

**SISTEM FOTOAKUSTIK SEDERHANA UNTUK DETEKSI KADAR
TIMBAL PADA AIR BERBASIS LASER DIODA DAN MIKROFON
KONDENSER MENGGUNAKAN PYTHON**

(Skripsi)

Oleh

**IMTIYAS AZZAHRA
1917041059**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

SISTEM FOTOAKUSTIK SEDERHANA UNTUK DETEKSI KADAR TIMBAL PADA AIR BERBASIS LASER DIODA DAN MIKROFON KONDENSER MENGGUNAKAN PYTHON

Oleh

Imtiyas Azzahra

Telah direalisasikan pembuatan system fotoakustik sederhana berbasis laser dioda 450 nm dan mikrofon kondenser menggunakan Python, yang bertujuan untuk mendeteksi kadar timbal pada air. Python bertindak sebagai realisasi GUI sebagai sistem kendali yang terintegrasi dalam satu mikrokontroler yakni arduino uno. Selain itu, Python juga dimanfaatkan dalam proses perekaman dan pengolahan data. Pembuatan GUI memanfaatkan *library* tkinter, proses perekaman memanfaatkan *library* pyaudio, serta dalam proses pengolahan data memanfaatkan *library*:numpy, scipy, pandas, serta matplotlib untuk merepresentasikan gelombang bunyi yang didapatkan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengumpulan data dari suatu sampel yang telah diketahui kadar timbalnya. Data tersebut diperoleh dengan melakukan pengulangan sebanyak 5 kali pada setiap sampel disetiap kategorinya. Terdapat dua jenis kategori sampel yang digunakan, kategori I merupakan larutan timbal yang dicampurkan dengan asam tanat dan dikondisikan kedalam pH 9. Sedangkan kategori II merupakan larutan timbal murni tanpa percampuran apapun. Persamaan yang didapatkan pada sampel kategori I adalah $0,014x + 0,9851$ dengan nilai R^2 sebesar 0,8516 sedangkan pada sampel kategori II adalah $0,014x + 0,0286$ dengan nilai R^2 sebesar 0,8643. Data yang sudah diperoleh tersebut kemudian dilakukan pengujian pada lima jenis air yang diambil dari area sekitar kota Bandar Lampung. Pada pengujian tersebut diperoleh eror sebesar 2% dengan akurasi 98%. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi timbal dalam suatu larutan akan menghasilkan besar nilai intensitas bunyi yang semakin besar.

Kata kunci: Arduino uno, Fotoakustik, Laser dioda, Mikrofon kondenser, Python

ABSTRACT

SIMPLE PHOTOACOUSTIC SYSTEM FOR LEAD DETECTION IN WATER BASED ON DIODE LASER AND CONDENSER MICROPHONE USING PYTHON

By

Imtiyas Azzahra

The development of a simple photoacoustic system to detect lead levels in water has been realized. The system is based on a 450 nm laser diode and a condenser microphone and is controlled by an Arduino Uno microcontroller using Python. Python is used for the graphical user interface and for recording and processing data. The GUI creation utilized the tkinter library, the recording process utilized the pyaudio library, and the data processing process utilized the libraries: numpy, scipy, pandas, and matplotlib to represent the sound waves obtained. The method used in this research includes collecting data from samples that have known lead levels. The data was obtained by repeating each sample in each category five times. There are two categories of samples: Category I consists of lead solutions mixed with tannic acid and conditioned to pH 9, while Category II comprises pure lead solutions without any mixing. The equation obtained for category I samples was $0.014x + 0.9851$ with an R^2 value of 0.8516, while for category II samples, it was $0.014x + 0.0286$ with an R^2 value of 0.8643. The data that was obtained was then tested on five types of water taken from areas around the city of Bandar Lampung. The test yielded a 2% error with 98% accuracy. From the conducted research, it is known that higher concentrations of lead in a solution result in increased sound intensity values.

Keywords: Arduino uno, Condenser microphone, Dioda laser, Photoacoustic, Python

**SISTEM FOTOAKUSTIK SEDERHANA UNTUK DETEKSI KADAR
TIMBAL PADA AIR BERBASIS LASER DIODA DAN MIKROFON
KONDENSER MENGGUNAKAN PYTHON**

**Oleh
Imtias Azzahra**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
SARJANA SAINS**

**Pada
Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : Sistem Fotoakustik Sederhana untuk Deteksi Kadar Timbal pada Air Berbasis Laser Dioda dan Mikrofon Kondenser Menggunakan Python

Nama Mahasiswa : Imtiyas Azzahra

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041059

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Bandar Lampung, 19 Januari 2024

MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing

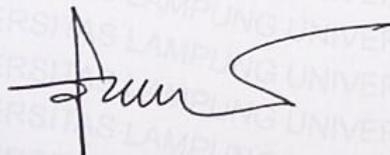


Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si.
NIP. 197108291997032001



Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc.
NIP. 198804032019031005

2. Ketua Jurusan Fisika



Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

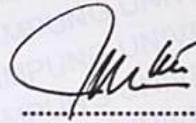
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

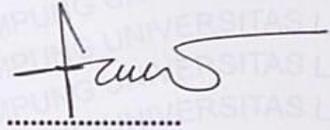
Ketua : Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si.



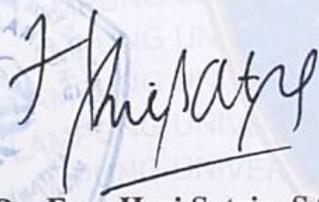
Sekretaris : Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc.



Penguji
Bukan Pembimbing : Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 15 Januari 2024

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 Januari 2024
Penulis,



Imtiyas Azzahra
NPM. 1917041059

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Imtiyas Azzahra. Penulis dilahirkan di Jakarta pada 03 Juli 2001. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Imron dan Ibu Hermin Samperuru. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDS Muhammadiyah Metro Pusat tahun 2013, MTsS Al-Muhsin tahun 2016 dan SMAS Muhammadiyah 1 Metro tahun 2019. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur mandiri SBMPTN tahun 2019. Selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung, penulis aktif tergabung pada organisasi Koperasi Mahasiswa Universitas Lampung (Kopma Unila) tahun 2019 – 2020 sebagai staf bidang keuangan, Unila Robotika dan Otomasi Universitas Lampung (URO Unila) tahun 2019 – 2020 sebagai anggota divisi robotic, dan Tim Minat Bakat Robotik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (Mipabots) tahun 2022 – 2023 sebagai sekretaris.

Penulis pernah mengikuti program Volunteer Desa Bersinergi Provinsi Lampung pada tahun 2020 sebagai koordinator publikasi dekorasi dokumentasi (Pubdekdok), dan Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) Kampus Merdeka pada Batch 2 di Orbit Future Academy serta Batch 4 di dr. Mekanik Academy. Penulis telah melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Dinas Perhubungan (Dishub) Kota Metro pada tahun 2022. Penulis melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Kebangsaan Periode I tahun 2021 di Kelurahan Purwosari, Kecamatan Metro Utara, Kota Metro.

MOTTO

“اللَّهُمَّ لَا سَهْلَ إِلَّا مَا جَعَلْتَهُ سَهْلًا وَأَنْتَ تَجْعَلُ الْحَزْنَ إِذَا شِئْتَ سَهْلًا”

Doa Memohon Kemudahan

“رَبِّ اشْرَحْ لِي صَدْرِي وَيَسِّرْ لِي أَمْرِي وَاحْلُلْ عُقْدَةً مِنْ لِسَانِي يَفْقَهُوا قَوْلِي”

QS. Thaha ayat 25-28

*“Ilmu tanpa adab seperti api tanpa kayu bakar,
adab tanpa ilmu seperti jasad tanpa ruh”*

Abu Zakaria Al-Anbari

*“Setiap kalian adalah pemimpin, dan setiap pemimpin akan dimintai
pertanggungjawaban atas yang dipimpinnya”*

HR. Al-Bukhari dan Muslim

“Perubahan adalah hasil akhir dari semua pembelajaran sejati”

Leo Buscaglia

*“Pendidikan formal akan membuatmu hidup,
pendidikan mandiri akan membuatmu kaya”*

Jim Rohn



PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah SWT, Karya ini saya persembahkan kepada:

Kedua Orangtuaku

Bapak Imron dan Ibu Hermin Samperuru

Terimakasih atas semua doa, dukungan moril serta materi, dan harapan yang telah diberikan kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan pendidikan S1 ini.

Nenekku

Terimakasih telah memberikan semangat, bantuan, dan dukungan kepadaku baik dalam bentuk materi dan doa.

Adikku

Terimakasih telah memberikan semangat, bantuan, dukungan dan doa kepadaku.

Almamaterku tercinta

“UNIVERSITAS LAMPUNG”

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji atas rasa syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat iman, sehat, dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis. Sehingga, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“SISTEM FOTOAKUSTIK SEDERHANA UNTUK DETEKSI KADAR TIMBAL PADA AIR BERBASIS LASER DIODA DAN MIKROFON KONDENSER MENGGUNAKAN PYTHON”**. Shalawat serta salam penulis haturkan kepada suri tauladan alam Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan para pengikutnya. Semoga kita semua dapat memperoleh pertolongan beliau di hari akhir kelak. Tujuan dari penulisan skripsi ini sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak untuk perbaikan dari skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi penambah referensi dan rujukan terhadap pengembangan riset fotoakustik menggunakan python berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser selanjutnya.

Bandar Lampung, 19 Januari 2024
Penulis,

Imtiyas Azzahra
NPM. 1917041059

SANWACANA

Segala puja dan puji atas rasa syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat iman, sehat, dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis. Sehingga, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Sistem Fotoakustik Sederhana untuk Deteksi Kadar Timbal pada Air Berbasis Laser Dioda dan Mikrofon Kondenser Menggunakan Python”**. Dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Sehingga, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si., sebagai Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan saran dan kritik yang membangun selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi ini hingga selesai.
2. Bapak Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc., sebagai Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan saran dan masukan selama proses penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., sebagai Dosen Pembahas dan selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan koreksi, kritik serta saran yang membangun selama penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Drs. Pulung Karo-Karo M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberikan bimbingan dan arahan selama masa perkuliahan.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas MIPA Universitas Lampung.
6. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu yang telah diberikan selama penulis menjadi mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung
7. Para staff dan karyawan Jurusan Fisika yang telah membantu penulis memenuhi kebutuhan administrasi dan lainnya selama penulis menjalani perkuliahan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

8. Hj. Lismidar, SKM., selaku nenek penulis yang telah memberikan semangat, doa, dukungan moril serta materi selama penulis menjalani perkuliahan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
9. Kedua Orang Tua Penulis, Bapak Imron dan Ibu Hermin Samperuru yang telah memberikan perhatian, doa, nasihat, dan dukungan kepada penulis selama menjalani kuliah di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
10. M. Ichsan Fauzan selaku adik penulis yang telah memberikan semangat, doa, dukungan kepada penulis selama menjalani perkuliahan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
11. Hauzan Khoirullah Miftah & Tamado Hendrian Simarmata selaku rekan tim penelitian fotoakustik yang telah memberikan saran dan masukan, serta dukungan kepada penulis selama menjalani penelitian di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
12. Fadhilla Azzahra, Rifki Mohamad Kurniawansyah, Alfinda Okta Idealistiti, Serly Assola Tya Nisa, Aryu Kusmita, Adinda Rachma Febryana, Dhea Amanda, Mar Atun Nabilah Chaniago, Tri Lestari, Ajeng Oktasari, Ruth Sanilawati Sipangkar selaku sahabat penulis yang telah memberikan doa dan dukungan kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
13. Teman-teman satu perjuangan Fisika angkatan 2019, keluarga besar Himafi FMIPA Unila, yang telah bersama-sama dengan penulis dalam menjalani perkuliahan dan telah memberikan doa serta motivasi pembelajaran kehidupan kepada penulis agar bisa menjalani kehidupan yang akan datang.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan balasan atas segala kebaikan yang telah dilakukan oleh semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 19 Januari 2024

Imtiyas Azzahra

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
PENGESAHAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Masalah	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Studi Literatur	7
2.2 Arduino Uno	9
2.3 Fotoakustik	11
2.3.1 Pembangkitan Fotoakustik	12
2.3.2 Penggunaan Laser	13

2.4	Laser Dioda	14
2.5	Modulasi Laser.....	15
2.6	Pb	17
2.7	Air	19
2.8	Python	21
2.9	Transformasi Fourier.....	22
2.9.1	<i>Discrete Fourier Transform (DFT)</i>	22
2.9.2	<i>Fast Fourier Transform (FFT)</i>	24
2.10	Mikrofon Kondenser	27
2.11	Perekaman Suara.....	29
2.11.1	Sampel per Frame.....	29
2.11.2	Sampel Rate.....	30
2.11.3	Bit Depth	31
2.11.4	Saluran Audio.....	32
2.12	Bunyi.....	33
2.13	Kerapatan Larutan.....	36

III.METODE PENELITIAN

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	38
3.2	Alat dan Bahan.....	39
3.3	Prosedur Penelitian.....	40
3.3.1	Studi Literatur	41
3.3.2	Rancang Desain Sistem Fotoakustik.....	41
3.3.3	Rancang Desain Sistem Perekaman Akustik	44
3.3.4	Rancang Desain Perangkat Lunak	45
3.3.4.1	Perancangan Perangkat Lunak Modulasi Laser.....	47
3.3.4.2	Perancangan Perangkat Lunak Perekaman	50
3.3.4.3	Perancangan Perangkat Lunak Domain Frekuensi	51
3.3.5	Pembuatan Sampel.....	53
3.3.5.1.	Larutan Induk.....	53
3.3.5.2.	Larutan Standar Timbal	54
3.3.5.3.	Larutan Asam Tanat.....	55
3.4	Pengujian Sistem.....	56
3.4.1	Karakterisasi Modulasi Laser.....	56
3.4.2	Pengujian Keseluruhan Sistem.....	58
3.4.2.1.	Pengujian Sampel	58
3.4.2.2.	Penentuan Penggunaan Sampel	59
3.4.2.3.	Pengujian Bahan Uji	60
3.4.3	Perbandingan Hasil Pengujian Sistem	61

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Realisasi Perangkat Lunak	62
4.1.1	Pembuatan GUI.....	62
4.1.1.1.	GUI Utama.....	64
4.1.1.2.	GUI Modulasi Laser	67
4.1.1.3.	GUI Perekaman Sampel/Bahan Uji	76

4.1.2 Pengolahan Audio	80
4.1.3 Penyesuaian Laser	82
4.2 Pembacaan Perekaman	84
4.3 Karakterisasi Modulasi Laser	86
4.4 Larutan Standar Timbal	90
4.4.1. Pembuatan Sampel	91
4.4.2. Pembacaan Konsentrasi Larutan	93
4.5 Pengujian Keseluruhan Sistem	95
4.6 Kondisi Pb Akibat Penambahan Asam Tanat pada Larutan	98
4.7 Analisis Hasil Penelitian	100
4.7.1. Hubungan Kerapatan Larutan dan Kuat Bunyi	100
4.7.2. Pembacaan Intensitas Bunyi	102
4.7.3. Pengaruh Asam Basa Terhadap Kuat Bunyi	103

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan	105
5.2 Saran	105

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Panjang Gelombang Absorpsi Timbal.....	9
Gambar 2. 2 (a) Arduino Uno (b) Arduino IDE.....	10
Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Fotoakustik	13
Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Laser Dioda	15
Gambar 2. 5 Gambaran Sinyal Modulasi PWM.....	16
Gambar 2. 6 Contoh Dekomposisi Sinyal Domain Waktu Menggunakan FFT..	25
Gambar 2. 7 Bagian-Bagian Mikrofon Kondenser.....	27
Gambar 2. 8 Mikrofon Kondenser dengan Elektret pada <i>Backplate</i>	28
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	40
Gambar 3. 2 Perancangan Modulasi Laser.....	42
Gambar 3. 3 Perancangan Sistem Fotoakustik	42
Gambar 3. 4 Diagram Blok Modulasi Laser	43
Gambar 3. 5 Perancangan Sistem Perekaman Akustik.....	44
Gambar 3. 6 Diagram Blok Perancangan Sistem Perekaman	45
Gambar 3. 7 Diagram Alir Pemrograman Penelitian	46
Gambar 3. 8 Rancang Desain Jendela Utama GUI	46
Gambar 3. 9 Diagram Alir Pemrograman Modulasi Laser	48
Gambar 3. 10 Rancang Desain GUI Modulasi Laser	50
Gambar 3. 11 Diagram Alir Pemrograman Perekaman.....	50
Gambar 3. 12 Rancang Desain GUI Perekaman Sampel/Bahan Uji.....	51
Gambar 3. 13 Diagram Alir Pemrograman Domain Frekuensi.....	52
Gambar 3. 14 Rancang Grafik Hubungan Frekuensi Laser dan Intesitas Suara .	57
Gambar 3. 15 Rancang Grafik Hubungan Duty Cycle dan Intesitas Suara.....	57

Gambar 4. 1 Tampilan GUI Utama	66
Gambar 4. 2 Tampilan GUI Modulasi Laser	75
Gambar 4. 3 Tampilan GUI Perekaman Sampel/Bahan Uji.....	79
Gambar 4. 4 Pengambilan Data Modulasi Laser pada (a) Air (b) Timbal	87
Gambar 4. 5 Grafik Hubungan Frekuensi Laser dan Intesitas Bunyi.....	87
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Duty Cycle dan Intesitas Suara.....	88
Gambar 4. 7 Grafik Hasil Antar Kategori Sampel	94
Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Kerapatan Larutan dan Kuat Bunyi	101

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Spesifikasi Arduino Uno	10
Tabel 3. 1 Rancangan Jadwal Penelitian	38
Tabel 3. 2 Alat dan Bahan Penelitian	39
Tabel 3. 3 Pembuatan Larutan Sampel Pb Kategori II.....	55
Tabel 3. 4 Pembuatan Larutan Sampel Pb Kategori I	55
Tabel 3. 5 Rancang Tabel Data Hubungan Frekuensi Laser dan Intesitas Suara.	56
Tabel 3. 6 Rancang Tabel Data Hubungan <i>Duty Cycle</i> dan Intesitas Suara.....	57
Tabel 3. 7 Rancangan Tabel Data Hasil Pemindaian Sampel Kategori I.....	59
Tabel 3. 8 Rancangan Tabel Data Hasil Pemindaian Sampel Kategori II.....	59
Tabel 3. 9 Rancangan Tabel Data Hasil Pengujian Bahan Uji.....	60
Tabel 3. 10 Rancangan Tabel Data Hasil Perbandingan	61
Tabel 4. 1 Pembuatan Larutan Sampel Pb Kategori II.....	91
Tabel 4. 2 Pembuatan Larutan Sampel Asam Tanat Sebanyak 100 mL	92
Tabel 4. 3 Pembuatan Larutan Sampel Pb Kategori I	93
Tabel 4. 4 Hasil Antar Kategori Sampel	94
Tabel 4. 5 Hasil Pengambilan Data sebagai Nilai Parameter Referensi	95
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Bahan Uji Menggunakan Alat Penelitian	96
Tabel 4. 7 Hasil Perbandingan Bahan Uji	96
Tabel 4. 8 Karakteristik Sistem	97
Tabel 4. 9 Hubungan Tingkat Kerapatan Larutan dan Kuat Bunyi.....	101
Tabel 4. 10 Hubungan Tingkat Kerapatan Timbal dalam Larutan dan Kuat Bunyi	102
Tabel 4. 11 Hubungan Tingkat pH Larutan dan Kuat Bunyi pada Sampel.....	104
Tabel 4. 12 Hubungan Tingkat pH Larutan dan Kuat Bunyi pada Bahan Uji ...	104

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air menjadi kebutuhan vital bagi setiap makhluk hidup, terlebih pada manusia. Air berperan sebagai katalisator, fasilitator pertumbuhan, pengatur suhu tubuh, pelumas, pengangkut dan alat angkut. Namun dengan perannya yang sangat berarti tersebut, tubuh tidak dapat memproduksi kebutuhan air secara mandiri. Sehingga air terkategori sebagai zat gizi makro esensial. Mengonsumsi air minum adalah cara dalam memenuhi kebutuhan tubuh terhadap air. Mengonsumsi air minum bagi manusia tentu tidak dapat diremehkan. Menurut Muyasaro (2012) hal tersebut dikarenakan sebanyak 80% tubuh manusia tersusun atas air, sehingga ketika seseorang mengalami dehidrasi akibat kekurangan air dapat menyebabkan malfungsi pada organ yang dapat berakibat fatal berupa kehilangan fungsi total pada organ tersebut (Baharuddin & Wahyuni, 2005).

