangan gelombang dengan radius *midsphere* sedangkan r/a adalah rasio perbandingan antara jarak *free field* dengan radius *midsphere*. Berdasarkan (Pasqual A. , 2014), semakin rendah nilai ka yang digunakan pada *gain* $\frac{P_{m,n}(r)}{U_{m,n}(r)}$, maka nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan semakin seragam sehingga menghasilkan sumber suara yang *omnidirectional*. Sebaliknya apabila nilai ka yang diberikan pada *gain* $\frac{P_{m,n}(r)}{U_{m,n}(r)}$ semakin tinggi, maka persebaran tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan semakin tidak merata dan menghasilkan sumber suara yang *directional*. Mengacu pada ISO 3745 untuk pengukuran pada ruang *anechoic*, simulasi dilakukan pada titik ukur dengan sudut 0° - 360° dengan interval 45° .

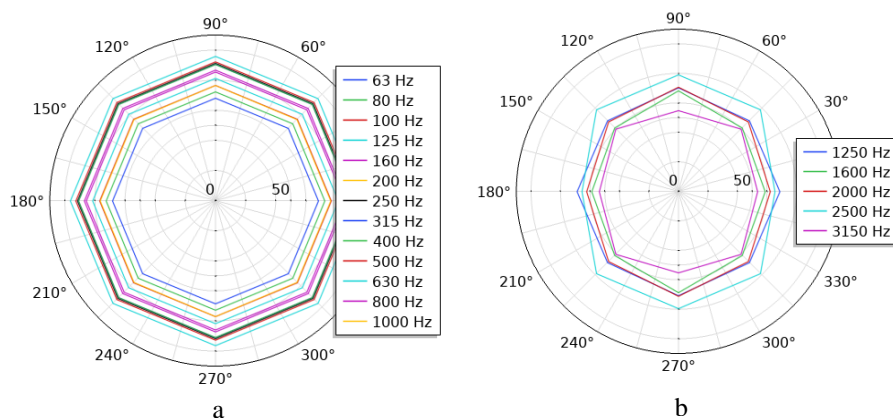
Berdasarkan gambar 4.28 didapatkan bahwa *loudspeaker tetrahedron* hanya memiliki keterarahan yang *omnidirectional* pada frekuensi 63Hz hingga frekuensi 500Hz saja (ditunjukkan pada gambar 4.28a). Hal ini dibuktikan dengan nilai tingkat tekanan bunyi pada tiap titik ukur sama yang membentuk pola radiasi 2D yang membentuk segi delapan sempurna. Ketika frekuensi berada diatas 630Hz (ditunjukkan pada gambar 4.28b), bentuk tersebut sudah tidak menyerupai segi

delapan lagi karena nilai di tiap titik ukurnya berbeda sehingga keterarahannya bersifat *directional*.

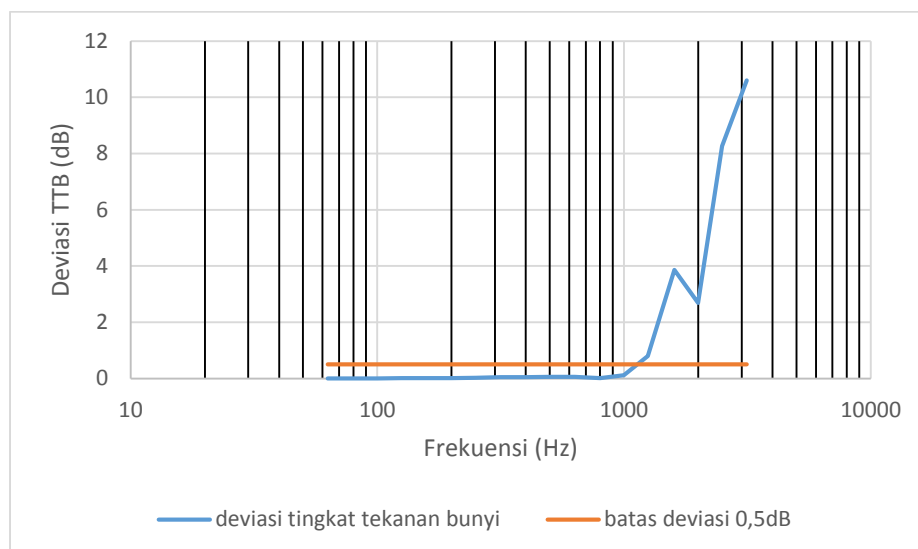


Gambar 4. 29 Grafik deviasi *Omnidirectional cut-off frequency* pada *Loudspeaker Tetrahedron*

