

***SURFACE CRACK DETECTION* PADA BESI BAJA DENGAN METODE
TOMOGRAFI FOTOAKUSTIK**

(Skripsi)

Oleh

Firman Tohiri



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

***SURFACE CRACK DETECTION* PADA BESI BAJA DENGAN METODE TOMOGRAFI FOTOAKUSTIK**

Oleh

FIRMAN TOHIRI

Istilah yang umum digunakan untuk area kerusakan pada bagian permukaan adalah *surface crack detection*. Beberapa alat telah dikembangkan untuk mendeteksi *surface crack detection*. Namun, pembuatan alat deteksi kerusakan membutuhkan komponen yang sulit dicari dan relatif mahal. Oleh karena itu, diperlukan metode yang menggunakan komponen komersial yang mudah dicari dan terjangkau. Dalam penelitian ini, kami merancang sistem citra deteksi kerusakan pada besi baja dengan metode tomografi fotoakustik. Sistem citra fotoakustik menggunakan laser dioda merah 653 nm sebagai sumber radiasi dan mikrofon kondenser Behringer ECM8000 sebagai detektor sinyal akustik. Sistem gerak XY *stage* dan modulasi laser dikendalikan oleh Arduino Uno menggunakan laptop. Pembuatan sampel terbagi menjadi dua, yaitu sampel yang diberi kerusakan berupa lubang dan sampel yang diberi kerusakan berupa garis. Setiap sampel diuji dengan menggunakan frekuensi laser sebesar 16011 Hz yang menghasilkan intensitas akustik tertinggi dengan *duty cycle* sebesar 60%. Hasil penelitian dengan frekuensi 16011 Hz menunjukkan bahwa sistem citra fotoakustik dapat membedakan antara daerah normal dan daerah kerusakan pada baja dengan kerusakan lubang dan garis.

Kata kunci: *crack detection*, fotoakustik, laser dioda, sistem citra.

ABSTRACT

SURFACE CRACK DETECTION ON STEEL USING PHOTOACOUSTIC TOMOGRAPHY METHOD

By

FIRMAN TOHIRI

The common term used for damage detection on the surface area is "surface crack detection." Several tools have been developed for surface crack detection. However, the fabrication of damage detection devices requires components that are challenging to find and relatively expensive. Therefore, a method that utilizes readily available and affordable commercial components is needed. In this research, we designed an image-based damage detection system for steel using photoacoustic tomography. The photoacoustic image system employs a red diode laser at 653 nm as the radiation source and a Behringer ECM8000 condenser microphone as the acoustic signal detector. The XY stage motion system and laser modulation are controlled by an Arduino Uno using a laptop. The sample preparation is divided into two categories: samples with hole-type damage and samples with line-type damage. Each sample is tested using a laser frequency of 16011 Hz, which yields the highest acoustic intensity with a duty cycle of 60%. The research results at a frequency of 16011 Hz indicate that the photoacoustic image system can distinguish between normal and damaged areas in steel with both hole and line-type defects.

Keywords: crack detection, diode laser, imaging system, photoacoustic.

***SURFACE CRACK DETECTION* PADA BESI BAJA DENGAN METODE
TOMOGRAFI FOTOAKUSTIK**

Oleh

Firman Tohiri

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Laporan : **Surface Crack Detection Pada Besi Baja Dengan Metode Tomografi Fotoakustik**

Nama Mahasiswa : **Firman Johiri**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1757041006

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

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

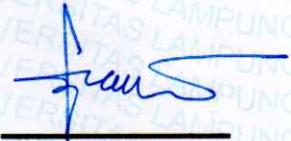
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.**