Untuk dikonsumsi sebagai air minum, air yang berasal dari alam tersebut perlu diketahui kualitasnya. Hal itu dikarenakan air tersebut akan masuk dan diserap oleh tubuh. Selain itu, karena karakteristik air yang rentan terkontaminasi oleh zat lainnya menyebabkan air mudah tercemar oleh berbagai unsur yang umumnya adalah logam berat, berupa timbal salah satunya. Terlepas dari asal timbal tersebut, keberadaan timbal pada air bukanlah hal yang dapat diremehkan. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No.492/MENKES/PER/IV/2010 telah ditetapkan kadar batas kandungan berbagai logam berat, dengan kadar batas timbal maksimum pada air minum Indonesia yang diperbolehkan adalah sebesar 0,01 mg/l. Sedangkan kadar batas timbal maksimum pada air bersih Indonesia yang diperbolehkan adalah sebesar 0,05 mg/l berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No.416/MENKES/PER/IX/1990.

Timbal menjadi salah satu logam yang disebut dengan *the big three heavy metal* (logam berat) bersama merkuri dan kadmium. Disebut demikian karena logam-logam tersebut bersifat non esensial (tidak dibutuhkan oleh tubuh) serta memiliki tingkat daya racun yang tinggi. Timbal sendiri termasuk kedalam jenis logam *non degradable* (tidak dapat dihancurkan oleh makhluk hidup) sehingga keberadaannya hanya akan terkumpul pada lingkungan yang kemudian membentuk senyawa kompleks bersama bahan organik dan anorganik pada permukaan air (Kabuhung *et al.*, 2013). Berdasarkan pemaparan tersebut, dapat dikatakan bahwa air memiliki potensi sebagai pencemar logam berat pada lingkungan yang berujung pada pencemaran tanah. Sehingga makhluk hidup baik manusia, hewan, ataupun tumbuhan yang hidup pada lingkungan tersebut memiliki resiko terkontaminasi timbal yang terkandung pada air lingkungan tersebut (Agustina, 2014).

Banyak faktor yang dapat menyebabkan air tercemar oleh air. Umumnya faktor-faktor tersebut terbagi atas dua kategori, yakni faktor dari alam dan faktor dari manusia. Tercemarnya air oleh timbal melalui alam umumnya diakibatkan oleh tektonik, vulkanik, upwelling, dan masukan dari atmosfer. Sedangkan tercemarnya air oleh timbal akibat manusia umumnya diakibatkan oleh kegiatan manusia itu sendiri yang dapat berasal dari limbah industri, PDAM, dan masih banyak lagi.

Pada manusia, logam dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada hampir keseluruhan sistem tubuh. Diantaranya dapat menyebabkan anemia, ensefalopati, penurunan pendengaran tipe sensorineural, penyakit renal progresif, takikardia, aritmia, infertilitas, gangguan pertumbuhan janin dan masih banyak lagi (Widowati *et al.*, 2008). Pada orang dewasa dapat diidentifikasi seperti pucat, bahkan dapat menyebabkan kelumpuhan. Sedangkan pada anak, dapat menyebabkan gangguan pertumbuhan baik fisik, gangguan perkembangan mental, gangguan pada gigi gusi serta tulang (dalam jangka waktu lama). Dan jika logam terus mengalami penumpukan pada tubuh seorang anak dapat menyebabkan anemia dan kerusakan fungsi otak serta kegagalan fungsi ginjal (Nuraini *et al.*, 2015).

Terdapat berbagai metode untuk mengetahui keberadaan timbal pada air. Seperti metode *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis) yang dilakukan pada penelitian Aldinomera *et al.* (2014) dan Alsamarrai (2011). Metode lainnya adalah Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) yang dilakukan pada penelitian Permata *et al.* (2018) dan Ainna (2013). Kedua metode tersebut merupakan metode yang umum digunakan untuk mengetahui keberadaan timbal pada air. Metode lainnya adalah dengan menggunakan metode fotoakustik (Volkov *et al.*, 2020). Pada metode UV-Vis dan SSA/AAS cenderung membutuhkan waktu pengukuran yang. Sedangkan pada metode fotoakustik hanya membutuhkan waktu yang singkat dalam melakukan pengukuran.

Berbagai penelitian dengan menggunakan efek fotoakustik telah dilakukan dalam berbagai bentuk sampel. Penelitian menggunakan sampel padatan telah dilakukan oleh Miftah (2022) berupa deteksi korosi logam di bawah lapisan cat. Penelitian menggunakan sampel zat gas pernah dilakukan oleh Sutiadi & Wasono (2003), serta penelitian menggunakan sampel zat cair pernah dilakukan Hodgson *et al.* (1995). Penelitian yang dilakukan Hodgson *et al.* (1995) menggunakan laser pada metode fotoakustik untuk deteksi kadar minyak dalam air. Ariwanto (2012) juga memanfaatkan pembangkitan sinyal fotoakustik pada penelitiannya dengan menggunakan sampel cairan aluminium hidroksida. Penelitian tersebut menggunakan laser dioda yang termodulasi dengan kipas (*chopper*) sebagai sumber cahaya untuk menghasilkan efek fotoakustik. Fluktuasi tekanan yang terjadi kemudian dideteksi oleh mikrofon kondenser komersial yang kemudian akan dirubah menjadi sinyal listrik dan diteruskan ke osiloskop untuk diketahui bentuk gelombang dan tegangan *peak to peak* oleh mikrofon tersebut. Pada penelitian Miftah (2022) memanfaatkan arduino uno sebagai sistem kendali untuk mengatur gerak XY Stage dan modulasi laser. Berkaitan dengan modulasi laser, Apriyanto *et al.* (2022) telah berhasil memodulasi laser dioda dengan memanfaatkan arduino uno sebagai sumber eksitasi pada fotoakustik spektroskopi.

Perancangan sistem fotoakustik sederhana yang dilakukan Miftah (2022) sebelumnya memanfaatkan *software* LabVIEW 2020 sebagai sistem kendalinya. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) merupakan perangkat lunak (*software*) yang menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis atau block diagram dengan layout visual atau menggunakan model aliran data. Program LabVIEW sering disebut juga sebagai Virtual Instruments (Anisah & Sudarno, 2019). LabVIEW sendiri bersifat closed source sehingga membutuhkan biaya yang tidak sedikit untuk lisensi. Selain itu, dengan bersifat closed source tidak terdapat banyak pilihan sebagai bentuk penyesuaian bagi pengguna karena semua fitur dikelola pengembang atau organisasi pembuat kode (Kumar & Goswami, 2022). Mengatasi kedua hal tersebut, maka digunakan bahasa pemrograman Python pada penelitian ini.

Sejak dikembangkan pada tahun 1990, tingkat popularitas Python terus meningkat hingga saat ini menjadi salah satu bahasa pemrograman paling populer di dunia (Hasibuan, 2020). Kepopuleran Python meningkat secara signifikan sejak tahun 2010-an. Python banyak digemari karena penulisan sintaksis yang mudah dipahami karena termasuk sebagai *high-level programming language*. Sehingga dapat memudahkan proses pembelajaran. Python memiliki berbagai *library* yang dapat digunakan untuk memenuhi suatu kegiatan ilmiah dan memiliki dukungan komunitas yang kuat karena python bersifat open source. Python juga mendukung pengolahan dan pemrosesan data yang besar, serta mudah dalam melakukan integrasi dengan berbagai bahasa pemrograman lain (Alfarizi *et al.*, 2023).

Berdasarkan pemaparan tersebut, maka dilakukan perancangan sistem fotoakustik sederhana sebagai pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan Miftah (2022) sebelumnya. Penelitian ini akan terbagi menjadi tiga tahapan yaitu perancangan sistem fotoakustik, perancangan sistem perekaman akustik, serta perancangan perangkat lunak. Tahap perancangan sistem fotoakustik pada penelitian ini tidak menggunakan sistem gerak XY Stage seperti pada penelitian Miftah (2022) sebelumnya namun akan tetap melakukan tahap modulasi laser sebagaimana pada penelitian tersebut. Tahap perancangan sistem perekaman

akustik menggunakan mikrofon kondenser yang ditambah dengan amplifier. Serta tahap perancangan desain perangkat lunak yang mengalami perubahan dari penelitian sebelumnya dari menggunakan LabVIEW menjadi Python, tanpa melakukan perbandingan. Penggunaan Python juga ditujukan untuk mengolah data akustik yang telah diperoleh dari tahap perekaman sebelumnya. Selain itu, Python juga bertindak sebagai *Graphical Pengguna Interface* (GUI) untuk kebutuhan kedua tahapan sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana mendesain perangkat lunak sebagai kendali sistem fotoakustik untuk mendeteksi kadar timbal pada air berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python?
2. Bagaimana cara mengetahui perbedaan kadar timbal pada air menggunakan sistem fotoakustik berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mendesain perangkat lunak dan *Graphical Pengguna Interface* (GUI) sebagai kendali sistem fotoakustik yang terintegrasi dalam satu mikrokontroler untuk mendeteksi kadar timbal pada air berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python.
2. Mendapatkan perbedaan nilai intensitas bunyi pada air dengan kadar timbal yang beragam menggunakan sistem fotoakustik berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dilakukannya penelitian ini adalah terealisasinya sistem fotokakustik sederhana yang terintegrasi dalam mendeteksi kadar timbal pada air berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Modul mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Uno.
2. Laser yang digunakan adalah laser dioda biru 250 mW dengan panjang gelombang 450 nm.
3. Frekuensi dan intensitas laser diatur oleh Arduino Uno melalui Python.
4. Alat rekam akustik yang digunakan adalah mikrofon kondenser tipe behringer ECM80000.
5. Jenis timbal yang digunakan pada sampel adalah c.
6. Pengujian data dilakukan pada air minum kemasan tanpa ketentuan merk tertentu, air kawasan SPBU dan industri, air kawasan SPBU non industri, air perumahan dekat TPS, serta air perumahan jauh TPS yang ada pada area sekitar kota Bandar Lampung.
7. *Software* yang digunakan adalah Visual Studio Code 1.44.2 yang telah dilengkapi dengan Python Extension.
8. Penelitian ini bersifat kuantitatif dan merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya, dari menggunakan *software* LabVIEW 2020 menjadi menggunakan bahasa pemrograman Python.

II. TINJAUAN PUSTAKA

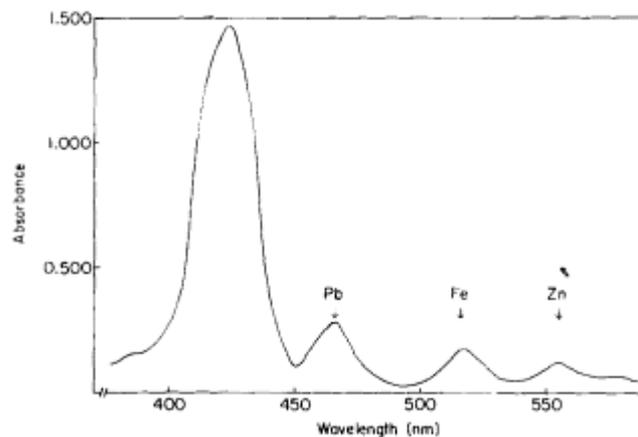
2.1 Studi Literatur

Pada penelitian Miftah (2022) sebelumnya dalam perancangan sistem fotoakustik sederhana sebagai deteksi korosi logam di bawah lapisan cat yang memanfaatkan Arduino Uno sebagai sistem kendali untuk mengatur gerak XY Stage dan modulasi laser. Gerak XY Stage dilakukan berdasarkan pada penelitian Setiawan *et al.* (2018) dalam perancangan sistem fotoakustik sebagai deteksi keretakan permukaan pelat alumunium. Sedangkan modulasi laser pada penelitian tersebut dilakukan berdasarkan pada penelitian Apriyanto *et al.* (2022) yang berhasil memodulasi laser dioda dengan memanfaatkan Arduino Uno sebagai sumber eksitasi pada fotoakustik spektroskopi. Citra yang didapatkan pada penelitian Miftah (2022) kemudian diolah dengan menggunakan LabVIEW, yang juga bertindak sebagai *Graphical Pengguna Interface* (GUI) untuk kendali sistem gerak XY Stage, modulasi laser.

Pada penelitian Aldinomera *et al.* (2014) yang melakukan analisis penentuan kadar Pb pada air menggunakan metode spektrofotometri *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis). Menurut Alsamarrai (2011) UV-Vis dilakukan untuk mengukur panjang gelombang suatu atom yang mengalami absorpsi pada suatu sampel. Sedangkan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dilakukan untuk mengetahui kadar suatu atom pada suatu sampel. UV-Vis dilakukan dengan menambahkan reagen pengompleks sehingga dihasilkan senyawa kompleks, sedangkan pada SSA atom senyawa pada sampel dirubah kedalam keadaan dasar terlebih dahulu.

Pada penelitian Permata *et al.* (2018) melakukan analisis pengujian kandungan Pb pada air melalui Laboratorium Balai Riset dan Standardisasi (BARISTAND) Industri Palembang, Sumatera Selatan. Pengujian tersebut dilakukan berdasarkan SNI 6989.6:2009, dengan menggunakan metode SSA AA-7000 pada kisaran kadar Pb dengan panjang gelombang 283,3 nm. Batas deteksi Pb pada SSA AA-7000 adalah $<0,01$ mg/l. Menurut Ainna (2013) alasan penggunaan panjang gelombang 283,3 nm karena pada panjang gelombang tersebut merupakan panjang gelombang paling efisien dalam memicu transisi elektronik Pb dari tingkat energi dasar ke tingkat energi yang lebih tinggi. Suatu atom dapat menyerap energi dan berpindah dari tingkat energi dasar ke tingkat energi yang lebih tinggi. Ketika atom berada pada tingkat energi yang lebih tinggi, mereka tidak stabil dan akan kembali ke tingkat energi dasar dengan cara melepaskan energi tersebut dalam bentuk sinar. Setiap panjang gelombang memiliki energi tertentu. Pb mempunyai energi sebesar $7,0134 \times 10^{-8}$ Joule. Sehingga dengan energi tersebut akan menyebabkan atom Pb dari keadaan dasar (Pb_0) tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi (Pb^*). Absorbansi adalah kemampuan sampel untuk menyerap radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu, yang disebut dengan panjang gelombang maksimum.

Pada penelitian Physka (2018) menunjukkan panjang gelombang Pb yang mengalami absorpsi yakni sebesar 450 nm. Pada penelitiannya, Pb direaksikan dengan asam tanat pada pH 9. Kemudian pada penelitian Tan *et al.* (2015) menunjukkan panjang gelombang Pb yang mengalami absorpsi yakni sebesar 458 nm. Larutan yang digunakan merupakan campuran larutan Pb dan TEAC, dengan pH 9-11 menunjukkan absorbansi tertingginya. Pada penelitian Wati (2010) Pb mengalami absorpsi tertinggi pada panjang gelombang 430 nm. Pada penelitian tersebut larutan Pb yang digunakan ditambahkan asam tartrat, kalium sianida, larutan ammonia, dan larutan natrium sulfida dengan. Dan pada penelitian Karai (1981) menunjukkan panjang gelombang Pb dalam darah yang mengalami absorpsi yakni sebesar 450an nm, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Panjang Gelombang Absorpsi Timbal (Karai, 1981)

Warna pada cahaya tampak jika diurutkan berdasarkan panjang gelombang dari yang terbesar hingga terkecil adalah merah (620-750 nm) – jingga (590-620 nm)-kuning (570-590 nm) – hijau (495-570 nm) – biru (450-495 nm) -ungu (380-450 nm). Pada penelitian Hasanah (2022) menjelaskan beberapa panjang gelombang dari laser dioda diantaranya adalah panjang gelombang inframerah (780–850 nm), laser merah (650–720 nm), laser biru (410–460 nm), laser hijau (520–570 nm). Sehingga berdasarkan hal tersebut serta Pb yang mengalami absorpsi, maka pada penelitian ini dapat digunakan laser dioda biru.

2.2 Arduino Uno

Arduino adalah papan rangkaian elektronik yang bersifat open source, yang berarti dapat ditunjukkan kepada siapa saja. Arduino bisa menerima masukan dari berbagai sensor dan dapat melakukan pengendalian dengan menggunakan lampu, motor, aktuator dan lain-lainnya. Arduino diprogram menggunakan bahasa pemrograman arduino yang memiliki kemiripan syntax dengan bahasa pemrograman C melalui *software* Arduino IDE. Serta dapat diintegrasikan melalui bahasa pemrograman lainnya seperti Python (Sasmoko, 2014). Arduino menggunakan keluarga mikrokontroler Atmega yang dirilis sebagai basis, namun ada perusahaan yang membuat clone arduino dengan menggunakan mikrokontroler lain. Mikrokontroler tersebut adalah chip atau IC (Integrated Circuit) yang bisa diprogram menggunakan

komputer. Tujuan menyematkan program pada mikrokontroler adalah agar rangkaian elektronik dapat membaca input, memproses input tersebut sehingga menghasilkan output sesuai yang diinginkan (Miftah, 2022).

Salah satu jenis arduino yang paling banyak digunakan adalah Arduino Uno. Arduino Uno adalah board mikrokontroler yang berbasis mikrokontroler ATmega328. Memiliki 14 pin I/O digital (6 diantaranya pin PWM), 6 pin input analog. Selain itu, tersedia power jack untuk sumber tegangan serta koneksi USB yang dapat digunakan untuk mengunggah sketch program sekaligus sebagai sumber tegangan pengganti power jack. Komunikasi serial USB A to USB B (USB printer) memudahkan komunikasi hardware dengan perangkat komputer/laptop (Adriansyah & Hidyatama, 2013).



(a)



(b)

Gambar 2. 2 (a) Arduino Uno (b) Arduino IDE (Arfandi dan Supit, 2019)

Tabel 2. 1 Spesifikasi Arduino Uno (Irsyam, 2019)

Karakteristik	Keterangan
Mikrokontroler	ATmega328
Tegangan operasi	5 V
Batas tegangan input	7-12 V
Pin I/O digital	14 (6 PWM)
Pin I/O analog	6
Arus DC tiap pin I/O	40 mA
Arus DC untuk pin 3.3V	50 mA
Memori	32 KB (Atmega) 0,5 KB (<i>bootloader</i>)
<i>SRAM</i>	2 KB (Atmega328)
<i>EEPROM</i>	1 KB (Atmega328)
<i>Clock Speed</i>	16 MHz

Arduino Uno dapat disuplai melalui koneksi USB atau dengan sebuah catu daya eksternal. Suplai eksternal dapat diperoleh dari sebuah adaptor AC ke DC atau baterai. Adaptor dapat dihubungkan dengan mencolokkan sebuah center-positive plug yang panjangnya 2,1 mm ke power jack dari board. Papan Arduino Uno dapat beroperasi pada sebuah catu daya eksternal 7 sampai 12 volt. Apabila disuplai lebih kecil dari 5 volt, maka pin VCC arduino akan mensuplai kurang dari 5 volt yang menyebabkan tegangan Arduino Uno menjadi tidak stabil. Jika disuplai melebihi dari 12 volt maka regulator tegangan Arduino Uno akan panas dan membahayakan papan Arduino Uno (Sokop et al., 2016). Papan Arduino Uno juga menyediakan komunikasi melalui serial yang tersedia pada pin 1 dan pin 0. Perangkat lunak yang bisa berkomunikasi dengan monitor serial yang akan dikirimkan ke board Arduino Uno. Ketika data dikirim dari chip USB ke komputer lampu LED pada board akan berkedip (Irsyam, 2019).