Gambar 4.29 menunjukkan nilai deviasi dari *loudspeaker tetrahedron* yang ditunjukkan dengan garis biru. Garis oranye sendiri merupakan batas deviasi yakni 0,5dB. Grafik yang dibentuk dengan skala logaritmik ini menunjukkan bahwa pada frekuensi 630Hz, nilai deviasi yang dihasilkan adalah 0,79dB sedangkan pada frekuensi 500Hz nilai deviasi yang dihasilkan adalah 0,12dB. Hal ini menandakan bahwa nilai *omnidirectional cut-off frequency* dari *loudspeaker tetrahedron* ini berada pada rentang 500Hz-630Hz.



Gambar 4. 30 pola keterarahan *loudspeaker hexahedron* pada rentang frekuensi a. 63Hz - 1000Hz b. 1250Hz - 3150Hz

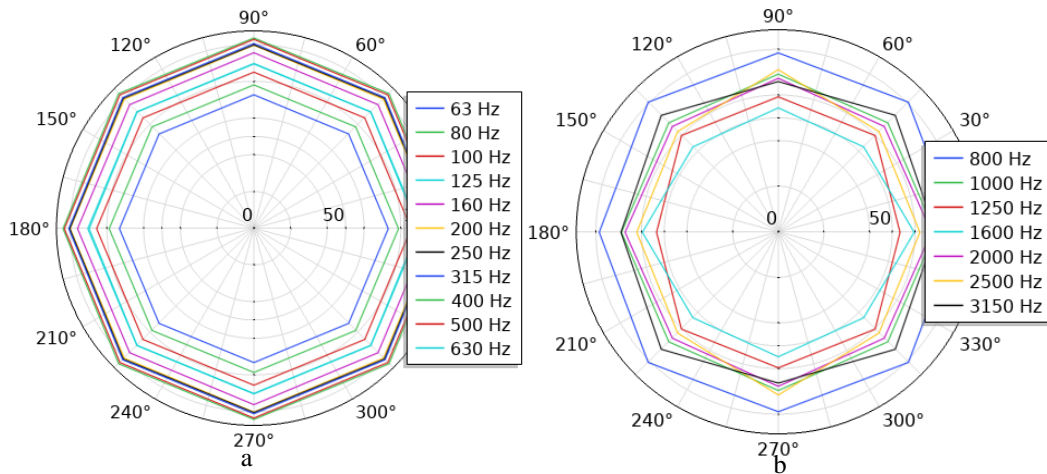


Gambar 4. 31 Grafik deviasi *Omnidirectional cut-off frequency* pada *Loudspeaker hexahedron*

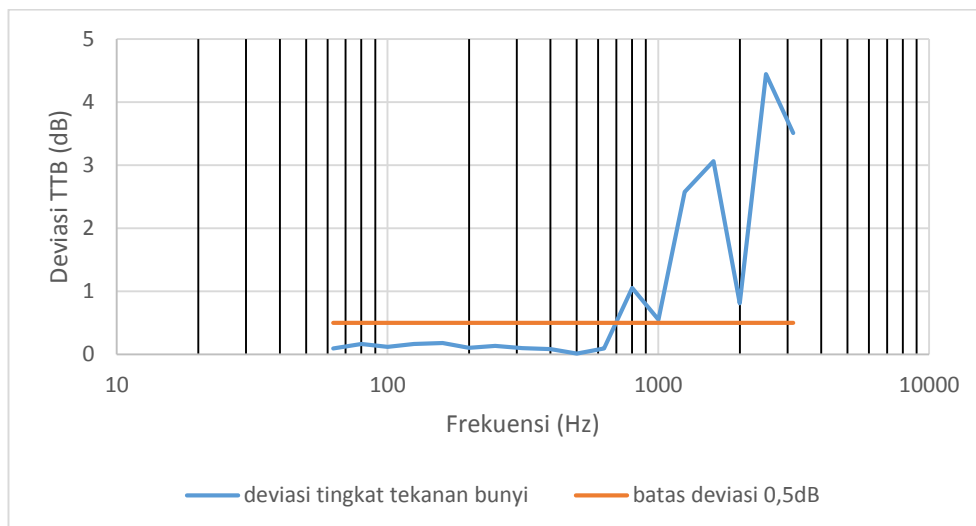
Berdasarkan gambar 4.30 didapatkan bahwa *loudspeaker hexahedron* hanya memiliki keterarahan yang *omnidirectional* pada frekuensi 63Hz hingga 1000Hz saja (gambar 4.30a). Hal ini dibuktikan dengan nilai tingkat tekanan bunyi pada tiap titik ukur sama yang membentuk pola radiasi 2D yang membentuk segi delapan sempurna. Ketika frekuensi berada diatas 1000Hz (gambar 4.30b), bentuk tersebut sudah tidak menyerupai segi delapan lagi karena nilai di tiap titik ukurnya berbeda sehingga keterarahannya bersifat *directional*. Keterarahan yang *directional* ini dapat disebabkan oleh properti medium, *orde harmonic* dan parameter tak berdimensi yakni ka dan r/a , di mana ka adalah perkalian antara bilangan gelombang dengan radius *midsphere* sedangkan r/a adalah rasio perbandingan antara jarak *free field* dengan radius *midsphere* (Pasqual A. , 2014).