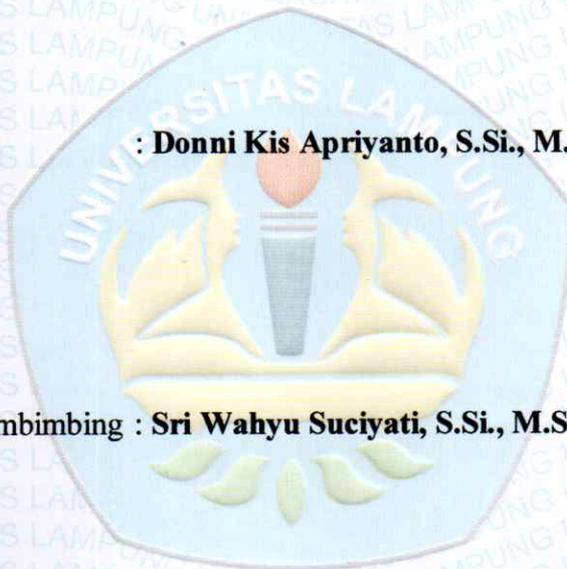
Sekretaris

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



Penguji

Bukan Pembimbing : **Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 19711001 200501 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 26 September 2023

PERNYATAAN

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

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

Bandar lampung, 19 September 2023



Firman Tohiri
Firman Tohiri
NPM. 1757041006

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Firman Tohiri dilahirkan di Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung pada 25 Juli 1997 sebagai anak pasangan Bapak Safangat dan Ibu Mutoharoh. Penulis menyelesaikan pendidikan TK Aisyah pada tahun 2003, SD Negeri 3 Sidodadi tahun 2009.

SMP Negeri 3 Pardasuka tahun 2012, dan SMA Negeri 1 Ambarawa tahun 2015 di Pringsewu. Selama menempuh pendidikan menengah atas, penulis aktif dalam berbagai organisasi intra sekolah seperti Eksmus dan Ichiban.

Pada tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung. Selama menjalani proses pendidikan formal tersebut, penulis aktif di beberapa organisasi intra kampus seperti Himpunan mahasiswa fisika (HIMAFI) sebagai kepala bidang SOSMAS HIMAFI pada tahun 2019, menjadi bagian dari organisasi KUKIS UNILA serta mengikuti event KMHE UNP tahun 2018. Penulis juga pernah menjadi bagian beberapa kepanitiaan seperti panitia FIF ROIS tahun 2018, Panitia KWI tahun 2018. Selain itu, penulis pernah menjadi asisten praktikum untuk mata kuliah seperti Elektronika Dasar II.

Penulis telah melakukan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium Fisika Dasar, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,

Universitas Lampung serta menyelesaikan laporan PKL dengan judul “Penyusunan Rencana Anggaran Belanja Alat dan Bahan Habis Pakai Laboratorium Fisika Material”. Selain itu, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sidodadi, Kecamatan Pardasuka , Pringsewu pada bulan Juli sampai Agustus 2020.

MOTTO

Pelangi yang muncul setelah hujan adalah janji alam bahwa masa buruk telah berlalu dan masa depan akan baik-baik saja.

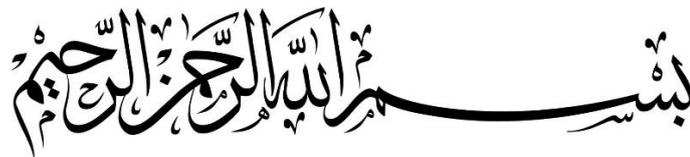
-Windry ramadhina-

*Memulai dengan penuh keyakinan,
Menjalankan dengan penuh keikhlasan,
Menyelesaikan dengan penuh kebahagiaan.*

Harus ada spasi agar tulisan dapat terbaca, harus ada jeda agar kalimat bisa tereja, harus ada henti agar langkah salah dapat diperbaiki, mari terus mendewasa, agar mengerti kapan harus berhenti kapan melangkah lagi.

-Ustadzah halimah alaydrus-

PERSEMBAHAN



Dengan Mengharapkan Ridho Allah SWT dan Syafaat Nabi Muhammad SAW,
Karya ini saya persembahkan kepada:

Kedua Orang Tuaku Tercinta

Bapak Alm. Safangat dan Ibu Mutoharoh

Terimakasih atas segala do'a, dukungan, serta pengorbanan tiada henti yang telah diberikan untuk mengiringi anaknya menuju gelar sarjana

Adiku Tersayang

Khotami Tamyizah

Terimakasih telah senantiasa kebersamai, memberikan semangat yang menjadialasan untuk dapat lebih baik lagi