2.3 Fotoakustik

Efek fotoakustik pertama kali ditemukan oleh Alexander Graham Bell yang menemukan gelombang suara akibat cahaya yang terserap dalam suatu bahan pada tahun 1880 (Krishnaswamy, 2008). Efek tersebut ditemukan ketika ia melewatkan sinar matahari dengan intensitas termodulasi ke dalam bahan padat, menghasilkan gelombang akustik (Bell, 1880). Gelombang akustik didapatkan melalui eksitasi dari suatu material yang kemudian menghasilkan distorsi mekanis yang diinduksi secara termal, lalu ditangkap oleh lapisan piezoelektrik mikrofon. Singkatnya, efek fotoakustik adalah jenis eksitasi optik seperti bintik laser, yang menghasilkan gelombang akustik, karena energi cahaya yang diserap menyebabkan ekspansi termal pada suatu material (Dinc *et al.*, 2021). Efek tersebut dapat digunakan untuk menentukan perubahan mekanis pada suatu bahan atau membangkitkan struktur tersebut. Efek fotoakustik ini sendiri telah dipelajari secara luas dalam beberapa dekade belakangan ini, mulai dari bidang biomedis hingga analisis material (Krishnaswamy, 2008). Aplikasi yang telah umum dilakukan yakni pendeteksian material jenis gas dan material berskala kecil atau material yang larut dalam cairan (Tseng *et al.*, 2021).

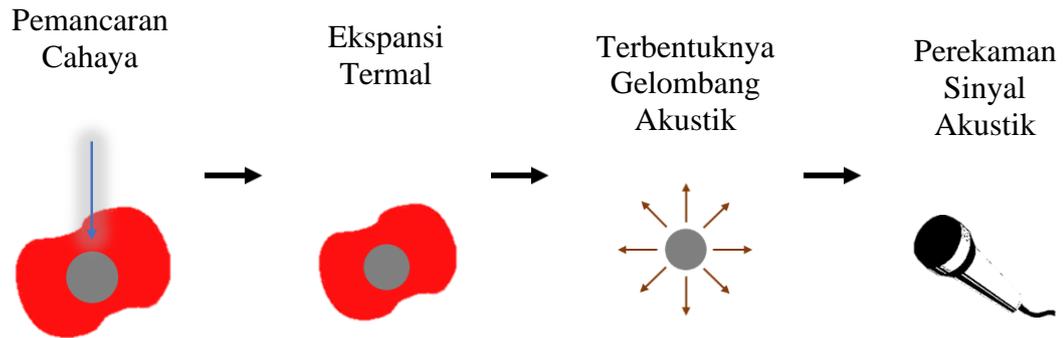
Didalam metode fotoakustik, permukaan cairan memiliki keunggulan tersendiri yaitu tidak memerlukan pengulangan dalam proses pemindaianya. Interaksi antara dua gelombang akustik pada permukaan cairan terjadi secara bersamaan selama periode sekitar 100 mikrodetik dan menghasilkan deformasi pada permukaan cairan yang mampu merekonstruksi gelombang optik secara holografik yang setara dengan salah satu dari dua gelombang akustik. Gelombang yang dibatasi dalam ruang dan waktu dapat diperlakukan sebagai superposisi linier dari gelombang bidang yang tidak terbatas. Sehingga data dapat didapatkan berdasarkan gelombang yang tidak terbatas tersebut, sebagai hasil dari respon permukaan cairan terhadap energi akustik tersebut (Wade, 1976).

2.3.1 Pembangkitan Fotoakustik

Proses fotoakustik dapat dikelompokkan menjadi tiga tahap yaitu:

- a. Pemancaran cahaya, dilakukan pada daerah spesifik dengan gelombang pendek dari cahaya laser (foton). Molekul atau partikel dalam sampel menyerap foton yang ditembakkan dari laser. Energi dari foton ini meningkatkan energi molekul atau partikel tersebut dan menyebabkan pemanasan dalam sampel. Tahapan ini umumnya dikenal dengan absorpsi foton oleh sampel (Orfanakis *et al.*, 2021).
- b. Ekspansi termal, tembakan laser pada suatu daerah spesifik dari sampel menghasilkan pemanasan yang menyebabkan ekspansi termal dan kontraksi sampel secara cepat. Perubahan volume ini menyebabkan terbentuknya gelombang akustik berupa gelombang suara pada sampel tersebut (Kratkiewicz *et al.*, 2019).
- c. Perekaman sinyal akustik, gelombang bunyi yang terbentuk dalam sampel dideteksi oleh mikrofon. Sinyal ini lalu direkonstruksi oleh komputer untuk membentuk suatu informasi tentang sampel secara komputasi (Singh, 2020).

Ilustrasi tahap – tahap tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Fotoakustik

Berdasarkan proses tersebut dapat dijabarkan bahwa pada fotoakustik, material dipapar dengan sinar laser yang dimodulasi untuk mencapai respon impuls termal dan akustik. Radiasi yang diserap oleh material selanjutnya menimbulkan fluktuasi (perubahan) panas dan mengakibatkan perubahan suhu pada material yang kemudian mempengaruhi perubahan tekanan. Perubahan tekanan inilah yang menimbulkan gelombang akustik dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi berkas laser, yang dikenal dengan gelombang fotoakustik. Gelombang tersebut merambat pada material dan dideteksi oleh detektor pada permukaan sampel (Janna *et al.*, 2022).

2.3.2 Penggunaan Laser

Parameter penting yang perlu diperhatikan dalam penggunaan laser pada metode fotoakustik adalah panjang gelombang laser, daya *output* laser, serta kemampuan modulasi laser. Parameter-parameter tersebut dapat disesuaikan berdasarkan kebutuhan penggunaan pada suatu material. Terutama pada panjang gelombang laser (Krishnaswamy, 2008).

Laser yang umum digunakan baik dalam metode fotoakustik atau metode lainnya adalah laser diode. Hal tersebut dikarenakan laser dioda memiliki panjang gelombang yang bervariasi berdasarkan jenis warnanya. Kelebihan lainnya dari laser dioda ini adalah mudah untuk ditemukan, harga yang relative lebih murah dibandingkan dengan jenis laser lainnya, serta memiliki daya yang lebih tinggi.

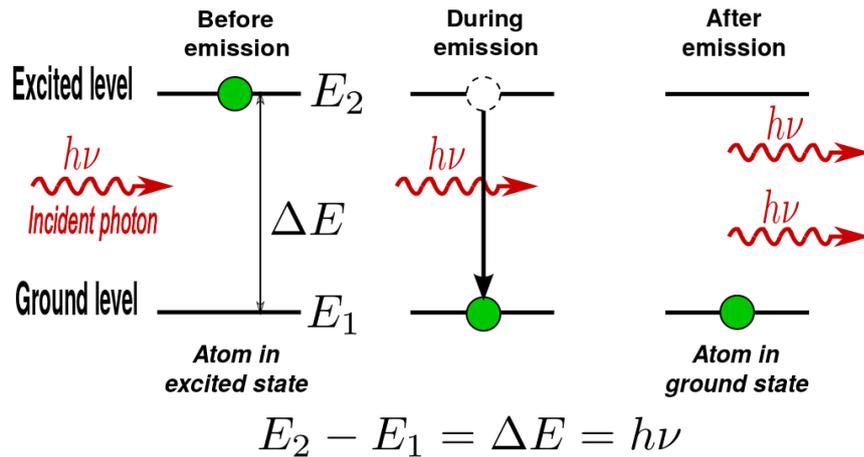
Selain itu, laser dioda juga memiliki kelemahan yakni panjang gelombang yang dapat berubah sesuai kondisi lingkungannya dan berkas cahaya berbentuk eliptikal (Hasanah, 2022).

2.4 Laser Dioda

Laser adalah singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, yaitu merujuk kepada proses penguatan cahaya oleh emisi radiasi yang terstimulasi. Laser bekerja dengan menghasilkan cahaya yang dihasilkan melalui proses emisi radiasi terstimulasi dari medium aktif. Medium aktif ini dapat berupa gas, cairan, atau padatan, tergantung pada jenis laser yang digunakan. Proses emisi radiasi terstimulasi ini memungkinkan cahaya yang dihasilkan oleh laser untuk memiliki kualitas dan karakteristik yang unik, seperti kecepatan, arah, spektrum, dan intensitas yang sangat tinggi. Ada tiga prinsip interaksi antara cahaya dengan materi, yaitu absorpsi, emisi spontan dan emisi terstimulasi (Pikatan, 1991).

Menurut Bahtiar *et al.* (2008) absorpsi adalah penyerapan. Ketika atom berada dalam keadaan tereksitasi. Keadaan tereksitasi menunjukkan keadaan atom yang berubah, dari keadaan dasar (berenergi rendah) kepada tingkat energi yang lebih tinggi. Perubahan energi tersebut terjadi akibat rangsangan dari suatu cahaya yang memberikan energi yang cukup. Sedangkan emisi spontan adalah pemancaran energi. Terjadi ketika atom mengalami peluruhan (kembali ke dalam keadaan dasar) akibat tidak bisa lagi naik ke level yang lebih tinggi.

Menurut Hasanah (2022) dari berbagai jenis laser, laser dioda menjadi laser yang banyak digunakan. Hal tersebut dikarenakan lebih mudah ditemukan, lebih murah, daya lebih tinggi dengan Panjang gelombang yang lebih bervariasi. Laser dioda sangat baik digunakan karena memiliki koherensi ruang, waktu dan berkas cahaya bersifat searah dan kompak. Disisi lain Laser Dioda juga memiliki kelemahan yaitu Panjang gelombang yang dapat berubah sesuai kondisi lingkungannya dan berkas cahaya berbentuk eliptikal. Medium yang sering digunakan pada laser adalah zat padat, cair, gas dan semikonduktor.



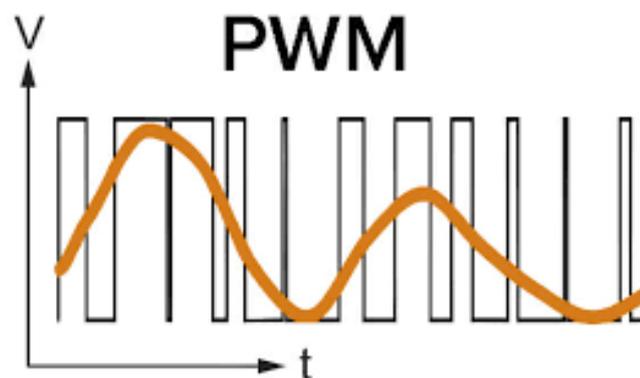
Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Laser Dioda

Prinsip dasar laser dioda adalah berdasarkan emisi terstimulasi. Emisi terstimulasi adalah penguatan cahaya datang dari pelebaran yang terjadi akibat foton-yang bertabrakan dengan atom lain yang masih dalam keadaan tereksitasi. Ketika foton tersebut memiliki energi yang sesuai dengan perbedaan energi antara tingkat energi tereksitasi dan tingkat energi dasar, akan menyebabkan peningkatan atom yang tereksitasi. Ketika atom yang tereksitasi meningkat, akan menyebabkan ada semakin banyak foton yang bertabrakan. Sehingga menyebabkan banyak foton yang memiliki panjang gelombang yang sama dan fasa yang sejajar dengan foton-foton asli. (Chandler, 1987).

2.5 Modulasi Laser

Modulasi adalah suatu proses penumpangan sinyal-sinyal informasi hasil keluaran kedalam sinyal pembawa (*carrier*) atau sinyal pembawa ini biasanya merupakan sinyal input yang ditentukan oleh *pengguna*, sehingga dapat ditransmisikan ke tujuan (Matua *et al.*, 2017). Sinyal informasi tersebut dapat berupa suara, video, atau data digital, sedangkan sinyal pembawa biasanya berupa gelombang elektromagnetik seperti gelombang radio, cahaya atau gelombang mikro. Dalam prosesnya, sinyal informasi tersebut dikombinasikan dengan sinyal pembawa dengan cara mengubah amplitudo, frekuensi, atau fase sinyal pembawa (Bahtiar *et al.*, 2008).

Menurut Handika (2011) terdapat berbagai jenis modulasi laser yang dapat digunakan, namun pada laser sendiri umumnya menggunakan jenis modulasi PWM atau *Pulse Width Modulation*. Pada jenis modulasi ini, pulsa atau frekuensi pembawa dapat diubah-ubah sesuai dengan besarnya tegangan sinyal pemodulasi. Semakin besar tegangan sinyal pemodulasi (informasi) maka semakin lebar pulsa-pulsa yang dihasilkan. Modulasi PWM juga dikenal dengan PDM atau *Pulse Duration Modulation*. Teknik modulasi ini mengontrol variasi siklus dari gelombang persegi (dengan beberapa frekuensi dasar) sesuai dengan input sinyal modulasi. Variasi amplitudo pada sinyal modulasi mewakili saat posisi aktif pada variasi periode gelombang persegi. Oleh karena itu, cara ini disebut juga sebagai teknik pengkonversi dari V (tegangan) ke T (waktu).



Gambar 2. 5 Gambaran Sinyal Modulasi PWM (Handika, 2011)

Pada intinya PWM mengubah lebar pulsa dari sinyal pembawa dalam kaitannya dengan sinyal informasi, sehingga dapat digunakan untuk mengatur kecerahan atau intensitas cahaya laser. Selain PWM jenis lainnya dari modulasi laser yang dapat digunakan adalah PAM (*Pulse Amplitudo Modulation*), PCM (*Pulse Amplitudo Modulation*), dan PPM (*Pulse Position Modulation*). PAM mengubah amplitudo pulsa dari sinyal pembawa sesuai dengan sinyal informasi, sehingga dapat digunakan untuk mengatur daya keluaran atau kekuatan cahaya laser. PCM mengubah sinyal informasi menjadi kode biner, yang kemudian ditransmisikan melalui sinyal pembawa. Dalam modulasi laser, sinyal PCM dapat digunakan untuk mentransmisikan data digital melalui cahaya laser. Sedangkan PPM mengubah

posisi waktu dari pulsa sinyal pembawa dalam kaitannya dengan sinyal informasi. Dalam modulasi laser, sinyal PMM dapat digunakan untuk mentransmisikan data digital melalui cahaya laser.

2.6 Pb

Logam berat terdiri atas unsur logam yang massa jenisnya lebih besar dari 5 gr/cm³ sehingga tergolong sebagai zat pencemar dan berbahaya karena hanya akan terkumpul di dalam kolom air, sedimen, dan organisme yang tidak dapat hilang secara alami (Harun *et al.*, 2008). Pb merupakan salah satu unsur logam dari kategori logam berat yang merupakan komponen alami penyusun tanah. Karena logam berat umumnya ditemukan sebagai salah satu bahan pencemar atau limbah pada perairan yang bersifat non esensial sehingga sangat berbahaya jika ditemukan dalam jumlah yang banyak pada air karena dapat menjadi racun bagi makhluk hidup yang mengonsumsinya (Artati, 2018). Pb menjadi salah satu logam berat yang sangat umum ditemukan disbanding unsur logam berat lainnya pada air yang jika terakumulasi dalam tubuh manusia dapat menyebabkan gangguan kesehatan (Febriwani *et al.*, 2019). Hal tersebut disebabkan Pb yang juga termasuk kedalam logam berat bersifat non degradable atau tidak dapat dihancurkan oleh makhluk hidup. Sehingga keberadaannya akan terus menerus terakumulasi pada dasar perairan yang kemudian membentuk senyawa kompleks bersama bahan organik dan anorganik yang disebut sebagai sedimen (Natsir *et al.*, 2019). Karena hal tersebut, menurut Yuyu & Permanawati (2015) logam berat menjadi satu dari beberapa faktor lainnya dalam menentukan status mutu kualitas suatu perairan.

Logam berat yang berasal dari alam, salah satunya merupakan akibat dari tektonik, vulkanik, upwelling, dan masukan dari atmosfer. Logam berat yang berasal dari kegiatan manusia biasanya berasal dari buangan limbah cair industri dan masih banyak lagi (Puspasari, 2006). Pb merupakan jenis logam yang bersifat mudah dimurnikan dari pertambangan dan pengolahan bijih yang memiliki karakteristik berwarna abu-abu kebiruan yang mengkilat (Murthy *et al.*, 2014). Hal tersebut menyebabkan Pb umum digunakan pada proses produksi suatu industri baik

digunakan sebagai bahan baku, katalisator, atau bahkan bahan utama. Dalam penambangan emas yang menggunakan air raksa (Hg) sebagai media pengikat emasnya. Ketika suatu material sudah dianggap tidak mengandung emas material tersebut beralih mengandung berbagai logam berat seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan Pb. Material yang sudah tidak mengandung emas tersebut disebut sebagai limbah pertambangan yang oleh penambang akan dibuang begitu saja ke perairan dalam bentuk sulfida (Yulis dan Desti, 2019).

Selain penambangan, aktivitas antropogenik dan lalu lintas transportasi laut di pelabuhan juga dapat menjadi salah satu penyebab tercemarnya perairan Pb. Suatu industri yang tidak dilengkapi sistem pengolahan limbah akan menghasilkan limbah yang mengandung merkuri (Hg), besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), Pb, seng (Zn) kromium (Cr), kadmium (Cd) dan nikel (Ni). Pb yang terlarut dan tersuspensi dalam perairan dapat terikat pada partikel berbagai ukuran yang mengandung bahan organik. Logam yang telah terikat tersebut akan mengalami proses agregasi dan mengendap di dasar perairan bersama sedimen (Natsir *et al.*, 2019). Sehingga air yang telah tercemar tersebut jika digunakan dapat menjadi racun pada tubuh makhluk hidup. Pada PDAM (Perusahaan Daerah Air Minum) proses penyaluran air minum yang dilakukan adalah dengan menggunakan pipa besi. Pipa besi tersebut tersusun salah satunya atas Pb yang digunakan sebagai penghambat korosif. Pb sendiri mudah terlepas yang dapat disebabkan oleh berbagai factor seperti faktor lingkungan, jenis dan ketebalan pipa, umur atau lamanya pipa, tekanan, dan proses korosifikasi. Sehingga tak jarang ditemukan kadar Pb pada air minum pada suatu rumah yang dapat berdampak buruk terhadap kesehatan akibat tercampurnya Pb pada air minum yang dialirkan sepanjang pipa besi tersebut (Herman, 2017).

Logam berat yang telah melebihi ambang batas akan menimbulkan berbagai dampak, diantaranya pada perikanan di perairan yang tercemar serta gangguan kesehatan pada masyarakat sekitar (Kusuma *et al.*, 2015). Pb dapat berasal dari konsumsi makanan, minuman, atau melalui inhalasi dari udara, kontak langsung

lewat kulit, kontak lewat mata, dan lewat prenatal (Palar, 2012). Namun pencemaran logam berat paling berbahaya jika terjadi di perairan (Manik, 2007).

Logam berat masuk ke dalam tubuh melalui proses bioakumulasi. Singkatnya, proses bioakumulasi tersebut sangat merugikan bagi makhluk hidup pada tingkat rantai makanan tertinggi. Sehingga proses bioakumulasi tersebut dapat membahayakan keseimbangan dari suatu ekosistem (Prabu, 2012). Keracunan Pb dapat menyebabkan efek akut dan kronis yang ditandai oleh rasa mual, anemia, sakit pada bagian perut, dan dapat menyebabkan kelumpuhan. Selain itu, keracunan Pb juga dapat mempengaruhi seperti sistem peredaran darah, sistem saraf, sistem urinaria, sistem reproduksi, sistem endokrin, dan jantung (Palar, 2012). Tidak hanya pada sistem saraf, namun juga pada tulang dan gigi. Pada gigi dapat menyebabkan karies atau keropos gigi yang menyeluruh. Bahkan seorang ibu yang sedang mengandung jika mengalami keacunan Pb dapat menyebabkan karies gigi yang lebih parah, ketulian (hearing loss) dan katarak pada janinya. Hal tersebut dialami oleh penduduk Bangka Belitung yang mengalami karies gigi hebat akibat mengonsumsi air minum yang mengandung Pb (Herman, 2017). Pencemaran Pb bahkan juga dapat mengakibatkan tekanan darah tinggi, cepat marah, dan cepat lelah (Manik, 2007).

2.7 Air

Air adalah salah satu unsur penting pada manusia setelah udara untuk keberlangsungan hidupnya. Menurut Daud (2005) manusia tidak dapat bertahan hidup tanpa air dalam jangka waktu lebih dari 3 hari. Banyak hal memerlukan keberadaan air seperti mencuci, memasak, minum dan masih banyak lagi. Walaupun hal sebelumnya sama-sama menggunakan air, namun kualitas air yang digunakan haruslah berbeda. Terutama air yang digunakan untuk minum, kualitas air yang digunakan haruslah lebih baik dari hal lainnya. Karena air tersebut akan masuk dan diserap oleh tubuh (Febriwani *et al.*, 2019). Persediaan air yang cukup dengan kualitas yang baik dapat meningkatkan tingkat kesehatan dalam masyarakat serta menciptakan lingkungan yang bersih dan sehat (Daud, 2005).