Gambar 4.31 merupakan gambar yang menunjukkan nilai deviasi dari *loudspeaker hexahedron* dengan skala logaritmik yang ditunjukkan dengan garis berwarna biru. Garis yang berwarna oranye merupakan batas deviasi yakni sebesar 0,5dB. Apabila melewati batas deviasi tersebut, maka *loudspeaker* tidak lagi bersifat *omnidirectional*. Berdasarkan gambar 4.31, dapat diketahui bahwa pada rentang frekuensi 63Hz-1000Hz nilai deviasi yang dihasilkan tidak melebihi 0,5dB di mana pada frekuensi 1000Hz sendiri nilai deviasinya adalah 0,113dB. Pada frekuensi 1250Hz, nilai deviasi yang dihasilkan melebihi ketentuan yang berlaku

yakni sebesar 0,738. Hal ini menandakan bahwa nilai *omnidirectional cut-off frequency* dari *loudspeaker hexahedron* ini berada pada rentang 1000Hz-1250Hz.



Gambar 4. 32 pola keterarahan *loudspeaker octahedron* pada rentang frekuensi a. 63Hz - 630Hz b. 800Hz - 3150Hz

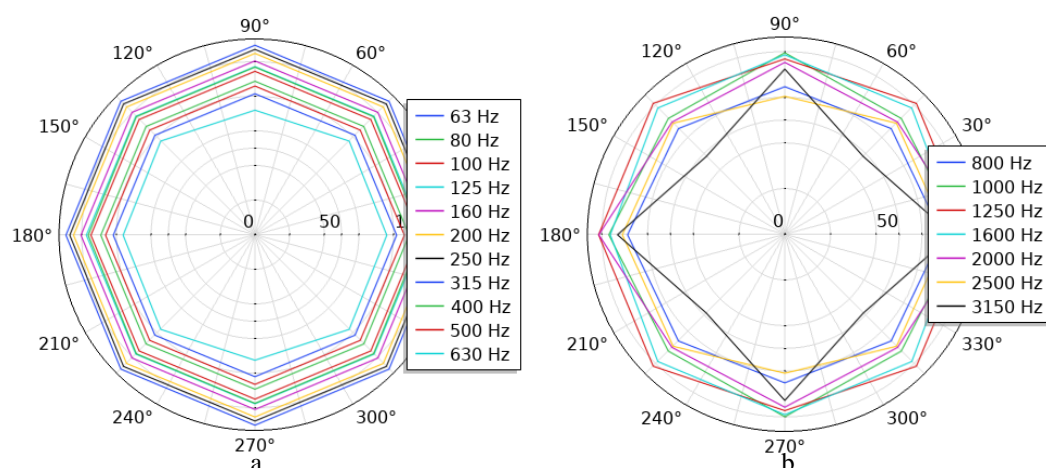


Gambar 4. 33 Grafik deviasi *Omnidirectional cut-off frequency* pada *Loudspeaker octahedron*