Keluarga Besar & Rekan-rekan Seperjuangan

Terimakasih atas segala dukungan dan kekeluargaan kalian

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah Subhanahu wa ta'ala sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Surface Crack Detection pada Besi Baja dengan Metode Tomografi Fotoakustik**”. Skripsi ini merupakan sebuah karya yang dirangkai sejak Maret 2022 dan diselesaikan pada September 2023. Skripsi ini adalah saksi atas perjuangan; kesendirian, ketidakotentikan, keterasingan, kemunafikan dan ketidakpastian hidup adalah suatu keniscayaan bagi saya. Namun (masih) suatu kemungkinan bagi manusia pada umumnya.

Pada fase dewasa ini, kadangkala kita lupa akan arti kebaikan, kebenaran, kesetiaan, persahabatan, ketenangan dan cinta, karena terlalu banyak penderitaan yang kita peroleh. Tetapi suatu hal yang harus diingat, “*dunia tidak pernah kehilangan orang-orang baik, hanya saja kita yang terlalu sering bertemu orang-orang jahat*” – Dedi Irawan.

Skripsi ini saya persembahkan untuk orang-orang yang selalu bertanya “*kapan skripsimu selesai?*” dan “*kapan kamu wisuda?*”. Terlambat lulus atau tidak tepat waktu bukanlah sebuah kejahatan, bukan pula sebuah aib. Alangkah kerdilnya jika mengukur kecerdasan seseorang hanya dari siapa yang paling cepat lulus. Bukankah sebaik-baiknya skripsi adalah skripsi yang selesai? Karena mungkin ada suatu hal dibalik terlambatnya mereka lulus, dan percayalah, alasan saya disini merupakan alasan yang sepenuhnya baik.

Bandar Lampung, 19 September 2023
Penulis

Firman Tohiri

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan atas karunia dari Allah SWT, karena atas izin-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “***Surface Crack Detection pada Besi Baja dengan Metode Tomografi Fotoakustik***”. Dalam menyelesaikan skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada pihak- pihak yang membantu, diantaranya:

1. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam;
2. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika dan selaku pembimbing utama yang telah memberikan semangat, motivasi dan bantuan kepada penulis serta memberi bimbingan, saran, kritik, waktu dan tenaga dalam proses penyelesaian skripsi ini;
3. Bapak Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc. selaku pembimbing kedua atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran, kritik, waktu, tenaga dan motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini;
4. Ibu Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si. selaku penguji utama atas masukan dan saran-sarannya dari seminar proposal sampai dengan ujian skripsi;

5. Bapak Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingannya selama penulis menjadi mahasiswa di Universitas Lampung;
6. Seluruh Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu yang telah diberikan selama penulis menjadi mahasiswa di Universitas Lampung;
7. Kedua orang tua, adik, dan keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan motivasi serta moral maupun materiil kepada penulis;
8. Irsyad Ridho Romadhon, M Gilang Defriza, Hauzan Khoirullah Miftah, Arfi Suryanata, Ican Prayoga, Nico S. yang telah menemani, memberikan motivasi, masukan dan bantuan pada waktu-waktu terakhir penulis menyelesaikan skripsi;
9. Rekan-rekan seperjuangan, Wisnu Hidayat, Guntur Muhammad Rafly, AM Mario Sianturi dan rekan-rekan Fisika serta keluarga besar Himafi lainnya yang telah memotivasi, menemani dan membantu penulis dalam proses belajar selama menempuh studi.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah membantu penulis selama menempuh studi dan menyelesaikan skripsi.

Semoga Allah Subhanahu wa ta'ala senantiasa memberi perlindungan serta balasan sebaik – baiknya kepada kita di dunia dan akhirat, Aamiin.