Menurut Oktavianto *et al.* (2014) ketersediaan air bersih, sehat, dan aman telah menjadi unsur vital bagi kehidupan manusia. Berdasarkan kualitas air untuk minum, saat ini hanya tersedia sekitar 0,03%. Hal tersebut disebabkan pengurangan ketersediaan air bersih yang mencapai 40% akibat pencemaran terutama di kota-kota besar. Pencemaran tersebut umumnya menyebabkan terkontaminasinya air terhadap logam berat Pb, yang disebabkan oleh berbagai hal seperti aktivitas manusia, kegiatan industri, ataupun alam (Febriwani *et al.*, 2019). Namun menurut Herman (2017) air yang mengandung Pb juga dapat disebabkan oleh saluran pipa sebagai pengalir air dan pipa tersebut berbahan besi. Sehingga Pb yang terkandung dalam besi sewaktu-waktu dapat terlepas dan bercampur pada air yang mengalir padanya yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor.

Umumnya masyarakat saat ini menggunakan air PDAM dalam memenuhi kebutuhan minum dan lainnya. PDAM atau Perusahaan Daerah Air Minum adalah penyedia air siap pakai, dengan air tersebut telah diolah sebagai perlindungan pada sumber air dengan meningkatkan kualitas sumber air tersebut hingga memperoleh standar kualitas yang telah ditentukan (Herman, 2017). Standar kualitas air minum bagi Indonesia sendiri telah ditentukan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 492/MENKES/PER/IV/2010 meliputi parameter fisik, kimiawi, bakteriologis dan radioaktif. Standar parameter kimiawi tersebut menyatakan bahwa air minum tidak boleh mengandung zat anorganik dan organik. Dari berbagai zat anorganik tersebut salah satunya adalah Pb, dengan nilai ambang batas Pb yang terkandung dalam air minum adalah 0,01 mg/l (Putri, 2017). Sedangkan standar kualitas untuk air bersih telah ditentukan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 416/MENKES/PER/IX/1990 meliputi bau, kekeruhan, rasa, suhu dan warna. Peraturan tersebut menyatakan bahwa batas maksimal Pb yang terkandung dalam air bersih adalah sebesar 0,05 ppm (Handriyani *et al.*, 2020).

2.8 Python

Bahasa Pemrograman Python termasuk sebagai *high-level programming language* yang berjalan dengan sistem interpreted, dan bisa dipakai pada berbagai *general-purpose*. Bahasa pemrograman tingkat tinggi memiliki arti bahwa perintah atau kode program yang digunakan sudah sangat mendekati dengan bahasa manusia. Dalam hal tersebut, bahasa manusia yang dimaksud merupakan Bahasa Inggris yang merupakan bahasa dunia (Anwar, 2019).

Python mulai dikembangkan oleh Guido van Rossum pada tahun 1990 di CWI Amsterdam sebagai kelanjutan dari bahasa pemrograman ABC dengan versi 1.2 merupakan versi terakhir yang dikeluarkan saat itu. Kemudian pada tahun 1995, ia pindah ke CNRI Virginia Amerika sambil terus melanjutkan pengembangan Python (Hasibuan, 2020). Bahkan hingga saat ini pun Python masih terus mengalami perkembangan dan tekah mencapai versi 3.11.1 per 24 Oktober tahun lalu. Nama Python dipilih berdasarkan acara televise favoritnya, yaitu Monty Python's Flying Circus. Saat ini pun Python telah banyak digunakan oleh para developer dan perusahaan besar dalam mengembangkan berbagai kebutuhan (Schuerer *et al.*, 2010). Kepopuleran serta kemudahan dalam penggunaan Python menjadikannya mulai banyak diminati oleh mahasiswa dalam menyelesaikan berbagai tugas kuliah, tugas akhir, bahkan penelitian (Romzi & Kurniawan, 2020).

Python dapat digunakan dalam berbagai kebutuhan karena ia dapat berjalan dalam berbagai sistem operasi seperti Linux/Unix, Windows 32/64-bit, Mac OS X, Java Virtual Machine, OS/2, Amiga, Palm, dan Symbian atau sistem operasi yang digunakan Nokia (Supardi, 2017). Menurut Clinton & Sengkey (2019) Python bersifat *Open Source* dengan lisensi yang disetujui OSI (*Open Source Initiatives*) sehingga bebas digunakan dan gratis bahkan untuk kepentingan komersial. Lisensi Python juga tidak bertentangan dengan *General Public License* (GPL). Hak atas kekayaan intelektual Python sendiri tertuang dalam konferensi PyCon yang dipegang dan dilindungi oleh Yayasan Perangkat Lunak Python – Python *Software Foundation* (PSF).

Menurut Clinton dan Sengkey (2019) Python menawarkan berbagai fitur, yaitu:

- a. Menyediakan *library* siap pakai dengan cakupan yang luas sehingga dapat digunakan dalam berbagai kebutuhan;
- b. Dapat membuat dan mengembangkan *library* dengan menggunakan bahasa pemrograman Python ataupun C/C++;
- c. Syntax kode yang simple sehingga memudahkan proses pembelajaran;
- d. Berorientasi pada objek sehingga tidak menyulitkan dalam penulisan kode.;
- e. Dan masih banyak lagi.

2.9 Transformasi Fourier

Proses penting dalam pemrosesan sinyal digital adalah menganalisis suatu sinyal *input* maupun *output* untuk mengetahui karakteristik sistem fisis tertentu dari sinyal. Proses analisis dan sintesis dalam domain waktu memerlukan analisis cukup panjang dengan melibatkan turunan dari fungsi, yang dapat menimbulkan ketidaktelitian hasil analisis. Analisis dan sintesis sinyal akan lebih mudah dilakukan pada domain frekuensi. Salah satu teknik untuk menganalisis sinyal adalah mentransformasikan (alih bentuk) sinyal yang semula analog menjadi diskrit dalam domain waktu, dan kemudian diubah ke dalam domain frekuensi. Transformasi Fourier adalah suatu model transformasi yang mengubah bentuk sinyal domain spasial atau sinyal domain waktu menjadi sinyal domain frekuensi (Meris, 2015).

2.9.1 Discrete Fourier Transform (DFT)

DFT (*Discrete Fourier Transform*) merupakan prosedur matematika yang digunakan untuk menentukan harmonik atau frekuensi yang merupakan isi dari urutan sinyal diskrit. Urutan sinyal diskrit adalah urutan nilai yang diperoleh dari sampling periodik sinyal kontinu dalam domain waktu. DFT berasal dari fungsi Transformasi Fourier $X(f)$ yang didefinisikan:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Dari **Persamaan 2.1** $X(f)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi, $x(t)$ adalah fungsi dalam domain waktu, j adalah bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$), π adalah derajat (180°), f adalah indeks *output* dalam domain frekuensi, t adalah indeks sampel *input* dalam domain waktu, dan e adalah basis logaritma natural (2,7182818284 ...).

Dalam bidang pemrosesan sinyal kontinu, CFT (*Continuous Fourier Transform*) yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.1**. Digunakan untuk mengubah fungsi domain waktu kontinu $x(t)$ menjadi fungsi domain frekuensi kontinu $X(f)$. Fungsi $X(k)$ memungkinkan untuk menentukan kandungan isi frekuensi dari beberapa sinyal dan menjadikan beragam analisis sinyal dan pengolahan yang dipakai di bidang teknik dan fisika.

DTFT (*Discrete Time Fourier Transform*) digunakan untuk mengubah fungsi domain waktu diskrit $x(n)$ menjadi fungsi domain frekuensi kontinu $X(e)$, yang didefinisikan:

$$X(e) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{j2\pi fn} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{j\Omega n} \quad (2.2)$$

Dari **Persamaan 2.2** $X(e)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi, $x(n)$ adalah fungsi dalam domain waktu, j adalah bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$), π adalah derajat (180°), f adalah indeks *output* dalam domain frekuensi, n adalah indeks sampel *input* dalam domain waktu, dan e adalah basis logaritma natural (2,7182818284 ...). Sedangkan DFT didefinisikan sebagai urutan sinyal diskrit domain frekuensi $X(k)$:

$$X(k) = \sum_{k=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} = \sum_{k=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} = \sum_{k=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad (2.3)$$

Dari **Persamaan 2.3** $X(k)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi, dengan k adalah indeks *output* dalam domain frekuensi (0, 1, 2, ..., $N - 1$). Sehingga $X(k)$ akan

menunjukkan urutan ke- k komponen *output* dalam domain frekuensi ($X(0), X(1), X(2), \dots, X(N-1)$). Kemudian ada N yang merupakan jumlah sampel *input* dalam domain waktu, $x(n)$ merupakan fungsi dalam domain waktu, dengan n adalah indeks sampel *input* dalam domain waktu ($0, 1, 2, \dots, N-1$). Sehingga $x(n)$ akan menunjukkan urutan ke- n komponen *input* dalam domain waktu ($x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$). Lalu ada j yang merupakan bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$), π adalah derajat (180°), dan e adalah basis logaritma natural ($2,7182818284 \dots$).

Berdasarkan persamaan Euler yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.4**. Akan menghasilkan bentuk persamaan baru yang setara dengan **Persamaan 2.3** sebelumnya, yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.5**.

$$e^{-j\theta} = \cos \theta - j \sin \theta \quad (2.4)$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\left[\cos\left(\frac{2\pi k}{N}n\right) - j \sin\left(\frac{2\pi k}{N}n\right)\right] \quad (2.5)$$

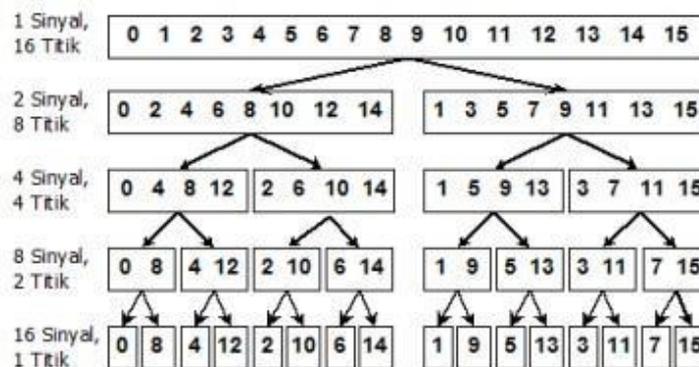
Dari **Persamaan 2.5** nilai N merupakan parameter penting karena menentukan berapa banyak sampel masukan yang diperlukan, hasil domain frekuensi dan jumlah waktu proses yang diperlukan untuk menghitung N -titik DFT. Diperlukan N -perkalian kompleks dan $N-1$ sebagai tambahan. Kemudian, setiap perkalian membutuhkan N -perkalian riil, sehingga untuk menghitung seluruh nilai N ($X(0), X(1), X(2), \dots, X(N-1)$) memerlukan N^2 perkalian. Hal ini menyebabkan perhitungan DFT memakan waktu yang lama jika jumlah sampel yang akan diproses dalam jumlah besar.

2.9.2 Fast Fourier Transform (FFT)

Meskipun DFT memainkan peranan yang penting sebagai prosedur matematis untuk menentukan isi frekuensi dari urutan domain waktu, namun sangat tidak efisien. Jumlah titik dalam DFT meningkat menjadi ratusan atau ribuan, sehingga

jumlah yang dihitung menjadi tidak dapat ditentukan. Sebuah DFT 8-titik, harus melakukan N^2 atau 64 perkalian kompleks. Sedangkan FFT melakukan $\left(\frac{N}{2}\right) \log_2 N$ yang memberikan penurunan yang signifikan dari N^2 perkalian kompleks. Ketika $N = 512$ maka DFT memerlukan 200 kali perkalian kompleks dari yang diperlukan oleh FFT.

Dalam **Gambar 2. 6**, sinyal 16 titik terurai melalui empat tahap yang terpisah. Tahap pertama memisahkan sinyal 16 titik menjadi dua sinyal masing-masing terdiri dari 8 titik. Tahap kedua menguraikan data menjadi empat sinyal terdiri dari 4 titik. Pola ini berlanjut sampai sinyal N terdiri dari satu titik. Dekomposisi digunakan setiap kali sinyal dipecah menjadi dua, yaitu sinyal dipisahkan menjadi sampel genap dan sampel ganjil.



Gambar 2. 6 Contoh Dekomposisi Sinyal Domain Waktu Menggunakan FFT

Algoritma FFT memecah sampel menjadi dua bagian yaitu bagian genap $x(n) = x(2n)$ dan bagian ganjil $x(n) = x(2n + 1)$. Pada **Persamaan 2.6** menunjukkan pembagian persamaan DFT sebelumnya pada **Persamaan 2.3** menjadi bagian genap dan bagian ganjil.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n)W_N^{k2n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n + 1)W_N^{k(2n+1)} \quad (2.6)$$

Dari **Persamaan 2.6** $X(k)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi, dengan k adalah indeks *output* dalam domain frekuensi $(0, 1, 2, \dots, N - 1)$. Sehingga $X(k)$ akan menunjukkan urutan ke- k komponen *output* dalam domain frekuensi $(X(0), X(1), X(2), \dots, X(N - 1))$. Kemudian ada N yang merupakan jumlah sampel *input* dalam domain waktu, $x(2n)$ merupakan fungsi dalam domain waktu, dengan n adalah indeks sampel *input*-genap dalam domain waktu $(0, 2, 4, \dots, N - 2)$. Sehingga $x(2n)$ akan menunjukkan urutan ke- n komponen *input*-genap dalam domain waktu $(x(0), x(2), x(4), \dots, x(N - 2))$, $x(2n + 1)$ merupakan fungsi dalam domain waktu, dengan n adalah indeks sampel *input*-ganjil dalam domain waktu $(1, 3, 5, \dots, N - 1)$. Sehingga $x(2n + 1)$ akan menunjukkan urutan ke- n komponen *input*-ganjil dalam domain waktu $(x(1), x(3), x(5), \dots, x(N - 1))$.

Dengan menggunakan hubungan $W_N^{2kn} = W_{N/2}^{kn}$, maka **Persamaan 2.6** menjadi:

$$X(k) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n)W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n + 1)W_{N/2}^{kn} \quad (2.7)$$

Kemudian dibuat fungsi baru untuk mewakili bagian genap dan bagian ganjil pada algoritma FFT.

$$X_e(k) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n)W_{N/2}^{kn} = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_e(n)W_{N/2}^{kn} \quad (2.8)$$

$$X_o(k) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n + 1)W_{N/2}^{kn} = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_o(n)W_{N/2}^{kn} \quad (2.9)$$

Dengan memasukkan **Persamaan 2.8** dan **Persamaan 2.9** ke **Persamaan 2.7**, maka diperoleh algoritma FFT yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.10**.

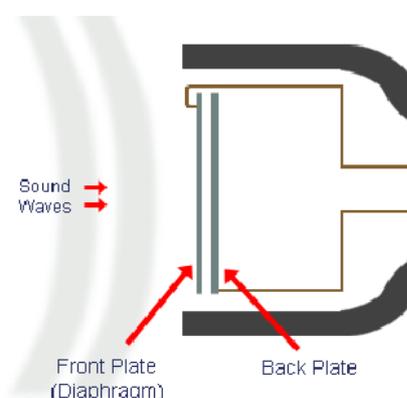
$$X(k) = X_e(k) + W_N^k X_o(k) \quad (2.10)$$

Setelah melakukan transformasi FFT, suara yang direkam oleh mikrofon telah berubah menjadi domain frekuensi (Susilawati, 2009).

2.10 Mikrofon Kondenser

Mikrofon adalah alat yang berguna untuk membuat suara yang berintensitas rendah menjadi lebih keras atau alat yang berfungsi untuk menangkap suara supaya dapat diubah intensitasnya sesuai keperluan. Mikrofon sendiri adalah sejenis transducer yang dapat mengubah energi akustik/gelombang suara menjadi sinyal listrik. Mikrofon dipakai pada banyak alat seperti telepon, alat perekam, dan alat penguat suara. Dilihat dari komponen penyusun, fungsi dan bentuknya, mikrofon ada empat macam, yaitu mikrofon dinamik, mikrofon kondensor, mikrofon ribbon, dan mikrofon piezoelektris (Adityawati, 2011).

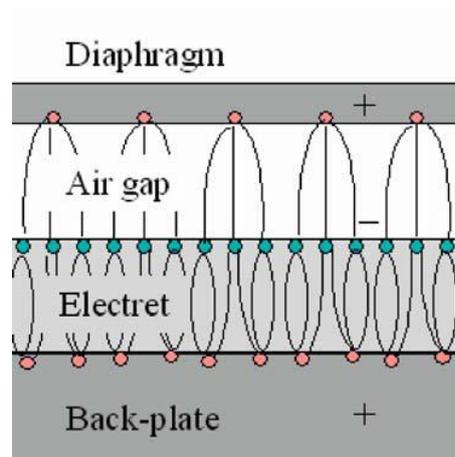
Mikrofon kondensor bekerja berdasarkan prinsip-prinsip elektrostatis dan memiliki akurasi yang sangat tinggi. Mikrofon jenis ini merupakan transduser yang menggunakan bahan dasar kapasitor yang berfungsi mengubah energi akustik menjadi energi listrik (Prawira et al., 2015). Mikrofon memberikan output sinyal analog yang sebanding dengan perubahan tekanan akustik bergantung pada fleksibilitas diafragma. Sinyal listrik kemudian digunakan untuk pengiriman, perekaman atau pengukuran pada karakteristik sinyal akustik. Cara kerja mikrofon kondenser berdasarkan variasi jarak antara dua pelat yaitu pelat bergerak dan pelat stasioner.



Gambar 2. 7 Bagian-Bagian Mikrofon Kondenser (Frederiksen, 2008)

Kedua pelat ini menghantar listrik dan membentuk kapasitor. Pelat bergerak yang diakibatkan oleh tekanan suara biasa disebut diaphragm. Sedangkan pelat stasioner yang sejajar dengan diafragma biasa disebut back plate (pelat belakang) (Frederiksen, 2008). Ketika gelombang suara mengenai diaphragm, maka diaphragm akan bergetar dan mengubah jarak pada kedua lempengan sehingga mengubah nilai kapasitansnya. Saat kedua lempengan saling berdekatan, nilai kapasitans naik dan terjadi pengisian arus. Ketika kedua lempengan saling berjauhan, nilai kapasitans turun dan terjadi pengosongan arus (Adityawati, 2011).

Transduksi dari tekanan suara ke tegangan mikrofon kondenser umumnya didasarkan pada prinsip kondenser yang membawa muatan listrik konstan. Dengan muatan konstan, setiap perpindahan diafragma mikrofon akan menghasilkan tegangan output yang proporsional. Besarnya perpindahan diafragma dan sensitivitas mikrofon merupakan fungsi dari *compliance diaphragm* (*compliance* adalah sifat bahan yang mengalami deformasi elastis atau (dari suatu gas) perubahan volume ketika dikenai gaya yang diterapkan) yang berbanding terbalik dengan tegangan pada diafragma *foil*. Rentang sensitivitas model mikrofon kondenser berkisar dari sekitar 1 mV/Pa untuk model yang lebih kecil hingga 100 mV/Pa untuk model yang lebih besar.



Gambar 2. 8 Mikrofon Kondenser dengan Elektret pada *Backplate*
(Frederiksen, 2008)

Mikrofon kondenser dapat memperoleh muatannya dari sumber tegangan polarisasi eksternal, melalui resistansi tinggi, atau dari elektret *Built-In*, yang merupakan polimer bermuatan permanen atau jenis lain dari isolator listrik berkualitas tinggi. **Gambar 2.8** merupakan ilustrasi dari mikrofon kondenser menggunakan elektret *Built-In*. Medan listrik dari celah udara dihasilkan oleh muatan “beku” (-) pada pelat belakang dan fraksi muatan bayangan (+) yang terletak pada diafragma. Polarisasi umumnya berlawanan dengan mikrofon terpolarisasi eksternal (Frederiksen, 2008).