Gambar 4.32 menunjukkan pola keterarahan 2D dari *loudspeaker octahedron* di mana *loudspeaker* ini hanya memiliki keterarahan yang *omnidirectional* pada rentang frekuensi 63Hz-630Hz ditunjukkan dengan bentuk pola yang menyerupai segi delapan sempurna (gambar 4.32a) dengan nilai tingkat tekanan bunyi di tiap titik ukur sama. Pada rentang frekuensi diatas 630Hz, pola yang terbentuk sudah tidak menyerupai segi delapan sempurna lagi sehingga menandakan bahwa nilai

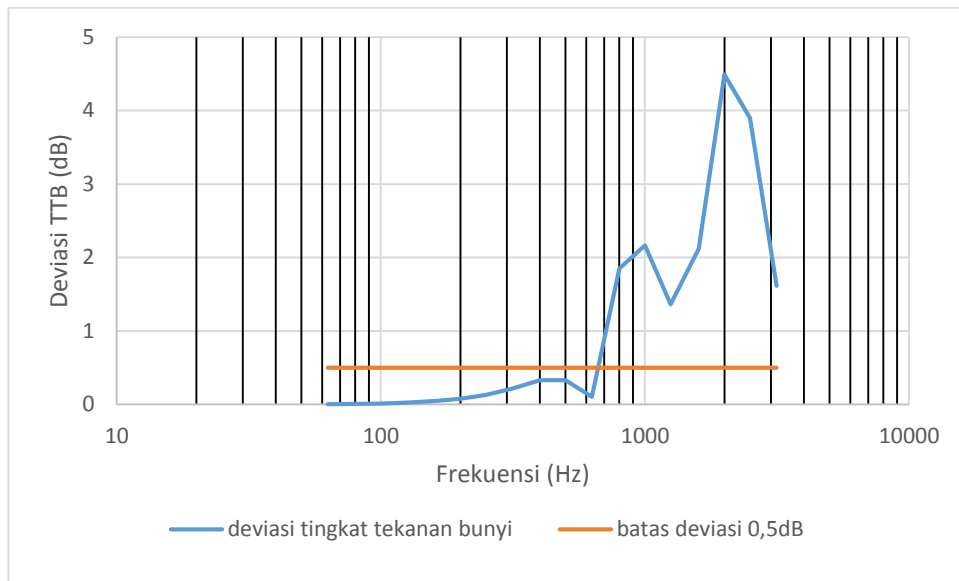
tingkat tekanan bunyi pada setiap titik ukur tidaklah sama sehingga bersifat *directional* (gambar 4.32b).

Gambar 4.33 menunjukkan nilai deviasi tingkat tekanan bunyi dari *loudspeaker octahedron* dengan skala logaritmik yang ditunjukkan dengan garis biru sebagai nilai deviasinya dan garis oranye sebagai batas deviasinya. Batas deviasi ini digunakan untuk menentukan nilai *omnidirectional cut-off frequency* yang dimiliki oleh sebuah *loudspeaker*. Berdasarkan gambar 4.33 didapatkan bahwa *loudspeaker octahedron* memiliki rentang frekuensi 63Hz – 630Hz di mana nilai deviasinya tidak mencapai 0,5dB dengan nilai deviasi pada frekuensi 630Hz sebesar 0,094. Sedangkan pada rentang frekuensi 1000Hz - 2000Hz didapatkan bahwa nilai deviasinya melebihi 0,5dB dengan nilai deviasi pada frekuensi 800Hz sebesar 1,039. Hal ini menandakan bahwa nilai *omnidirectional cut-off frequency* dari *loudspeaker octahedron* ini berada pada rentang 630Hz - 800Hz.



Gambar 4. 34 pola keterarahan *loudspeaker icosahedron* pada rentang frekuensi a. 63Hz - 630Hz b. 800Hz - 3150Hz

Berdasarkan gambar 4.34, didapatkan bahwa *loudspeaker icosahedron* hanya memiliki keterarahan yang *omnidirectional* pada frekuensi 63Hz hingga frekuensi 630Hz saja (gambar 4.34a). Hal ini dibuktikan dengan nilai tingkat tekanan bunyi pada tiap titik ukur sama yang membentuk pola radiasi 2D yang membentuk segi delapan sempurna. Ketika frekuensi berada diatas 800Hz (gambar 4.34b), bentuk tersebut sudah tidak menyerupai segi delapan lagi karena nilai di tiap titik ukurnya berbeda sehingga keterarahannya bersifat *directional*.

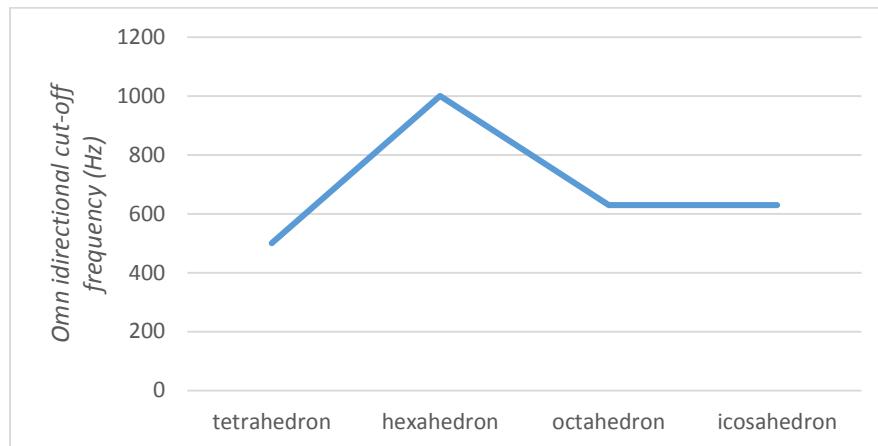


Gambar 4. 35 Grafik deviasi *Omnidirectional cut-off frequency* pada *Loudspeaker icosahedron*

Gambar 4.35 merupakan gambar yang menunjukkan nilai deviasi dari *loudspeaker icosahedron* dengan garis biru sebagai nilai deviasinya dan garis oranye sebagai batas deviasinya. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa pada rentang frekuensi 63Hz- 630Hz nilai deviasinya tidak mencapai 0,5dB dengan nilai deviasi pada frekuensi 630Hz sebesar 0,104dB. Pada rentang frekuensi 800Hz hingga 2000Hz nilai deviasi yang terjadi sudah melebihi 0,5dB dengan nilai deviasi pada frekuensi 800Hz sebesar 1,9dB. Hal ini menunjukkan bahwa *loudspeaker icosahedron* memiliki nilai *omnidirectional cut-off frequency* pada rentang 630Hz-800Hz.

4.4 Hasil dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan pengukuran dapat disimpulkan bahwa perubahan jumlah muka pada geometri *loudspeaker Polyhedron* dapat mempengaruhi kinerja *loudspeaker* itu sendiri. Untuk memperjelas bagaimana kinerja satu sama lain antar *loudspeaker* perlu dilakukan perbandingan dari parameter *omnidirectional cut-off frequency*, respon frekuensi dan nilai tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan. Berikut merupakan hasil perbandingannya.



Gambar 4. 36 perbandingan *omnidirectional cut-off frequency* pada *loudspeaker Polyhedron*

Tabel 4. 5 Perbandingan perubahan prosentase volume terhadap keterarahan

	<i>Volume of inscribed sphere</i>	<i>Volume of Deltahedron</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>Omnidirectional cut-off frequency</i>
<i>Tetrahedron</i>	$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{2\sqrt{6}}a\right)^3$	$\frac{\sqrt{2}}{12}a^3$	30,22	500Hz - 630Hz
<i>Octahedron</i>	$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{\sqrt{6}}a\right)^3$	$\frac{\sqrt{2}}{3}a^3$	60,45	630Hz - 800Hz
<i>Icosahedron</i>	$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{(1+\sqrt{5})^2}{8\sqrt{3}}a\right)^3$	$\frac{3+\sqrt{5}}{12}a^3$	82,87	630Hz - 800Hz