2.11 Perekaman Suara

Perekaman adalah suatu proses menyalin ulang suatu objek berupa gambar, suara, dsb dengan menggunakan media atau alat perekaman tertentu. Hasil perekaman dapat disimpan di suatu media penyimpanan atau tidak sesuai dengan kebutuhan. Sehingga, perekaman suara merupakan memasukkan suara melalui suatu media inputan dan menyimpannya dalam suatu media penyimpanan. Perekaman suara umumnya dilakukan menggunakan microphone sebagai alat bantu input, yang kemudian dapat diolah menggunakan computer (Setiawan *et al.*, 2022). Ada banyak format yang dapat digunakan untuk menyimpan suatu audio, salah satunya adalah .wav, dengan parameter yang dibutuhkan dalam membuat suatu audio dengan format tersebut adalah sampel per frame, sampel rate, bit depth, saluran audio.

2.11.1 Sampel per Frame

Frame merupakan sejumlah sampel audio dalam interval waktu tertentu, atau frame adalah kumpulan dari sampel-sampel yang akan diolah bersama. Sedangkan sampel merupakan data audio yang mengacu pada titik data terkecil yang merepresentasikan amplitudo pada waktu tertentu. Sampel adalah representasi diskrit dari suara pada suatu titik waktu, yang merupakan angka tunggal yang merepresentasikan besaran suara pada saat tersebut.

Sehingga sampel per frame mengacu pada seberapa banyak sampel audio yang diambil dalam satu frame. Jumlah sampel per frame dapat bervariasi tergantung

pada format audio. Format audio .wav bersifat fleksibel, sehingga tidak ada ketentuan umum pada jumlah sampel per frame nya. Jumlah sampel per frame pada format audio tersebut bergantung pada konfigurasi awal oleh pengguna.

Sebelum data audio yang terkandung dalam frame diproses, data audio tersebut disimpan terlebih dahulu sebanyak batas jumlah sampel per frame yang telah ditentukan pada buffer. Buffer merupakan area penyimpanan dalam memori komputer yang digunakan untuk menyimpan data sementara sebelum diputar atau diproses lebih lanjut. Buffer bersifat sebagai perantara antara sumber data audio dan perangkat pemrosesan atau pemutaran audio. Buffer sangat penting digunakan karena adanya perbedaan kecepatan antara pemrosesan audio dan produksi data audio.

Sehingga besar sampel per frame juga merupakan ukuran buffer per frame pada suatu perekaman. Berdasarkan penjelasan sebelumnya, dapat dikatakan buffer per frame adalah besar ruang penyimpanan sementara yang dialokasikan untuk menampung setiap frame pada suatu audio yang membutuhkan pemrosesan berkelanjutan. Ukuran buffer yang lebih besar dapat membantu menghindari kehilangan data, tetapi juga dapat meningkatkan latensi (delay) dalam sistem real-time. Ukuran buffer yang lebih kecil dapat mengurangi latensi tetapi meningkatkan risiko kehilangan data jika tidak dapat mengikuti kecepatan data yang masuk. Sehingga penggunaan buffer per frame harus disesuaikan dengan kecepatan sampel (sampel rate).

2.11.2 Sampel Rate

Sampel rate adalah banyaknya sampel audio dalam satu detik dan diukur dalam satuan hertz (Hz). Sehingga sampel rate menggambarkan banyak titik data audio yang ada dalam satu detik. Semakin tinggi sampel rate, semakin banyak jumlah sampel yang didapatkan per detiknya. Semakin tinggi sampel rate juga menandakan semakin akurat kualitas audio dengan gelombang suara aslinya.

Umumnya ada 4 standar sampel rate yang umum digunakan yaitu:

- a. 44.1 kHz, adalah sampel rate standar untuk audio CD. Sehingga suatu audio pada CD memiliki 44.100 sampel audio yang diambil pada setiap detiknya.
- b. 48 kHz, adalah sampel rate standar untuk audio video digital seperti DVD dan Blu-ray. Sampel rate 48 kHz juga umum digunakan dalam produksi audio dan video profesional.
- c. 96 kHz, adalah sampel rate berkualitas tinggi yang digunakan dalam produksi audio berkualitas tinggi dan rekaman studio. Penggunaan sampel rate yang lebih tinggi atau sama dengan 96 kHz seperti ini dapat merepresentasikan suara dengan tingkat presisi yang lebih besar.
- d. 192 kHz, adalah salah satu sampel rate yang digunakan dalam produksi audio dengan kualitas tertinggi. Sampel rate 192 kHz umum digunakan dalam rekaman studio kelas atas dan perangkat audio yang berkualitas tinggi.

Penggunaan sampel rate perlu diperhitungkan karena akan memengaruhi kualitas dari audio yang akan dihasilkan. Semakin besar penggunaan sampel rate akan menghasilkan ukuran file audio yang lebih besar, namun dapat menghasilkan rekaman audio yang lebih akurat dan berkualitas tinggi. Penggunaan sampel rate juga perlu memperhatikan perangkat keras dan perangkat lunak yang akan digunakan, karena harus mendukung sampel rate yang dipilih.

2.11.3 Bit Depth

Bit depth atau lebar bit adalah besar resolusi atau tingkat detail dalam merekam atau merepresentasikan audio. Lebar bit mengacu pada berapa banyak bit yang digunakan untuk mewakili setiap sampel audio dalam data digital. Lebar bit akan menentukan rentang amplitudo maksimal yang dapat direpresentasikan pada suatu sampel audio. Semakin besar lebar bit, semakin tinggi resolusi audio yang dihasilkan. Sehingga audio dapat direproduksi dengan tingkat presisi yang lebih baik. Sedangkan lebar bit yang lebih kecil menyebabkan rendahnya resolusi, sehingga dapat menghasilkan audio yang kurang akurat.

Berikut merupakan lebar bit yang umum digunakan dalam audio digital:

- a. 16-bit, adalah format resolusi standar untuk audio CD dan merupakan salah satu yang paling umum digunakan dalam rekaman audio digital. Memiliki 65.536 nilai berbeda yang dapat digunakan sebagai representasi amplitudo pada suatu audio dan sudah dapat memberikan tingkat resolusi yang baik.
- b. 24-bit, adalah format resolusi yang umum digunakan dalam rekaman audio berkualitas tinggi dan studio professional. Memiliki sekitar 16,8 juta nilai berbeda yang dapat digunakan sebagai representasi amplitudo pada suatu audio. Sehingga tingkat resolusi audio yang dihasilkan lebih baik.
- c. 32-bit floating-point, adalah format resolusi yang menggabungkan resolusi tinggi dengan fleksibilitas yang lebih besar dalam mengatasi nilai amplitudo yang sangat tinggi atau rendah. Resolusi jenis ini, sangat umum digunakan dalam aplikasi audio digital yang memerlukan kualitas audio sangat tinggi.

Penggunaan lebar bit memengaruhi dinamika audio, yakni rentang antara tingkat suara terendah hingga tertinggi yang dapat direproduksi. Lebar bit yang lebih tinggi mampu merepresentasikan perbedaan amplitudo yang lebih halus antara berbagai tingkat suara, sehingga menghasilkan audio yang lebih halus dan lebih akurat. Semakin tinggi jenis lebar bit yang digunakan juga akan menghasilkan ukuran file audio yang lebih besar, karena membutuhkan lebih banyak bit untuk merepresentasikan setiap sampel.

2.11.4 Saluran Audio

Saluran audio adalah jalur yang akan digunakan untuk mentransmisikan informasi audio. Setiap saluran audio akan mengangkut informasi audio dari suatu sumber melalui perangkat audio ke perangkat penerima atau pemutar audio. Jumlah saluran audio pada suatu sistem dapat bervariasi dan dalam penggunaannya dapat memengaruhi seberapa banyak informasi audio yang dapat ditransmisikan dan direproduksi.

Terdapat beberapa jenis saluran audio, diantaranya adalah:

- a. Mono (1 Saluran), atau monophonic akan menghasilkan audio yang hanya bersumber dari satu saluran. Sehingga semua informasi audio hanya akan disampaikan melalui satu jalur.
- b. Stereo (2 Saluran), merupakan jenis saluran yang paling umum digunakan dalam hiburan dan media. Kedua saluran tersebut terdiri atas saluran kiri (left channel) dan saluran kanan (right channel). Jenis saluran ini memungkinkan terciptanya efek audio spasial dan berbagai ketajaman dalam reproduksi audio.
- c. Multichannel (Banyak Saluran), merupakan jenis saluran yang melibatkan lebih dari dua saluran. Jenis saluran ini digunakan dalam audio surround, seperti Dolby Digital 5.1 atau 7.1, yang memiliki banyak saluran untuk menciptakan pengalaman audio yang lebih immersif dalam film dan game.
- d. Audio 3D, atau binaural adalah jenis saluran yang dapat mereproduksi audio seolah-olah berasal dari berbagai arah dalam tiga dimensi. Jenis saluran ini melibatkan penggunaan sejumlah saluran audio yang lebih besar dan teknologi pemrosesan khusus.
- e. Saluran Subwoofer, merupakan jenis saluran yang ditujukan untuk mereproduksi frekuensi rendah yang dalam, yang diperlukan untuk efek bass yang kuat. Umumnya digunakan dalam konfigurasi audio multichannel, dengan menggunakannya pada satu atau lebih dari bagian saluran tersebut.

Penggunaan jumlah saluran audio dalam suatu sistem dapat memengaruhi tingkat kompleksitas audio yang dihasilkan. Penggunaan jumlah saluran audio juga akan memengaruhi banyaknya jumlah informasi audio yang dapat ditangkap dan direproduksi oleh sistem audio.

2.12 Bunyi

Menurut KBBI, bunyi adalah sesuatu yang terdengar (didengar) atau ditangkap oleh telinga. Sedangkan dalam fisika, bunyi termasuk kedalam jenis gelombang longitudinal berdasarkan arah rambatnya. Gelombang longitudinal memiliki arah getar yang sejajar atau berimpit dengan arah rambatnya. Perambatannya terjadi

pada medium berupa gas, cair, dan padat. Sedangkan gelombang transversal memiliki arah getar yang tegak lurus dengan arah rambatnya. Perambatannya terjadi pada medium yang memiliki sifat kekakuan (elastis) seperti tali, air, atau cahaya dalam ruang hampa (Kustaman, 2018). Bunyi terjadi karena adanya sumber bunyi dari benda yang mengalami getaran, sehingga menyebabkan gangguan kerapatan pada suatu medium (Soedjojo, 2004).

Berdasarkan kebutuhan medium dalam perambatannya, bunyi termasuk kedalam jenis gelombang mekanik. Gelombang mekanik merupakan jenis gelombang yang membutuhkan medium dalam perambatannya. Sedangkan gelombang yang tidak membutuhkan medium dalam perambatannya disebut sebagai gelombang elektromagnetik. Kecepatan bunyi bergantung pada mediumnya. Pada medium yang memiliki tingkat kerapatan tinggi, bunyi akan lebih cepat merambat. Sehingga semakin besar energi atau kekuatan yang terkandung pada bunyi tersebut (Nandra *et al.*, 2022). Semakin besar energi atau kuat bunyi yang dihasilkan, maka akan semakin jelas bunyi yang terdengar oleh manusia. Namun jika kuat bunyi tersebut terlalu kuat, dapat menyebabkan kerusakan pada indera pendengaran seorang manusia. Frekuensi yang dapat didengar pada manusia adalah pada rentang 20 Hz hingga 20.000 Hz (Sugianta *et al.*, 2020). Bunyi dapat terdengar oleh indera pendengaran manusia akibat terjadinya suatu getaran sehingga menghasilkan sistem suara yang membuat bunyi tersebut dapat terdengar (Kustaman, 2018).

Bunyi juga memiliki pengertian sebagai energi yang dirambatkan dalam bentuk gelombang. Besar energi atau kekuatan pada suatu bunyi disebut sebagai intensitas bunyi. Intensitas bunyi adalah energi yang dapat dirambatkan di tiap sekon melalui suatu satuan yang tegak lurus arah rambatan gelombang bunyi tersebut. Karena energi persatuan waktu menyatakan daya, maka intensitas dapat juga dikatakan sebagai daya yang menembus tiap satuan luasan yang tegak lurus arah rambat gelombang bunyi tersebut. Sehingga, secara garis besar intensitas bunyi menyatakan banyak atau sedikitnya suatu energi bunyi yang diterima di suatu tempat (Suherman, 2020). Besar intensitas bunyi yang dapat terdengar oleh manusia ada pada rentang 0-140 dB. Ketika suatu bunyi memiliki besar intensitas

>140 dB, dan terpapar oleh bunyi dengan besar intensitas tersebut secara terus menerus dapat menyebabkan kerusakan permanen pada indera pendengaran manusia (Soeripto, 2008). Menurut Susilo (2016) intensitas bunyi umnya disimbolkan sebagai I dapat dinyatakan melalui **Persamaan 2.11**.

$$I = \frac{P}{A} \quad (2.11)$$

Dari **Persamaan 2.11** P menyatakan kuat gelombang bunyi yang akan digunakan dalam satuan watt (W). Sedangkan A menyatakan luas area pengukuran yang diinginkan dalam satuan meter persegi (m^2). Sehingga satuan pengukuran intensitas bunyi I dinyatakan dalam watt per meter persegi (Wm^{-2}). Sedangkan tingkat kebisingan suatu bunyi yang disebut sebagai taraf intensitas bunyi menurut Susilo (2016), umumnya disimbolkan sebagai I_{dB} dapat dinyatakan melalui **Persamaan 2.12**.

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.12)$$

Dari **Persamaan 2.12** I menyatakan intensitas bunyi yang ingin diukur dalam satuan watt per meter persegi (Wm^{-2}). Sedangkan I_0 menunjukkan besar nilai referensi yang akan digunakan dalam satuan watt per meter persegi (Wm^{-2}). Sehingga satuan pengukuran intensitas bunyi I_{dB} dinyatakan dalam desiBell (dB). DesiBell merujuk pada satuan umum dalam pengukuran intensitas bunyi. Terdapat berbagai jenis desiBell yang lebih spesifik seperti desiBell Sound Pressure Level (dBSPL), desiBell Volt (dBV), desiBell Full Scale (dBFS), dan masih banyak lagi. Penggunaan jenis satuan pada desiBell yang lebih spesifik tersebut dilihat dari penggunaan nilai referensinya (Sugianta *et al.*, 2020).

Intensitas bunyi juga dapat diartikan sebagai bilangan yang terhubung dengan tingkat kenyaringan (kekerasan) bunyi. Intensitas bunyi dapat diukur berdasarkan nilai konversi frekuensi dalam satuan getaran Hertz (Hz) dan amplitudo dari suatu bunyi (Gold, B., and N. Morgan, 1999). Sehingga, besar amplitudo pada suatu bunyi

akan memengaruhi nilai intensitas yang dihasilkan oleh suatu bunyi. Semakin besar amplitudo getarannya, semakin keras bunyi yang terdengar dan sebaliknya. Selain itu, keras lemahnya bunyi tergantung pada jarak terhadap sumber bunyi. Dari penjelasan yang sudah dipaparkan diatas, intensitas bunyi dapat dikatakan sebagai salah satu parameter yang menunjukkan kualitas dari suatu bunyi (Suma'mur, 2009).

2.13 Kerapatan Larutan

Kerapatan medium menjadi salah satu sebab yang dapat memengaruhi besar energi atau kekuatan yang terkandung pada suatu bunyi yang dihasilkan. Medium tersebut dapat berupa gas, cair, dan padat. Medium cair dapat dicontohkan dengan suatu larutan, yang dalam suatu larutan tersebut dapat terkandung atas berbagai unsur atau senyawa. Kerapatan air murni adalah 1 g/ml, yang dapat berubah sesuai keadaan suhunya. Pada suhu tinggi kerapatan air dapat berkurang, sedangkan pada suhu rendah kerapatan air dapat meningkat (Sunaryo, 2010). Menurut Nurcahyo *et al.* (2014) kerapatan merupakan perbandingan antara massa dan volume dari suatu senyawa yang dinyatakan dalam **Persamaan 2.13**.

$$\text{Kerapatan} = \text{Massa} / \text{Volume} \quad (2.13)$$

Satuan yang digunakan pada **Persamaan 2.13** untuk massa adalah gram, sedangkan untuk volume adalah ml. Satuan tersebut juga berlaku dalam penentuan tingkat kerapatan pada suatu larutan. Persamaan tersebut dapat digunakan untuk mencari tingkat kerapatan suatu unsur atau unsur yang ada dalam suatu senyawa, dengan satuan massa yang digunakan adalah mol. Namun **Persamaan 2.13** dapat digunakan jika suatu larutan hanya terdiri atas satu jenis larutan. Jika larutan tersebut tersusun atas beberapa jenis larutan yang dicampurkan dapat menggunakan **Persamaan 2.14**.

$$\text{Total Kerapatan} = \frac{(\text{Kerapatan}_n \times \text{Volume}_n) + (\text{Kerapatan}_{n...} \times \text{Volume}_{n...})}{\text{Total Volume Larutan Setelah Tercampur}} \quad (2.14)$$

Satuan yang digunakan pada **Persamaan 2.14** haruslah konsisten antar setiap unturnya. Umumnya, satuan kerapatan yang digunakan adalah g/ml. Sedangkan satuan volume yang umum digunakan adalah ml. Sedangkan total kerapatan suatu larutan setelah pengenceran dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2.15**.

$$\text{Total Kerapatan} = (\text{Kerapatan}_n \times \text{Volume}_n) + (\text{Kerapatan}_{n\dots} \times \text{Volume}_{n\dots}) \quad (2.15)$$

Satuan yang digunakan pada **Persamaan 2.15** haruslah konsisten antar setiap unturnya. Umumnya, satuan kerapatan yang digunakan adalah g/ml. Sedangkan satuan volume yang umum digunakan adalah ml. Ketika suatu unsur atau senyawa atau benda memiliki tingkat kerapatan yang lebih besar dari tingkat kerapatan air, makai akan mengapung (Siagian, 2004).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2023 sampai September 2023. Kegiatan penelitian ini terdiri dari studi literatur dan pembuatan proposal penelitian, perancangan perangkat lunak, penambahan alat, pembuatan sampel, pengujian dan pengambilan data, serta analisis data dan pembuatan laporan akhir yang ditunjukkan pada **Tabel 3.1**. Penambahan alat dilakukan di Ruang *Workshop* Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penambahan alat ditujukan untuk mengganti jenis laser yang kemudian ditambahkan kepada rancang alat dari penelitian sebelumnya. Pembuatan sampel dilakukan di Laboratorium Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Pengambilan data dan pengujian dilakukan di Laboratorium Elektronika Dasar Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Waktu Pelaksanaan (Bulan ke-)				
		1	2	3	4	5
1	Studi literatur dan pembuatan proposal penelitian	■				
2	Perancangan perangkat lunak		■			
3	Penambahan alat		■			
4	Pembuatan Sampel			■		
5	Pengujian dan pengambilan data penelitian				■	
6	Analisis data dan pembuatan laporan akhir				■	

3.2 Alat dan Bahan

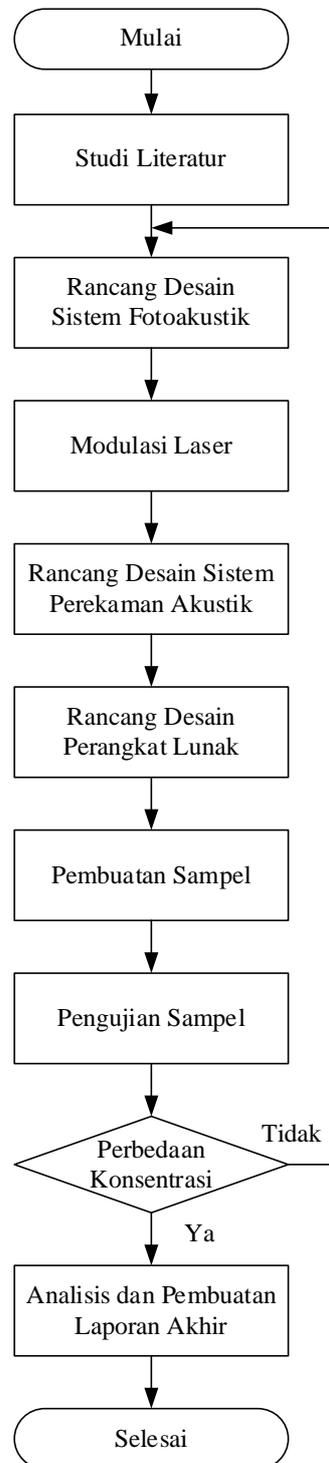
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3. 2 Alat dan Bahan Penelitian