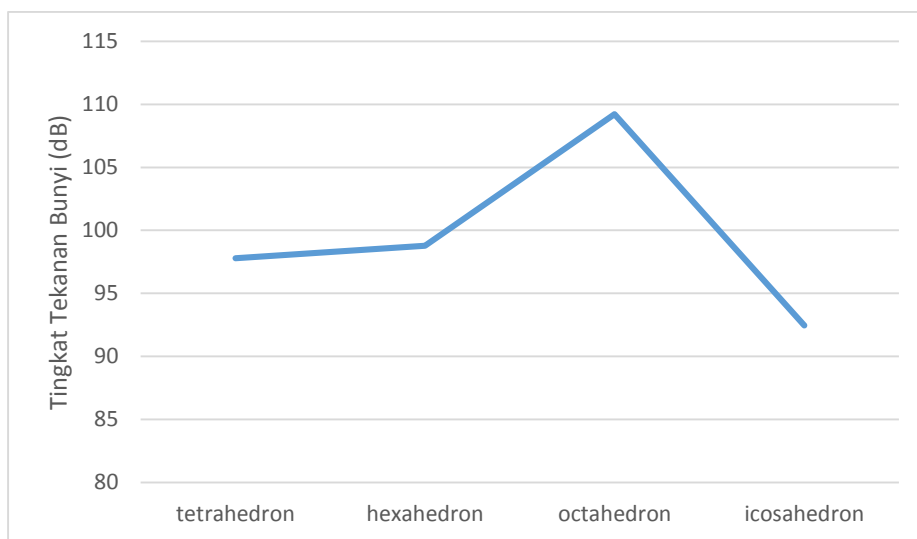
Perbandingan keterarahan suara pada *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron* dapat diamati melalui nilai *omnidirectional cut-off frequency*-nya sesuai dengan gambar 4.36. Terlihat dari gambar tersebut bahwa *tetrahedron* memiliki *omnidirectional cut off frequency* yang paling rendah. Hal ini sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh (Leishman, 2006) bahwa *omnidirectional cut-off frequency* terendah dimiliki oleh *tetrahedron*.

Selain perubahan jumlah muka, perubahan prosentase rasio volume antara *inscribe sphere* dan *deltahedron* juga mempengaruhi keterarahan yang dihasilkan oleh sebuah *loudspeaker Polyhedron*. *Deltahedron* sendiri merupakan sebuah *loudspeaker* di mana seluruh sisi dari *loudspeaker* merupakan segitiga sama sisi

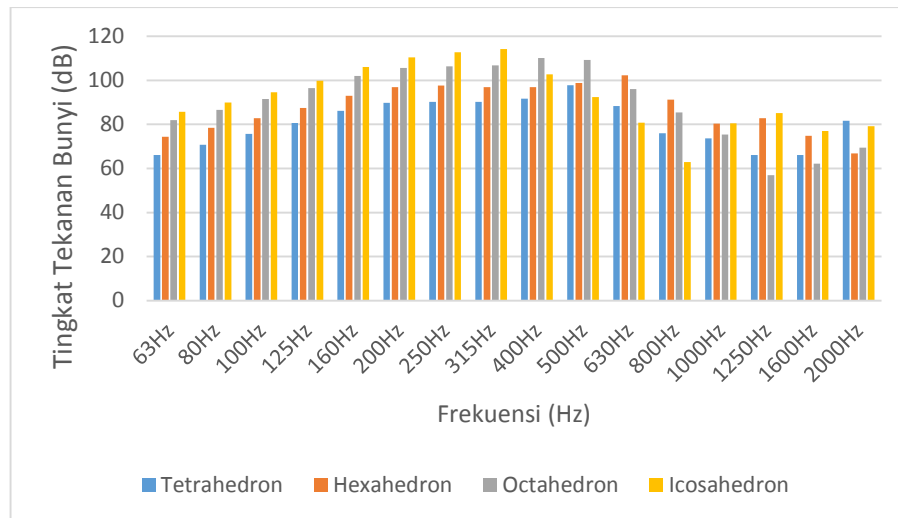
sehingga *loudspeaker* yang termasuk ke dalam jenis deltahedron adalah *tetrahedron*, *octahedron* dan *icosahedron* (Lee & Ryu, 2019).

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa semakin besar perbandingan volume terhadap *inscribed sphere* maka keterarahan dari sebuah *loudspeaker* akan semakin membaik. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *omnidirectional cut-off frequency* yang semakin meningkat seiring dengan meningkatnya perbandingan yang dihasilkan untuk deltahedron. Hasil ini sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh (Leishman, 2006) dan (Tarnow, 1974) di mana semakin banyaknya sisi yang digunakan maka keterarahan dari sebuah *loudspeaker Polyhedron* akan semakin membaik.

Salah satu penyebab terjadinya penyimpangan yang menyebabkan sebuah *loudspeaker* tidak bersifat *omnidirectional* adalah masing-masing *driver* memiliki karakteristiknya masing-masing. Selain itu ketika seluruh *driver* dibunyikan, gelombang yang dihasilkan akan mengalami superposisi dan terjadi interferensi konstruktif dan/atau destruktif sehingga pola keterarahannya akan berubah.