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Laser Dioda Biru 450 nm 250 mW	Untuk menghasilkan akustik pada sampel
2	Behringer ECM8000 Mikrofon Kondenser	Untuk merekam puncak akustik pada sampel
3	Behringer UMC202HD	Sebagai penguat puncak akustik dari mikrofon
4	Arduino Uno	Sebagai sistem kendali modulasi laser dioda
5	VsCode	Sebagai <i>code editor</i> yang digunakan dalam penelitian ini
6	Python	Sebagai bahasa pemrograman yang digunakan dalam penelitian ini
7	Laptop	Untuk mengolah pemrograman serta data yang telah didapatkan
8	Neraca Analitik	Untuk mengukur masa senyawa dalam pembuatan sampel
9	Pipet Tetes	Untuk memindahkan larutan dalam pembuatan sampel dalam ukuran tertentu
10	Labu Ukur	Sebagai wadah pengenceran dalam pembuatan sampel
11	Cawan Petri	Sebagai wadah sampel dan bahan uji
12	pH Paper	Sebagai alat ukur tingkat pH pada larutan
13	Sampel	Sebagai penentu kadar nilai pada bahan uji, berupa Air dan Timbal
14	Bahan Uji	Sebagai bahan uji dalam penelitian ini

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang digunakan dalam penelitian ini secara umum dapat dilihat pada diagram alir **Gambar 3.1**.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

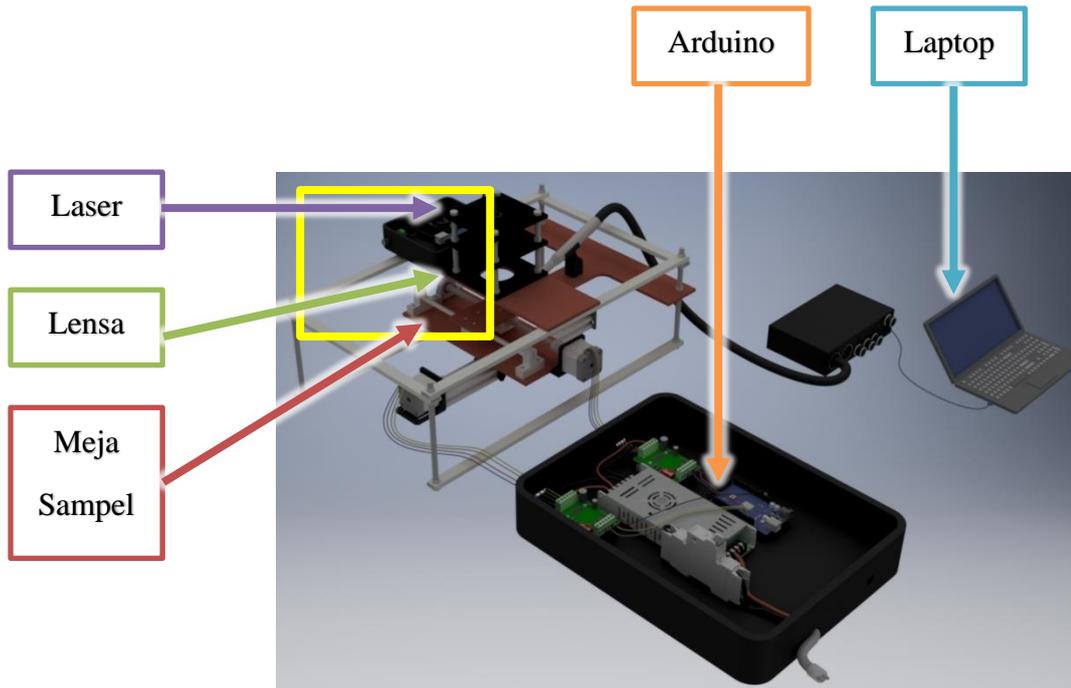
3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui konsep-konsep dasar yang menunjang penelitian ini. Literatur yang dikaji pada penelitian ini yaitu teori dasar efek fotoakustik, metode konversi sinyal suara dari domain waktu menjadi domain frekuensi menggunakan Transformasi Fourier, dan algoritma pemrograman menggunakan Python untuk mengintegrasikannya dengan Arduino Uno dalam melakukan modulasi laser; perekaman; Transformasi Fourier dalam konversi sinyal suara dari domain waktu menjadi domain frekuensi; serta pembuatan GUI.

3.3.2 Rancang Desain Sistem Fotoakustik

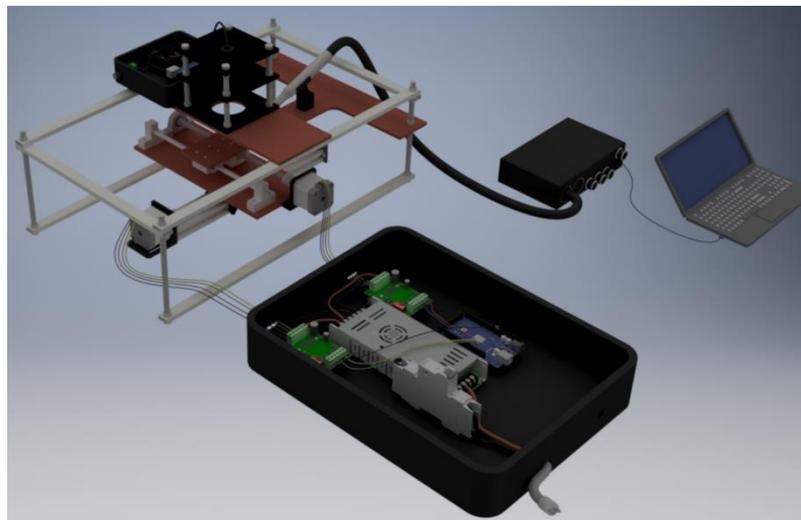
Perancangan sistem fotoakustik terdiri atas Perancangan Modulasi Laser yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**. Perancangan sistem fotoakustik berupa perancangan modulasi laser ini tersusun atas laptop, arduino, laser, lensa, serta meja sampel.

- a. Laptop, digunakan untuk menampilkan GUI sebagai sistem kendali.
- b. Arduino, yang digunakan berjenis Arduino uno. Berfungsi untuk mengatur keadaan laser yang akan digunakan berupa frekuensi dan *duty cycle*.
- c. Laser, yang digunakan berjenis laser dioda. Berfungsi sebagai sumber cahaya untuk menghasilkan fotoakustik. Diletakkan tepat diatas dan mengaraha kepada meja sampel dengan jarak 10 cm, yang bersifat statis
- d. Lensa, yang digunakan merupakan lensa cekung. Ditujukan untuk memusatkan berkas cahaya yang bersumber dari laser.
- e. Meja sampel, digunakan untuk meletakkan sampel yang akan digunakan.



Gambar 3. 2 Perancangan Modulasi Laser

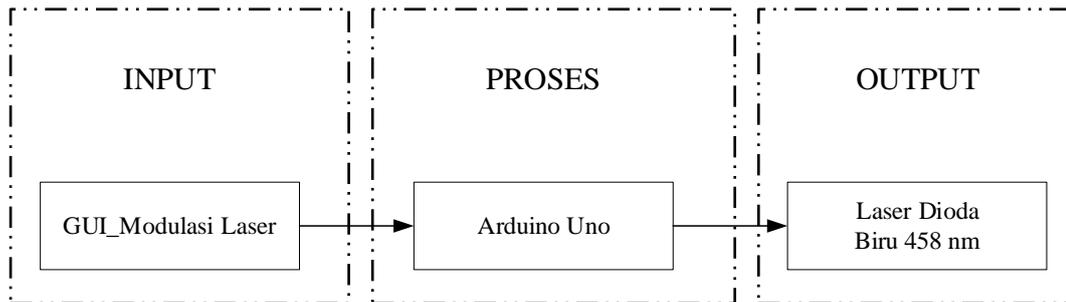
Sedangkan desain dari keseluruhan Perancangan sistem fotoakustik pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3. 3 Perancangan Sistem Fotoakustik

Modulasi laser merupakan sistem yang berfungsi dalam menentukan keadaan frekuensi dan *duty cycle* terbaik dari laser yang digunakan, berdasarkan intensitas bunyi tertingginya. Secara garis besar, tahap modulasi laser ini diawali dengan

mencari frekuensi terbaiknya berdasarkan intensitas bunyi tertinggi dari variasi frekuensi yang sudah ditentukan. Kemudian, dengan menggunakan frekuensi tersebut dapat ditentukan *duty cycle* terbaiknya dari laser yang digunakan, berdasarkan intensitas bunyi tertinggi yang didapatkan dari variasi *duty cycle* yang sudah ditentukan. Tahap modulasi laser yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram blok **Gambar 3.4**.



Gambar 3. 4 Diagram Blok Modulasi Laser

Laser hanya cukup ditembakkan kepada sampel sehingga menghasilkan gelombang. Gelombang yang dihasilkan tersebut kemudian ditangkap oleh mikrofon kondenser selama t detik. Data akustik yang telah didapatkan tersebut kemudian diolah untuk mendapatkan intensitas bunyi tertingginya sehingga didapatkan frekuensi terbaiknya. Frekuensi tersebut kemudian digunakan untuk menentukan *duty cycle* yang digunakan.

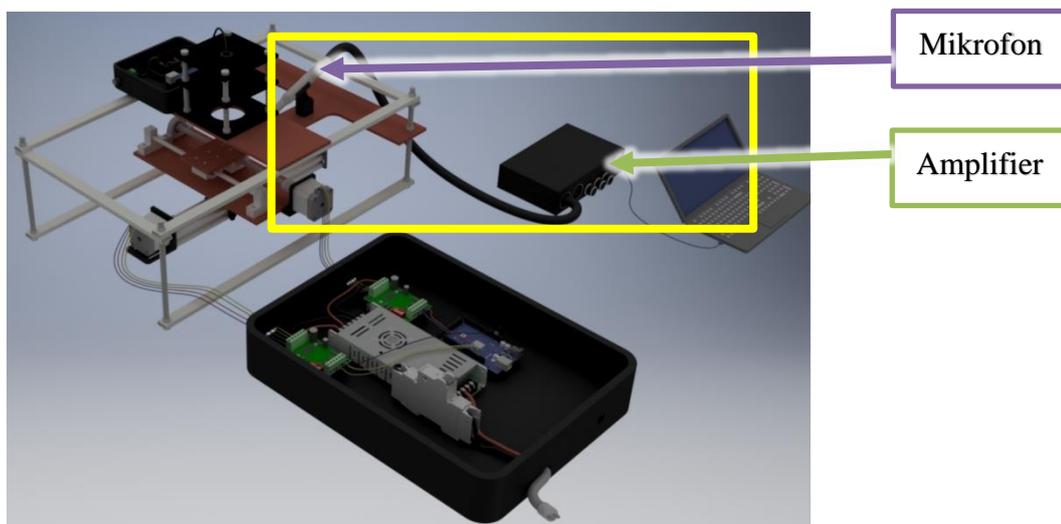
Sampel yang digunakan pada tahap modulasi laser ini berjumlah dua, yakni berupa aquades dan timbal. Sehingga didapatkan intensitas bunyi tertinggi dari setiap variasi frekuensi pada kedua sampel tersebut. Selanjutnya dari data yang sudah didapatkan, dicari selisih terjauh dari kedua sampel tersebut. Frekuensi dengan selisih intensitas bunyi terjauh menjadi frekuensi terbaik yang digunakan pada tahap selanjutnya. Namun dengan catatan pada selisih intensitas bunyi terjauh tersebut adalah nilai intensitas bunyi pada timbal harus lebih besar dari nilai intensitas bunyi pada air. Setelah didapatkan frekuensi terbaik dari proses tersebut, ditentukanlah *duty cycle* terbaiknya dengan menggunakan metode yang sama ketika mencari nilai frekuensi terbaiknya, berdasarkan variasi yang telah ditentukan. Sehingga, dari tahap modulasi laser ini mendapatkan keadaan laser yang

termodulasi berupa frekuensi dan *duty cycle* terbaiknya, yang digunakan oleh laser pada tahap selanjutnya.

3.3.3 Rancang Desain Sistem Perekaman Akustik

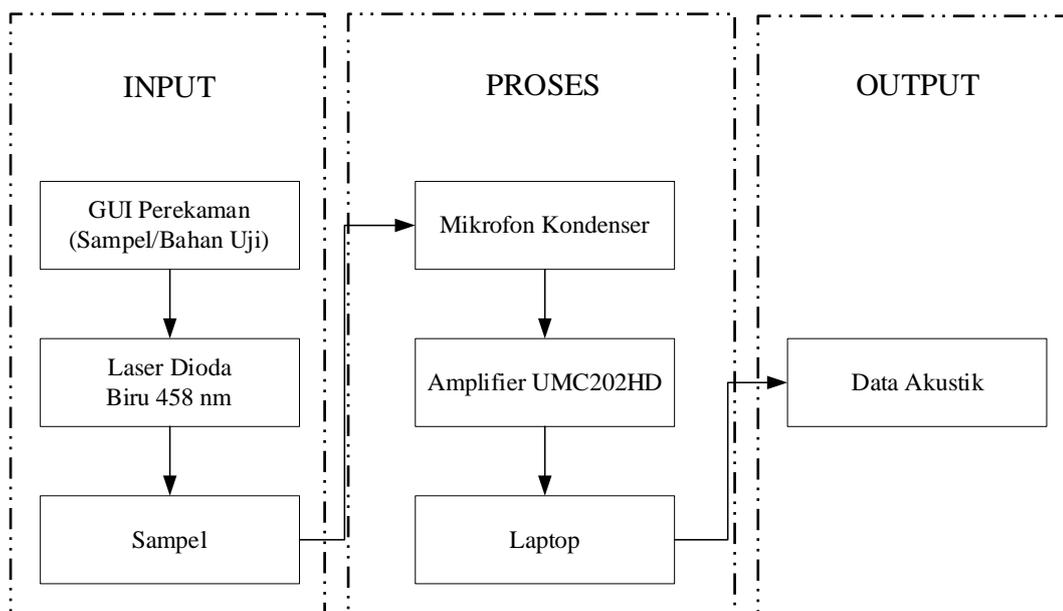
Sistem perekaman puncak akustik berfungsi untuk merekam dan memperkuat sinyal akustik yang dihasilkan sampel akibat dari tembakan laser yang termodulasi. Perancangan sistem perekaman puncak akustik ini sebelumnya juga telah dilakukan oleh Miftah (2022) pada penelitian sebelumnya yang ditunjukkan pada **Gambar 3.5**. Perancangan sistem perekaman akustik ini tersusun atas mikrofon dan amplifier.

- a. Mikrofon, yang digunakan berjenis mikrofon condenser. Berfungsi sebagai perekam sinyal akustik yang dihasilkan oleh sampel akibat dari tembakan laser yang termodulasi. Diletakkan dekat dengan meja sampel, dengan ujung mikrofon sedekat mungkin terhadap titik yang ditembak oleh laser pada sampel agar sinyal akustik dapat direkam oleh mikrofon.
- b. Amplifier, yang digunakan berjenis UMC202HD. Berfungsi sebagai penguat sinyal akustik yang direkam oleh mikrofon.



Gambar 3. 5 Perancangan Sistem Perekaman Akustik

Sedangkan diagram blok pada perancangan sistem perekaman puncak akustik pada penelitian ini ditunjukkan oleh **Gambar 3.6**.

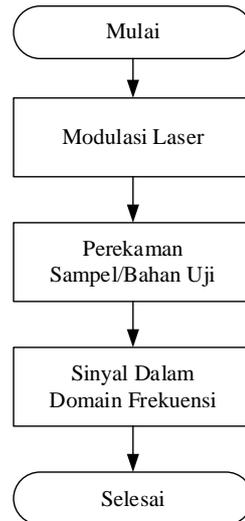


Gambar 3. 6 Diagram Blok Perancangan Sistem Perakaman

Laser Dioda yang sudah termodulasi dari tahap sebelumnya ditembakkan kepada sampel sehingga menghasilkan gelombang akustik. Gelombang yang dihasilkan tersebut kemudian ditangkap oleh mikrofon kondenser selama t detik. Gelombang yang dihasilkan tersebut masih terbilang lemah, maka gelombang tersebut perlu dikuatkan terlebih dahulu menggunakan amplifier. Setelah itu, gelombang yang telah didapatkan tersebut dapat diolah. Data akustik yang digunakan dari gelombang selama t detik tersebut diperoleh dari tembakan laser yang sudah termodulasi dengan menggunakan frekuensi dan *duty cycle* terbaiknya. Sehingga dari tahap sistem perekaman akustik ini mendapatkan keadaan gelombang yang sudah dikuatkan serta nilai intensitas bunyi yang dihasilkan dari frekuensi. Frekuensi tersebut berdasarkan besar frekuensi yang didapatkan dari tahap modulasi laser sebelumnya.

3.3.4 Rancang Desain Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak sistem fotoakustik yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir **Gambar 3.7**. Sedangkan rancang desain jendela utama GUI sebagai sistem kendali pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3. 7 Diagram Alir Pemrograman Penelitian



Gambar 3. 8 Rancang Desain Jendela Utama GUI

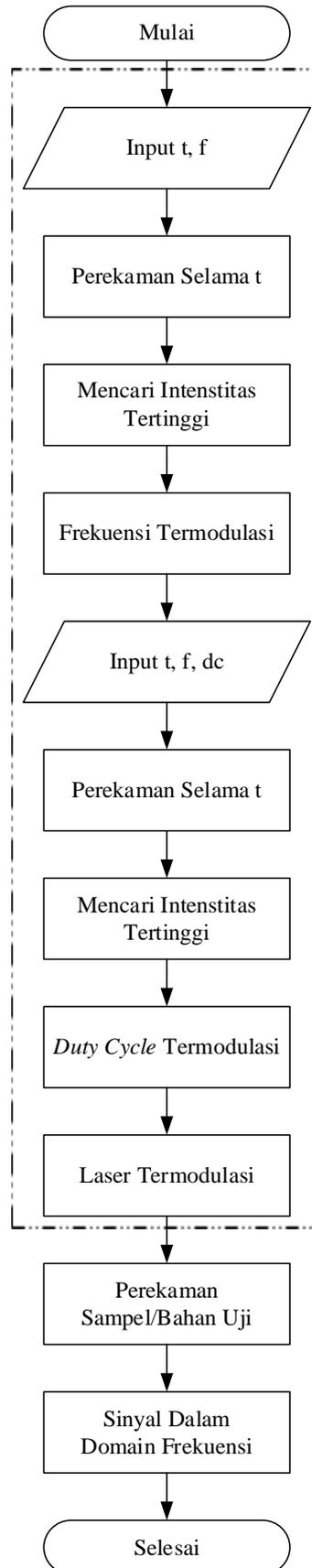
Alur pemrograman pada penelitian ini dimulai dengan tahap modulasi laser dengan output berupa laser yang termodulasi dengan didapatkannya frekuensi terbaik dari laser yang digunakan serta *duty cycle* terbaiknya. Output tersebut kemudian digunakan oleh laser dalam proses selanjutnya, yakni perekaman.

Pada tahap perekaman dibutuhkan input berupa besar frekuensi dan *duty cycle* yang disesuaikan berdasarkan dari tahap modulasi laser sebelumnya. Selain besar frekuensi dan *duty cycle*, input yang dibutuhkan dalam tahap perekaman tersebut adalah t yang merupakan lama waktu proses perekaman. Tahap ini menghasilkan output berupa audio dengan sinyal yang masih berada dalam domain waktu.

Untuk melakukan pengolahan sinyal dari audio yang sudah didapatkan pada tahap sebelumnya, maka dilakukanlah tahap perubahan sinyal kedalam domain frekuensi ini. Proses konversi sinyal audio dari domain waktu menjadi domain frekuensi ini menggunakan metode Transformasi Fourier dengan menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* dengan memanfaatkan *library* yang telah disediakan python, yakni NumPy. Setelah melalui keseluruhan tahapan sebelumnya, barulah data akustik yang ada pada audio dari penelitian ini dapat diolah.

3.3.4.1 Perancangan Perangkat Lunak Modulasi Laser

Perancangan perangkat lunak pada proses modulasi laser pada sistem fotoakustik yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir **Gambar 3.9**.



Gambar 3. 9 Diagram Alir Pemrograman Modulasi Laser

Berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan **Gambar 3.9**, tahap ini merupakan proses paling awal yang dilakukan pada penelitian ini. Proses modulasi ini sendiri terbagi atas dua tahapan. Tahap pertama adalah mencari frekuensi terbaiknya terlebih dahulu yang membutuhkan parameter waktu (t) dan frekuensi (f) yang dapat diinput berulang sesuai dengan variasi frekuensi yang telah ditentukan. Berbeda dengan parameter frekuensi, parameter waktu tidak dapat diinput berulang, karena waktu yang digunakan haruslah sama agar jumlah data akustik yang didapatkan dari setiap audio yang dihasilkan selalu sama. Selain itu, parameter waktu tersebut juga digunakan sebagai lama perekaman yang dilakukan. Sedangkan parameter frekuensi tersebut digunakan untuk mengatur output dari laser yang digunakan. Setelah perekaman, program mencari intensitas bunyi tertinggi sehingga didapatkan frekuensi terbaiknya.

Kemudian pada tahap kedua, adalah mencari *duty cycle* terbaik dari frekuensi yang telah didapatkan sebelumnya. Dalam mencari *duty cycle* terbaik ini, membutuhkan parameter waktu (t), frekuensi (f), dan *duty cycle* (dc) yang dapat diinput berulang sesuai dengan variasi *duty cycle* yang telah ditentukan. Berbeda dari tahap pertama, pada tahap ini, pada parameter frekuensi sudah tidak dapat diinput berulang karena besar frekuensi yang digunakan adalah harus sama dari besar frekuensi terbaik yang sudah didapatkan sebelumnya. Hal tersebut juga berlaku untuk parameter waktu. Setelah perekaman, program mencari intensitas bunyi tertinggi sehingga didapatkan *duty cycle* terbaiknya. Sehingga output dari tahapan ini adalah frekuensi serta *duty cycle* terbaik, yang digunakan oleh laser pada tahapan selanjutnya, yakni perekaman sampel. Rancang desain GUI untuk proses modulasi laser pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.

GUI PEREKAMAN

MODULASI LASER

[Mencari Frekuensi Terbaik]

Masukkan lama waktu

Masukkan besar frekuensi

Submit Mulai Proses

Besar frekuensi terbaik

[Mencari Frekuensi Terbaik]

Masukkan besar frekuensi

Masukkan lama waktu

Masukkan besar duty cycle

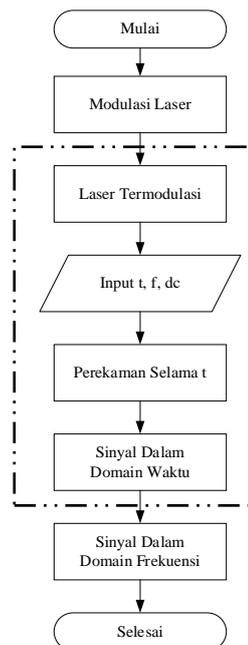
Submit Mulai Proses

Besar frekuensi terbaik

Gambar 3. 10 Rancang Desain GUI Modulasi Laser

3.3.4.2 Perancangan Perangkat Lunak Perekaman

Perancangan perangkat lunak pada proses perekaman pada sistem fotoakustik yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir **Gambar 3.11**.



Gambar 3. 11 Diagram Alir Pemrograman Perekaman

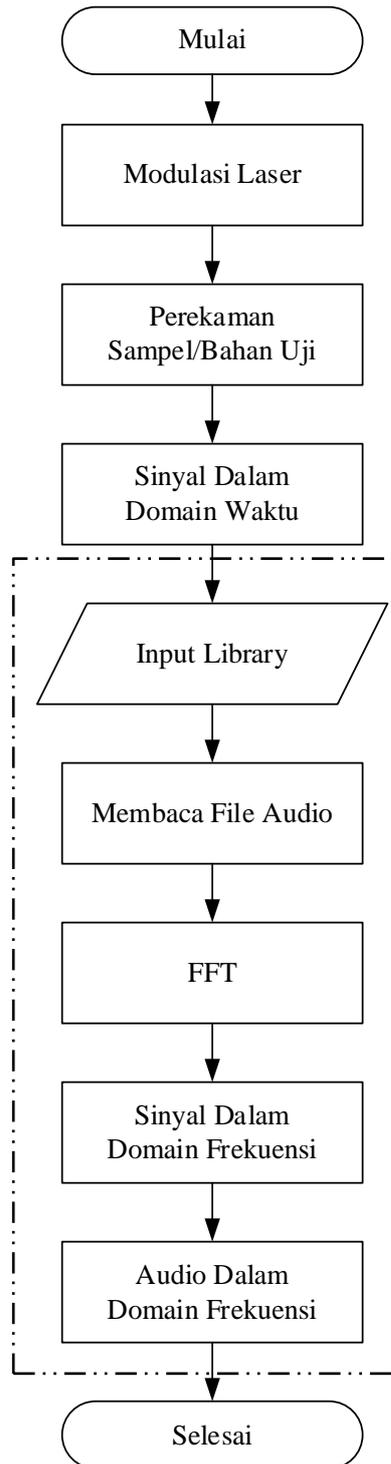
Berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan **Gambar 3.11**, hampir sama dari tahap modulasi laser sebelumnya, pada tahap perekaman sampel dari penelitian ini diperlukan beberapa input, yaitu waktu (t), frekuensi (f), dan *duty cycle* (dc). Masih sama seperti pada tahap modulasi laser sebelumnya. Parameter waktu tersebut digunakan sebagai lama perekaman yang dilakukan. Sedangkan pada parameter frekuensi dan *duty cycle* yang digunakan harus berdasar dari besar frekuensi dan *duty cycle* terbaik yang didapatkan dari tahap modulasi laser sebelumnya. Kedua input tersebut menentukan output dari sinar laser yang digunakan dalam tahapan ini. Pada tahap perekaman ini tidak memerlukan pergerakan XY Stage seperti pada penelitian Miftah (2022) sebelumnya. Hal tersebut karena sampel yang digunakan pada penelitian ini berupa larutan yang bersifat homogen. Tahap perekaman ini berlaku dalam seluruh pengujian sistem, baik pada sampel ataupun bahan uji. Rancang desain GUI untuk proses perekaman sampel dan bahan uji pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.12**.

The image shows a software interface for sample recording. It features a title bar 'GUI PEREKAMAN' and a main heading 'PEREKAMAN SAMPEL'. There are three input fields for user input, each with a label: 'Masukkan lama waktu', 'Masukkan besar frekuensi', and 'Masukkan besar duty cycle'. Below these fields are three buttons: 'Submit', 'Mulai Proses', and 'Reset'.

Gambar 3. 12 Rancang Desain GUI Perekaman Sampel/Bahan Uji

3.3.4.3 Perancangan Perangkat Lunak Domain Frekuensi

Perancangan perangkat lunak pada proses ko konversi terhadap domain waktu menjadi domain frekuensi pada sistem fotoakustik yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir **Gambar 3.13**.



Gambar 3. 13 Diagram Alir Pemrograman Domain Frekuensi

Pada tahap perekaman sebelumnya, sinyal pada audio yang dihasilkan masih berada dalam domain waktu. Untuk melakukan konversi terhadap domain waktu menjadi domain frekuensi kita dapat menggunakan salah satu algoritma dari Transformasi

Fourier yakni FFT. Proses tersebut dilakukan dengan menggunakan Bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan *library* NumPy yang telah menyediakan algoritma tersebut. Audio yang telah melewati tahap ini kemudian akan menghasilkan audio dengan sinyal yang telah berada dalam domain frekuensi.

3.3.5 Pembuatan Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan larutan timbal yang terbagi atas dua kategori. Larutan sampel kategori I merupakan larutan timbal yang direaksikan dengan asam tanat dan dikondisikan menjadi pH 9. Sedangkan kategori II merupakan larutan timbal murni tanpa campuran apapun. Larutan timbal dibuat menggunakan aquades dengan kadar timbal yang divariasikan sebanyak 8 macam konsentrasi timbal dengan kelipatan 0,25 per 4 variasi. Pembuatan sampel ini terbagi atas 3 macam.

3.3.5.1. Larutan Induk

Larutan induk pertama merupakan 1L larutan aquades dengan kadar timbal 1000 ppm. Dibuat dengan cara melarutkan 1,6 gram $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ kedalam labu ukur 1L hingga tanda batas. Larutan induk pertama dibuat berdasarkan persamaan massa molekul yang ditunjukkan oleh **Persamaan 3.1** (Chang 2005).

$$\text{Massa Pb}(\text{NO}_3)_2 \text{ (gram)} = \frac{\text{Mr Pb}(\text{NO}_3)_2}{\text{Ar Pb}} \times \text{Massa Pb (mg)} \quad (3.1)$$

Larutan induk kedua adalah 1L aquades dengan kadar timbal 10 ppm. Dibuat dengan melakukan pengenceran dari larutan induk pertama, dengan cara mengambil 10mL larutan induk pertama kemudian melarutkannya menggunakan aquades kedalam labu ukur 1L hingga tanda batas. Larutan induk ketiga adalah 100mL aquades dengan kadar timbal 1 ppm. Dibuat dengan melakukan pengenceran dari larutan induk pertama, dengan cara mengambil 0,1mL larutan induk pertama kemudian melarutkannya menggunakan aquades kedalam labu ukur 100mL hingga tanda batas. Larutan induk kedua dan ketiga dibuat berdasarkan

persamaan pengenceran larutan yang ditunjukkan oleh **Persamaan 3.3**. Terakhir adalah larutan induk keempat berupa 100mL NaOH 0,1 M. Dibuat dengan cara melarutkan 0,4 gram NaOH menggunakan aquades kedalam labu ukur 100mL hingga tanda batas. Larutan induk pertama dibuat berdasarkan persamaan molaritas yang ditunjukkan oleh **Persamaan 3.2** (Chang 2005).

$$M = \frac{mol}{L} = \frac{Massa\ zat/Mr}{volume/1000} = \frac{Massa\ zat}{Mr} \times \frac{1000}{Volume} \quad (3.2)$$

3.3.5.2. Larutan Standar Timbal

Larutan standar timbal ini merupakan sampel yang menjadi acuan dalam menentukan kadar timbal pada bahan uji. Larutan standar yang digunakan pada penelitian ini adalah larutan yang memiliki kadar timbal sebesar 0,1 ppm; 0,075 ppm; 0,05 ppm; 0,025 ppm; 0,01 ppm; 0,0075 ppm; 0,005 ppm; dan 0,0025 ppm. Larutan standar tersebut dibuat berdasarkan persamaan pengenceran larutan yang ditunjukkan oleh **Persamaan 3.3** (Chang 2005).

$$v_1 \times m_1 = v_2 \times m_2 \quad (3.3)$$

Larutan standar 0,1 ppm; 0,075 ppm; 0,05 ppm; dan 0,025 ppm dibuat dengan menggunakan larutan induk kedua. Sedangkan larutan standar 0,01 ppm; 0,0075 ppm; 0,005 ppm; dan 0,0025 ppm dibuat dengan menggunakan larutan induk ketiga. Larutan standar dalam penelitian ini juga disebut dengan larutan sampel. Larutan sampel yang digunakan terbagi atas 2 kategori, dengan kategori I merupakan larutan timbal yang dicampurkan dengan asam tanat dan dikondisikan kedalam pH 9. Sedangkan kategori II merupakan larutan timbal murni tanpa percampuran apapun. Pembuatan larutan sampel kategori I dapat dilihat pada **Tabel 3.4**, sedangkan pembuatan larutan sampel kategori II dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3 Pembuatan Larutan Sampel Pb Kategori II

No	Konsentrasi Akhir Pb (ppm)	Larutan Induk (mL)		Volume Akhir (mL)
		2	3	
1	0,1			
2	0,075			
3	0,05			
4	0,025			
5	0,01			
6	0,0075			
7	0,005			
8	0,0025			

Karena larutan sampel kategori II merupakan larutan timbal murni tanpa percampuran apapun dan larutan sampel kategori I merupakan larutan timbal yang dicampurkan dengan asam tanat dan dikondisikan kedalam pH 9. Maka, larutan sampel kategori I, dibuat dengan menggunakan larutan sampel kategori II yang ditunjukkan oleh **Tabel 3.4**.

Tabel 3. 4 Pembuatan Larutan Sampel Pb Kategori I

No	Konsentrasi Akhir Pb (ppm)	Larutan Sampel Pb Kategori II (mL)	Larutan Sampel Asam Tanat (mL)	NaOH (mL)	Volume Akhir (mL)
1	0,1				
2	0,075				
3	0,05				
4	0,025				
5	0,01				
6	0,0075				
7	0,005				
8	0,0025				

3.3.5.3. Larutan Asam Tanat

Larutan asam tanat ini merupakan larutan yang dicampurkan kedalam sampel sebelum dilakukan pengujian. Ketentuan konsentrasi pembuatan larutan ini adalah 4 kali lebih besar dari konsentrasi larutan standar timbal yang digunakan. Sehingga konsentrasi larutan asam tanat yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,4 ppm; 0,3 ppm; 0,2 ppm; 0,1 ppm; 0,04 ppm; 0,03 ppm; 0,02 ppm; 0,01 ppm. Kedelapan larutan tersebut dibuat berdasarkan persamaan pengenceran larutan yang ditunjukkan oleh **Persamaan 3.2**.

3.4 Pengujian Sistem

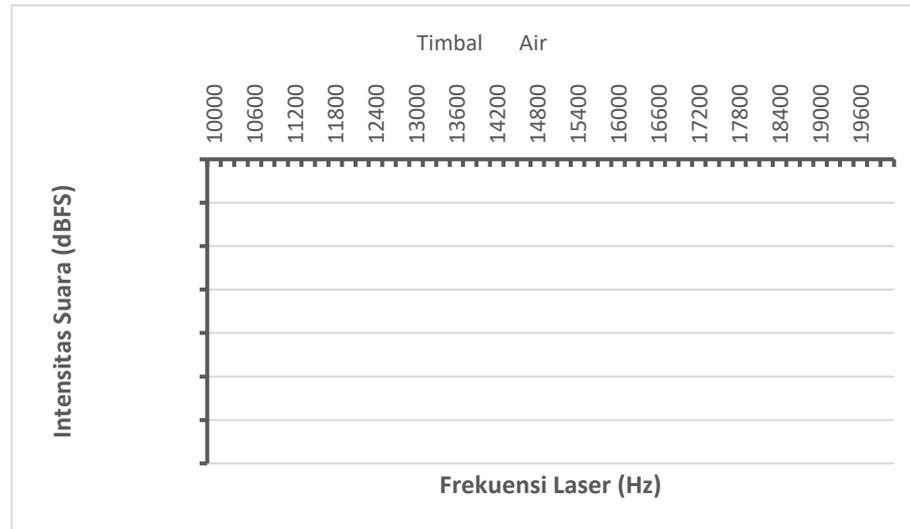
Pengujian sistem dibagi menjadi dua bagian yaitu karakterisasi modulasi laser, dan pengujian keseluruhan sistem menggunakan sampel serta bahan uji.

3.4.1 Karakterisasi Modulasi Laser

Output dari modulasi laser ini berupa intensitas bunyi, yang disandingkan dengan frekuensi input laser yang ditentukan oleh pengguna. Sehingga didapatkan frekuensi terbaik dari laser tersebut. Karakterisasi modulasi laser dilakukan untuk menentukan nilai frekuensi dan *duty cycle* yang optimal terhadap sampel. Frekuensi dan *duty cycle* yang optimal bertujuan untuk mendapatkan intensitas bunyi terbaik dari setiap variasi sampel. Variasi nilai frekuensi dari 10000 Hz – 20000 Hz dengan kenaikan frekuensi 200 Hz tiap pengujian. *Duty cycle* divariasikan dari 10%-90% dengan kenaikan *duty cycle* 10% tiap pengujian. Data karakterisasi frekuensi dan *duty cycle* disajikan pada **Tabel 3.5**, **Gambar 3.14**, **Tabel 3.6**, dan **Gambar 3.15**.

Tabel 3. 5 Rancang Tabel Data Hubungan Frekuensi Laser dan Intesitas Suara

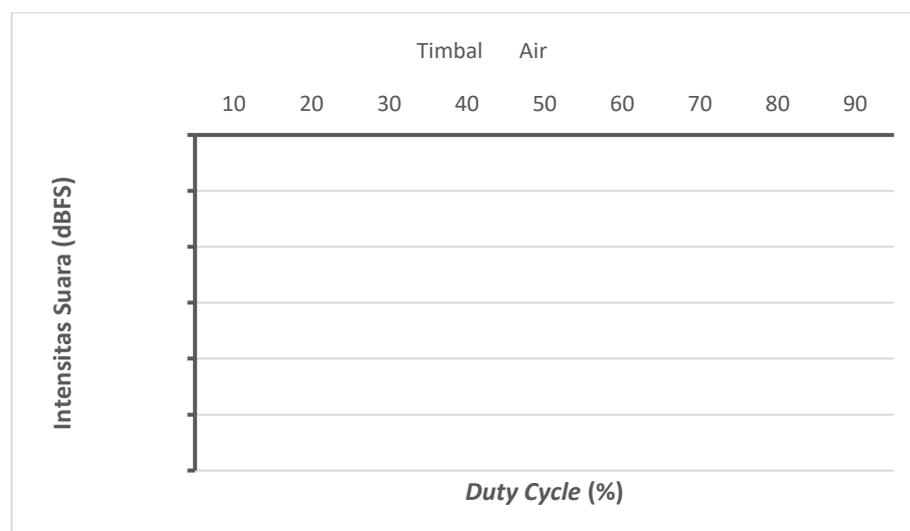
No	Frekuensi Laser (Hz)	Intensitas bunyi (dBFS)	
		Timbal	Air
1	10000		
2	10200		
.	.	.	
.	.	.	.
.	.	.	
.	.	.	.
.	.	.	.
49	19800		
50	20000		



Gambar 3. 14 Rancang Grafik Hubungan Frekuensi Laser dan Intesitas Suara

Tabel 3. 6 Rancang Tabel Data Hubungan *Duty Cycle* dan Intesitas Suara

No	<i>Duty Cycle</i> (%)	Intensitas bunyi (dBFS)	
		Timbal	Air
1	10		
2	20		
.	.	.	
.	.	.	
.	.	.	.
.	.	.	.
8	80		
9	90		



Gambar 3. 15 Rancang Grafik Hubungan *Duty Cycle* dan Intesitas Suara

3.4.2 Pengujian Keseluruhan Sistem

Sampel yang telah dibuat diletakan pada cawan petri terlebih dahulu sebelum diletakkan pada meja sampel. Kemudian dilakukan pemindaian sampel dengan menembaki sampel menggunakan laser dioda selama t detik dengan frekuensi modulasi dan *duty cycle* optimal yang diperoleh dari tahap sebelumnya. Data yang diperoleh dari pemindaian sampel disajikan pada **Tabel 3.7** dan **Tabel 3.8** dengan pengambilan data pada masing-masing variasinya dilakukan perulangan sebanyak 5 kali . Sedangkan data yang telah diperoleh dari pemindaian sampel kemudian dilakukan pengujian pada bahan uji yang disajikan pada **Tabel 3.9**.

3.4.2.1. Pengujian Sampel

Sampel merupakan larutan aquades dan timbal yang dibuat, sehingga konsentrasi timbal pada suatu larutan tersebut sudah diketahui. Sehingga dengan memanfaatkan keadaan tersebut besar intensitas bunyi dari besar frekuensi yang didapatkan nantinya menjadi acuan dalam menentukan kadar timbal pada bahan uji. Pengujian sampel ini terbagi atas dua kategori. Kategori I terdapat pada **Tabel 3.7** dan kategori II terdapat pada **Tabel 3.8**. Pengambilan data pada sampel sebagai larutan standar dilakukan dengan mengambil larutan pada setiap sampel dari setiap kategori, kemudian meletakkannya pada cawan petri yang memiliki kapasitas volume 35 mL. Lalu cawan petri tersebut diletakkan dimeja sampel untuk dilakukan pengambilan data. Pada tahap ini dilakukan perulangan sebanyak 5 kali pada masing-masing setiap sampelnya.