Gambar 4. 37 perbandingan tingkat tekanan bunyi *loudspeaker Polyhedron* pada ruang *anechoic*



Gambar 4. 38 Perbandingan Respon Frekuensi *Loudspeaker Polyhedron*

Perbandingan tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan pada gambar 4.37 menunjukkan bahwa tingkat tekanan tertinggi terdapat pada *loudspeaker octahedron*. Berdasarkan ketiga perbandingan diatas, dapat disimpulkan bahwa *Loudspeaker* yang memiliki kinerja paling baik adalah *loudspeaker tetrahedron* karena memiliki nilai *radiation uniformity* meskipun memiliki nilai *omnidirectional cut-off frequency* terendah dan nilai tingkat tekanan bunyi yang rendah. Rekomendasi yang dapat diberikan untuk dapat mengatasi tingkat tekanan bunyi yang rendah tersebut bisa dengan cara memperbesar ukuran *driver* yang digunakan agar tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan meningkat serta meningkatkan kekakuan *cone driver* yang digunakan. Untuk dapat mengatasi keterbatasan *omnidirectional cut-off frequency* yang dihasilkan, mengacu pada yang sudah dijelaskan pada subbab 2.4, nilai *gain* atau *amplitude* yang digunakan pada gelombang berjalan sumber spheris akan mempengaruhi keterarahan dan tingkat tekanan bunyi dari *loudspeaker* yang digunakan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan mengenai *Loudspeaker Polyhedron*, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Kinerja *loudspeaker Polyhedron* selain *dodecahedron* secara simulasi dapat dibandingkan melalui nilai *omnidirectional cut-off frequency*, Tingkat Tekanan Bunyi dan Frekuensi Respon yang dihasilkan. Nilai *omnidirectional cut-off frequency* terendah terjadi pada *tetrahedron* sebesar 500-630Hz serta nilai *omnidirectional cut-off frequency* tertinggi berada pada *loudspeaker hexahedron* sebesar 1000-1250Hz. Nilai tingkat tekanan bunyi tertinggi dimiliki oleh *Icosahedron* sebesar 72-114dB. Frekuensi respon untuk seluruh *loudspeaker Polyhedron* tidak *flat* pada tiap frekuensinya.
- Radiasi *driver* mempengaruhi keterarahan suatu *loudspeaker* diakibatkan oleh adanya perubahan energi listrik menjadi energi vibrasi dan suara sehingga menyebabkan adanya perbedaan antara hasil pengukuran dan simulasi pula. Untuk frekuensi tinggi perbedaan yang terjadi, secara berturut-turut untuk *loudspeaker dodecahedron* 5inch, 4inch dan 2,5inch, bernilai sebesar 0-11dB; 0-6dB; 0-5dB. Dan untuk frekuensi rendah, perbedaan yang terjadi secara berturut-turut untuk *loudspeaker dodecahedron* 5inch, 4inch dan 2,5inch, bernilai sebesar 0-18dB; 0-25dB; dan 0-18dB.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis pada pengembangan selanjutnya mengenai penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Dalam pembuatan *loudspeaker Polyhedron*, perlu dilakukan simulasi terlebih dahulu agar dapat menghasilkan *loudspeaker* yang sesuai dengan desain target.