Tabel 3. 7 Rancangan Tabel Data Hasil Pemindaian Sampel Kategori I

No	Sampel Pb (ppm)	Pengulangan (dBFS)					Rata-Rata (dBFS)
		1	2	3	4	5	
1	0,1						
2	0,075						
3	0,05						
4	0,025						
5	0,01						
6	0,0075						
7	0,005						
8	0,0025						

Tabel 3. 8 Rancangan Tabel Data Hasil Pemindaian Sampel Kategori II

No	Sampel Pb (ppm)	Pengulangan (dBFS)					Rata-Rata (dBFS)
		1	2	3	4	5	
1	0,1						
2	0,075						
3	0,05						
4	0,025						
5	0,01						
6	0,0075						
7	0,005						
8	0,0025						

3.4.2.2. Penentuan Penggunaan Sampel

Besar frekuensi yang sudah didapatkan melalui pengujian sampel sebelumnya kemudian dilakukan perhitungan persentase Error, Akurasi, dan Presisi dengan menggunakan **Persamaan 3.2 – 3.4**.

$$\%E = \left| \frac{Y - X_n}{Y} \right| \times 100 \% \quad (3.2)$$

$$\%A = \left(1 - \left| \frac{Y - X_n}{Y} \right| \right) \times 100 \% \quad (3.3)$$

$$\%P = \left(1 - \left| \frac{X_n - \bar{X}_n}{\bar{X}_n} \right| \right) \times 100 \% \quad (3.4)$$

Berdasarkan **Persamaan 3.2 – 3.4**, Y adalah nilai parameter referensi, X_n adalah nilai parameter terukur ke- n , dan \bar{X}_n adalah rata-rata nilai parameter n terukur (Jones dan Chin, 1991). Karakterisasi sampel ini bertujuan untuk mengetahui tingkat eror dari hasil pemindaian setiap kategori sampel. Kedua kategori sampel tersebut kemudian dibandingkan melalui rata-rata tingkat eror yang didapatkan. Kategori sampel dengan rata-rata tingkat eror terkecil yang menjadi acuan pada pengujian bahan uji.

3.4.2.3. Pengujian Bahan Uji

Untuk menguji kualitas dari penentuan nilai dari sampel yang telah dilakukan sebelumnya. Maka dilakukanlah pengujian menggunakan bahan uji yang belum diketahui. Nilai yang didapatkan dibandingkan yang mengacu terhadap nilai yang telah diperoleh pada sampel sebelumnya. Sehingga berdasarkan hal tersebut dapat ditentukan apakah kadar timbal pada suatu bahan uji tersebut aman atau tidak yang diwakilkan pada **Tabel 3.9** pada kolom keterangan.

Tabel 3. 9 Rancangan Tabel Data Hasil Pengujian Bahan Uji

No	Bahan Uji	Intensitas Bunyi (dBFS)	Kadar Timbal (ppm)	Keterangan
1	Air Minum Isi Ulang			
2	Air Kawasan SPBU dan Industri			
3	Air Kawasan SPBU Non Industri			
4	Air Rumahan Dekat TPS			
5	Air Rumahan Jauh TPS			

3.4.3 Perbandingan Hasil Pengujian Sistem

Hasil yang telah didapatkan dari penelitian ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian dari Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri Bandar Lampung dengan menggunakan metode hasil pengujian yang umum digunakan yakni SSA/AAS yang disajikan pada **Tabel 3.10**. Perbandingan dengan menggunakan metode tersebut dilakukan untuk mendapatkan tingkat akurasi dari kadar timbal yang didapatkan dari hasil penelitian ini. Tingkat akurasi tersebut didapatkan melalui perhitungan menggunakan **Persamaan 3.2** dan **Persamaan.3.3**.

Tabel 3. 10 Rancangan Tabel Data Hasil Perbandingan

No	Bahan Uji	PAS (ppm)	Uji Lab (ppm)	Error	Akurasi
1	Air Minum Isi Ulang				
2	Air Kawasan SPBU dan Industri				
3	Air Kawasan SPBU Non Industri				
4	Air Rumahan Dekat TPS				
5	Air Rumahan Jauh TPS				

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Terealisasinya perangkat lunak dan GUI (*Graphical User Interface*) sebagai kendali sistem citra fotoakustik yang terintegrasi dalam satu mikrokontroler untuk mendeteksi kadar timbal pada air berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python.
2. Didapatkannya nilai intensitas bunyi yang berbeda dari setiap larutan dengan kadar timbal yang beragam menggunakan sistem fotoakustik berbasis laser dioda dan mikrofon kondenser menggunakan Python. Semakin tinggi kadar timbal, semakin besar nilai intensitas bunyi yang didapatkan. Dari kedua jenis data kategori sampel, data sampel pada kategori I menunjukkan besar konsentrasi timbal yang mendekati besar konsentrasi dari hasil pengujian lab.

5.2 Saran

Saran dari penelitian yang dapat dilakukan untuk perkembangan riset selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Menambahkan tahap windowing sebelum melakukan Transformasi Fourier, dan melakukan perbandingan dari hasil yang didapatkan tersebut dengan hasil yang didapatkan melalui *software* Audacity.
2. Menambahkan kecerdasan buatan sebagai metode pembelajaran data untuk mengolah data dalam pembacaan konsentrasi larutan (konversi intensitas bunyi kedalam satuan ppm).

3. Menambahkan variasi konsentrasi pada sampel, agar didapatkan nilai R^2 yang lebih baik dari penelitian yang sudah dilakukan.
4. Melakukan penyesuaian posisi laser, mikrofon, dan meja sampel pada alat.
5. Menambahkan box pada alat, dan melakukan perbandingan dari hasil yang didapatkan antara sebelum dan sesudah menggunakan box tersebut.
6. Menggunakan jenis laser dioda atau laser lainnya yang memiliki panjang gelombang <450 nm.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, T. 2014. Kontaminasi Logam Berat pada Makanan dan Dampaknya pada Kesehatan. *Teknobuga*. Vol. 1, No. 1, Hal. 53-65.
- Ainna, R. N. 2013. Analisis Kadar Logam Berat Pb Dalam Air Sungai Kelay Kabupaten Berau Kalimantan Timur Dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). *Skripsi*. Farmasi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Gowa.
- Aldinomera, R., Destiarti, L., & Ardiningsih, P. 2014. Penentuan Kadar Timbal (II) Pada Air Sungai Kapuas Secara Spektrofotometri Ultra Violet-Visible. *JKK*. Vol. 3, No. 1, Hal. 1–2.
- Alfarizi, M. R. S., Al-farish, M. Z., Taufiqurrahman, M., Ardiansah, G., & Elgar, M. 2023. Penggunaan Python Sebagai Bahasa Pemrograman Untuk Machine Learning Dan Deep Learning. *Karimah Tauhid*. Vol. 2, No. 1, Hal. 3.
- Alsamarrai, K. F. 2011. Spectrophotometric Assay of Lead in Human Hair Sampels by Using Alizarin RED (S) in Samarra Area. *J. of University of Anbar for Pure Science*. Vol. 5, No. 3, Hal. 2.
- Anisah, & Sudarno. 2019. Pengembangan Sistem Akuisisi Data Menggunakan Ni cDAQ 91 Berbasis Labview. *Sigma Epsilon*. Vol. 23, No. 1, Hal. 13.
- Apriyanto, D. K., Pauzi, G. A., Putra, R. D. A., Abidin, R., & Ayu, HAL. R. 2022. Rancang Bangun Sel Fotoakustik untuk Spektroskopi Fotoakustik Laser Dioda. *CYCLOTRON: Jurnal Teknik Elektro*. Vol. 5, No. 2, Hal. 46–50.
- Artati. 2018. Analisis Kadar Pb Pada Air Yang Melalui Saluran Pipa Penyalur Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Makassar. *Jurnal Media Analisis Kesehatan*. Vol. 1, No. 1, Hal. 47–55.
- Anwar, A. 2019. Pengertian dan Sejarah Bahasa Pemrograman Python. Hal. 1–6.
- Baharuddin, H., & Wahyuni, E. N. 2005. *Teori Belajar & Pembelajaran*. Yogyakarta: Ar-Ruzz Media.
- Barton A. F. M. 2003. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Amerika Serikat: Academic Press.

- Clinton, R. M. R., & Sengkey, R. 2019. Purwarupa Sistem Daftar Pelanggaran Lalulintas. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*. Vol. 8, No. 3, Hal. 181–192.
- Depkes RI. 2010. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010 Tentang Pengawasan Kualitas Air Minum. Jakarta: Departemen Kesehatan Republik Indonesia.
- Depkes RI. 1990. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 416/MENKES/PER/IX/1990 Tentang Syarat-Syarat dan Pengawasan Kualitas Air. Jakarta: Departemen Kesehatan Republik Indonesia.
- Dinc, O. F. 2021. Comparative Study Of Resonance Frequency Of Circular Piezo Microphone Based On Photoacoustic, Laser Speckle, And Piezoelectric Effects. *Mugla Journal of Science and Technology*. Vol. 7, No. 2, Hal. 52–58.
- Febriwani, F. W., Elliyanti, A., & Reza, M. 2019. Artikel Penelitian Analisis Kadar Timbal (Pb) Air Minum Isi Ulang pada Depot Air Minum (DAM) di Kecamatan Padang Timur Kota Padang Tahun 2017. *Jurnal Kesehatan Andalas*. Vol. 8, No. 3. Hal. 668–676.
- Handika. 2011. Analisis Karakteristik Modulasi Pada Media Fiber Optik Untuk Wavelength 660 nm Dan 950 nm. *Skripsi*. Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Handriyani, K. A. T. S., Habibah, N., & Dhyana Putri, I. G. A. S. 2020. Analisis Kadar Timbal (Pb) Pada Air Sumur Gali Di Kawasan Tempat Pembuangan Akhir. *Jurnal Sains Dan Teknologi*. Vol. 9, No. 1. Hal. 68–75.
- Hasanah, N. 2022. Analisis Penggunaan Cahaya Laser Untuk Menentukan Indeks Bias Kaca. Vol. 12, No. 3. Hal. 28–33.
- Hasibuan, M. S. 2020. *Belajar Phyton Dengan Singkat*. Yogyakarta: Sinau Phyton.
- Herman. 2017. Analisis Kadar Pb Pada Air Yang Melalui Saluran Pipa Penyalur Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Makassar. *Jurnal Media Analisis Kesehatan*. Vol. 8, No. 2, Hal. 91–99.
- Hodgson, P., Quan, K. M., MacKenzie, H. A., Freeborn, S. S., Hannigan, J., Johnston, E. M., Greig, F., & Binnie, T. D. 1995. Application Of Pulsed Laser Photoacoustic Sensors In Monitoring Oil Contamination In Water. *Elsevier Science S.A*. Hal. 339-344.
- Janna, M., Mitrayana, & Widyaningrum, R. 2022. Pengaruh Pemberian Agen Kontras Pewarna Sintetik pada Jaringan Biologis terhadap Hasil Pencitraan Fotoakustik. *Indonesian Journal of Applied Physics*. Vol. 12, No. 2, Hal. 176–187.
- Jones, L. D., & Chin, A. N. 1991. *Electronic Instruments and Measurements*. New York: Wiley.

- Kabuhung, A., Sembel, D. T., & Rumengan, I. F. M. 2013. Kadar Logam Berat (Pb, Cd, Hg dan As) pada Sumber dan Air Minum Isi Ulang (AMIU) Di Kota Manado. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*. Vol. 1, No. 1, Hal. 38-40.
- Karai, I., Fukumoto, K., & Horiguchi, S. I. 1981. Improvement in the Atomic Absorption Determination of Lead in Blood. *Journal Of Applied Toxicology*. Vol. 1, No. 6, Hal. 295.
- Kratkiewicz, K., Manwar, R., Rajabi-Estarabadi, A., Fakhoury, J., Meiliute, J., Daveluy, S., Mehregan, D., & Avanaki, K. (Mohammad). 2019. Photoacoustic/Ultrasound/Optical Coherence Tomography Evaluation of Melanoma Lesion and Healthy Skin in a Swine Model. *Sensors (Switzerland)*. Vol. 19, No. 12, Hal. 1–14.
- Krishnaswamy, S. 2008. *Photoacoustic Characterization of Materials*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Kumar, A., & Goswami, M. 2022. Labview Is Faster And C Is Economical Interfacing Tool For UCT Automation. *arXiv*. Vol. 1, No. 1, Hal. 14.
- Kusuma, A. H., Prartono, T., Atmadipoera, A. S., & Arifin, T. 2015. Sebaran Logam Berat Terlarut Dan Terendapkan Di Perairan Teluk Jakarta Pada Bulan September 2014. *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*. Vol. 6, No. 1. Hal. 41–49.
- Matua, G., Widodo, T. W., & Mitrayana, M. 2017. Penerapan Sistem Kendali XY-Stage dan Modulasi Laser Pada Tomografi Fotoakustik Menggunakan Arduino. *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*. Vol. 7, No. 2. Hal. 149–160.
- Miftah, H. K. 2022. Rancang Bangun Sistem Citra Fotoakustik Untuk Deteksi Subsurface Corrosion Berbasis Laser Dioda Dan Mikrofon Kondenser. *Skripsi*. Fisika, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Murthy, S., Bali, G., & Sarangi, S. K. 2014. Effect Of Lead On Growth, Protein And Biosorption Capacity Of Bacillus Cereus Isolated From Industrial Effluent. *Journal of Environmental Biology*. Vol. 35, No. 3, Hal. 407-411.
- Muyasar, P. 2012. *Terapi Air Putih*. Jakarta: Dunia Sehat.
- Nandra, Arsyad, M., & Mustafa U. 2022. Analisis Hasil Pengukuran Nilai Kecepatan Rata-Rata Bunyi Di Udara dengan Menggunakan Piranti Lunak Audacity. *PRISMA FISIKA*. Vol, 10, No. 3, Hal. 456.
- Natsir, N. A., Hanike, Y., Rijal, M., & Bachtiar, S. 2019. Kandungan Logam Berat Pb Dan Kadmium (Cd) Pada Air, Sedimen Dan Organ Mangrove Di Perairan Tulehu. *Jurnal Biology Science & Education*. Vol. 8, No. 2, Hal. 149-159.
- Nuraini, Iqbal, & Sabhan. 2015. Analisis Logam Berat Dalam Air Minum Isi Ulang (AMIU) Dengan Menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). *Gravitasi*. Vol. 14, No. 1. Hal. 36-43.

- Oktavianto, A., Nurhayati, & Suswati, E. 2014. *Evaluasi Keamanan Sumber Air Minum Desa Mojo Kecamatan Padang Kabupaten Lumajang. Jurnal Agroteknologi*. Vol. 8, No. 2, Hal. 185-191.
- Orfanakis, M., Tserevelakis, G. J., & Zacharakis, G. 2021. A Cost-Efficient Multiwavelength LED-Based Sistem for Quantitative Photoacoustic Measurements. *Sensors*. Vol. 21, No. 14, Hal. 1-14.
- Permata, M. A. D., Purwiyanto, A. I. S., & Diansyah, G. 2018. Kandungan Logam Berat Cu (Tembaga) Dan Pb (Timbal) Pada Air Dan Sedimen Di Kawasan Industri Teluk Lampung, Provinsi Lampung. *Journal of Tropical Marine Science*. Vol. 1, No. 1, Hal. 7-14.
- Physka, D. M., Supriyanto, R., Juliasih, N. L. R. G., & Kiswandono, A. A. 2018. Studi Analisis Pb(II) Menggunakan Asam Tanat Ekstrak Gambir (*Uncaria Gambir Roxb.*) Secara Spektrofotometri Ultraungu-Tampak. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*. Vol. 3, No.2, Hal. 110-113.
- Pinto, V. V., Ferreira, M. J., Silva, R., Santos, H. A., Silva, F., & Pereira, C. M., 2010, Long Time Effect on The Stability of Silver Nanoparticles in Aqueous Medium: Effect of The Synthesis and Storage Conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. Vol. 364, Hal. 19-25.
- Puspasari, R. 2006. Logam Dalam Ekosistem Perairan. *BAWAL*. Vol. 1, No. 2, Hal. 43-47.
- Romzi, M., & Kurniawan, B. 2020. Pembelajaran Pemrograman Python Dengan Pendekatan Logika Algoritma. *Jurnal Teknik Informatika Mahakarya*. Vol. 3, No. 2, Hal. 37-44.
- Santoso, I. B., & Supriyono. 2017. Optimalisasi Dimensi Image Untuk Meningkatkan Akurasi Naïve Bayes Classifier Dengan Menggunakan Interpolasi. *Laporan Penelitian Kompetitif Tahun Anggaran 2017*. 17 Juli 2017, Hal. 1-6.
- Schuerer, K., Maufrais, C., Letondal, C., Deveaud, E., & Petit, M. A. 2010. *Introduction to Programming using Python*. Paris: Pasteur Institute.
- Sim, J. Y., Ahn, C. G., Jeong, E. J., & Kim, B. K. 2018. In vivo Microscopic Photoacoustic Spectroscopy for Non-Invasive Glucose Monitoring Invulnerable to Skin Secretion Products. *Scientific Reports*. Vol. 8, No. 1, Hal. 1-11.
- Sowmiya, C., & Arun, K. T. 2017. Simulation of Photoacoustic Tomography (PAT) Sistem in COMSOL and Comparison of Two Popular Reconstruction Techniques. *Medical Imaging 2017: Biomedical Applications in Molecular, Structural, and Functional Imaging*. Vol. 10, No. 3, Hal. 10-13.
- Sugianta, I K. A., Gunadi, I G. A., & Indrawan, G. 2020. Analisis Pola Bunyi Sunari Berdasarkan Metode Fast Fourier Transform. *Jurnal Ilmu Komputer Indonesia(JIK)*. Vol. 5, No. 2, Hal. 16-18.

- Suma'mur. 2014. *Higiene Perusahaan dan Kesehatan Kerja (HIPERKES)*. Jakarta: CV Sagung Seto.
- Supardi, Y. 2017. *Semua Bisa Menjadi Programmer Python Basic*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.
- Susilo. 2016. *Sumber Belajar Penunjang Mata Pelajaran Keahlian Fisika*. Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Direktorat Jenderal Guru dan Tenaga Kependidikan.
- Sutiadi, A., & Wasono, M. 2003. Deteksi Fotoakustik NH_3 Dalam Cuplikan Udara Menggunakan Sel Bentuk Pisang Bersumber Laser CO_2 . *Seminar Nasional Fisika, Jurusan Fisika FMIPA UNNES*. 22 Februari 2003, Hal. 1–6.
- Tan, L. V., Hieu, T. Q., & Cuong, N. V. 2015. Spectrophotometric Determination of Cr(III) and Pb(II) Using Their Complexes with 5,11,17,23-Tetra[(2-ethyl acetoethoxyphenyl)(azo)phenyl]calix[4]arene. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. No. 4, Hal. 1-7.
- Tseng, Y., Hsu, Y., Lai, Y., Yu, Y., Liang, H., & Huang, K. 2021. Exploiting Modern Chladni Plates to Analogously Manifest the Point Interaction. *MDPI*. Hal. 1–12.
- Volkov, D. S., Rogova, O. B., & Proskurnin, M. A. 2020. Photoacoustic and Photothermal Methods in Spectroscopy and Characterization of Soils and Soil Organic Matter. *Photoacoustics*. Vol. 7, Hal. 2–4.
- Wade, G. 1976. *Acoustic Imaging*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Wati, E. A. E. S. 2010. Penetapan Logam Timbal dengan Metode Spektrofotometri Sinar Tampak. *Skripsi*. Kimia, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga. Yogyakarta.
- Yayu, N. G., & Permanawati, Y. 2015. Kandungan Logam Berat (Cd, Cu, Pb, Dan Zn) Dalam Air Laut Di Perairan Pantai Timur Pulau Rote. *Jurnal Geologi Kelautan*. Vol. 13, No. 2, Hal. 99-108.
- Yulis, P. A. R., & Desti. 2019. Penentuan Kadar Logam Pb Air Sungai Singingi Di Kabupaten Kuantan Singingi Riau. *Journal of Research and Education Chemistry*. Vol. 1, No. 2, Hal. 30–36.