- Pengerjaan selanjutnya dapat ditelisik lebih dalam mengenai pengaruh *spherical harmonic function* dan pengukur vibrasi pada *cone driver* untuk diketahui nilai energi disipasinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Acoustic Glossary (Sound Fields and related terms ...)*. (n.d.). Retrieved from <http://www.acoustic-glossary.co.uk/>: <http://www.acoustic-glossary.co.uk/sound-fields.htm>
- COMSOL. (2018). *Acoustics Module User's Guide*. COMSOL.
- Coxeter, H. (1963). *Regular Polytopes, 2nd Ed.* New York: Nacnillan.
- Fahy, F. (1995). *Sound Intensity, 2nd Edition*. London: E & FN Spon.
- Glossary, A. (n.d.). *Sound Fields and related terms ...* Retrieved from <http://www.acoustic-glossary.co.uk/>: Sound Fields and related terms ...
- Hanindita, T. (2018). *Perancangan Loudspeaker Dodecahedron Mini untuk Pengukuran Akustik Ruang*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Knuttel, T., Witew, I. B., & Vorlander, M. (2013). Influence of “*omnidirectional*” loudspeaker directivity on measured room impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3654–3662.
- Lee, Y., & Ryu, J. (2019). A study on the auralization system using flexible rendering for virtual reality-based acoustic simulation. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*.
- Leishman, T. W. (2006). An Experimental Evaluation of Regular *Polyhedron* Loudspeakers as *Omnidirectional* Sources of Sound. *Journal Acoustics Society of America*, 120, 1411-1422.
- Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press.
- Pasqual, A. (2014). Spherical harmonic Analysis of The Sound Radiation from *Omnidirectional* Loudspeaker Arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 333, 4930-3941.
- Pasqual, A. M. (2010). *Sound Directivity Control in a 3-D Space by a Compact Spherical Loudspeaker Array*. Campinas: Thesis (PhD in Mechanical Engineering): Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas.

- Poletti, M. (2005). A Spherical harmonic Approach to 3D Surround Sound Systems. *Forum Acusticum, Budapest*, 311-317.
- Purwanto, F. D. (2019). *Analisis Perubahan Dimensi Terhadap Kinerja Speaker Dodecahedron*. Surabaya: Teknik Fisika ITS.
- Ristanty, I. A. (2017). *Perancangan Loudspeaker Dodecahedron untuk Pengukuran Akustik Ruang*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Russell, D. A., Titlow, J. P., & Bemmen, Y.-J. (1999). Acoustic monopoles, dipoles and quadrupoles: an experiment revisited. *American journal physics*, 660-664.
- Schmidt, R.-H. M. (2017). *Low Frequency Sound Generation by Loudspeaker Drivers*. Netherland: RMS Acoustics & Mechatronics.
- Speaker Directivity / Off Axis Response: Theory and Measurement Techniques*. (2013, December 7). Retrieved from <http://www.acousticfrontiers.com/>: <http://www.acousticfrontiers.com/20131129controlled-directivity-speakers-open-up-your-acoustic-treatment-options/>
- Tarnow, V. (1974). Computation of Sound Radiation from loudspeaker systems with the symmetry of the platonic solid. *proceedings of the Eight international congress on acoustics*, (p. 617). London.
- Tylka, J. G., & Choueiri, E. Y. (2014). *On the Calculation of Full and Partial Directivity Indices*. New Jersey: 3D Audio and Applied Acoustics Laboratory · Princeton University.

LAMPIRAN
SPESIFIKASI DRIVER SPEAKER 4INCH

Besaran	Besaran	Data	Satuan SI
Z	Impedansi	8 ohm	8 ohm
R _e	Resistansi DC	6.4 ohm	6.4 ohm
L _e	Induktansi Coil	0.34 mH	0.34 mH
Q _{es}	Q-faktor elektik	0.4	0.4
Q _{ts}	Total Q-faktor	0.37	0.37
R _{ms}	<i>Mechanical Loss</i>	0.35 kg/s	0.35 kg/s
BI	Faktor Gaya	5.2 Tm	5.2 Tm
C _{ms}	<i>Compliance</i>	1.84 mm/N	1.84 mm/N
F _s	Resonansi Udara Bebas	51 Hz	51 Hz
TTB _{se}	Sensitivitas (2.83V/1m)	85.5 dB	85.5 dB
V	<i>Rating Power</i> <i>Handling</i>	30 W	30 W
m	Massa <i>Speaker</i>	0.92 kg	0.92 kg

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Nama Penulis Rizqina Marsya Sephia dilahirkan di Surabaya, tanggal 04 September 1998 dari Bapak yang bernama Bambang Suryawan, S.H. dan Ibu yang bernama Rulia Mardiana, S.H. Saat ini penulis tinggal di Jalan Rungkut Asri Tengah 20/10 RT 02 RW 11, Kelurahan Rungkut Kidul, Kecamatan Rungkut, Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Kendangsari I/276 pada tahun 2007, pendidikan di SMPN 35 Surabaya pada tahun 2013, pendidikan di SMAN 2 Surabaya pada tahun 2016 dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FT-IRS di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan Judul “**Analisis Pola Radiasi Driver Speaker terhadap Kinerja Loudspeaker Polyhedron**”. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui email: inamarsya@gmail.com