Bandar Lampung, 19 September 2023
Penulis

Firman Tohiri

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait	5
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Laser.....	10
2.2.2 Mikrofon Kondenser	12
2.2.3 Motor <i>Stepper</i>	14
2.2.4 Arduino Uno	15
2.2.5 Besi Baja	17

2.2.6 Pengolahan Citra.....	18
2.2.6.1 Jenis-jenis metode pengolahan citra.....	19
2.2.7 Fotoakustik	21
2.2.7.1 Peristiwa terbentuknya fotoakustik	22
2.2.7.2 Perambatan gelombang fotoakustik	25
2.2.8 Deteksi Retak.....	26

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 Alat dan Bahan	28
3.2.1 Alat.....	28
3.2.2 Bahan	39
3.3 Prosedur Penelitian	30
3.3.1 Perancangan Sistem XY <i>Stage</i> dan Modulasi Laser.....	32
3.3.2 Perancangan Sistem Perekaman Puncak Akustik.....	34
3.3.3 Perancangan Citra Fotoakustik dalam Pengambilan data	35
3.3.4 Kelas Konversi Matriks Menjadi Citra	37
3.4 Pengujian Sistem	40
3.4.1 Kalibrasi Sistem Gerak XY <i>Stage</i>	40
3.4.2 Karakterisasi Mikrofon	40
3.4.3 Karakterisasi Modulasi Laser	41
3.4.4 Pengujian Keseluruhan Menggunakan Sampel	42

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Implementasi Alat <i>Surface Crack Detection</i>	43
4.1.1 Mekanik Gerak Sistem X <i>Stage</i>	44
4.1.2 Mekanik gerak sistem Y <i>Stage</i>	44
4.2 Kalibrasi Jarak Sistem Gerak XY <i>Stage</i>	45
4.3 Realisasi Perekaman Sistem Akustik.....	49
4.4 Karakterisasi Mikrofon	49
4.5 Realisasi Sistem Perangkat Lunak.....	52
4.5.1 Program Kelas Konversi Matriks Menjadi Citra	52
4.5.2 <i>Graphical User Interface</i> Perangkat Lunak	54
4.6 Karakterisasi Modulasi Laser	55
4.7 Pengujian Keseluruhan Sistem Menggunakan Sampel.....	57
4.7.1 Pengujian <i>Scanning</i> Pada Permukaan Atas.....	57
4.7.2 Pengujian <i>Scanning</i> Pada Permukaan Atas dan Bawah.....	61
4.7.3 Karakteristik Sistem Citra Fotoakustik	64

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan.....	66
5.2 Saran.....	66

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Implementasi rancangan mekanik <i>xy-Stage</i>	6
Gambar 2.2 Skema perangkat sistem pencitraan fotoakustik	7
Gambar 2.3 Elektret <i>mic condenser</i>	12
Gambar 2.4 Konstruksi dan bagian <i>mic condensor</i>	13
Gambar 2.5 Arduino Uno	16
Gambar 2.6 Sinyal PWM	17
Gambar 2.7 Koordinat pada citra digital	19
Gambar 2.8 Efek fotoakustik	23
Gambar 2.9 Kisi sinogram data lengkap TOF	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	31
Gambar 3.2 Skema rangkaian sistem XY <i>stage</i> dan modulasi laser	32
Gambar 3.3 Desain sistem XY <i>Stage</i>	32
Gambar 3.4 Diagram blok sistem XY <i>stage</i> dan modulasi laser	33
Gambar 3.5 Diagram blok sistem	34
Gambar 3.6 Ilustrasi dari <i>output</i> yang dihasilkan perangkat lunak	36
Gambar 3.7 Diagram alir kelas konversi matriks menjadi citra	38
Gambar 3.8 Konversi data akustik menjadi citra tanpa interpolasi	39
Gambar 3.9 Hasil citra yang telah di interpolasi	39
Gambar 4.1 Realisasi sistem gerak XY <i>stage</i> dan modulasi laser	43
Gambar 4.2 Komponen penyusun gerak sistem x <i>stage</i>	44

Gambar 4.3	Komponen penyusun gerak sistem y <i>stage</i>	45
Gambar 4.4	Mekanisme pengukuran jarak	47
Gambar 4.5	Grafik pengujian nilai <i>input</i> dengan perpindahan.....	48
Gambar 4.6	Implementasi sistem perekaman akustik	49
Gambar 4.7	Mekanisme karakterisasi mikrofon	50
Gambar 4.8	Grafik karakterisasi frekuensi mikrofon.....	51
Gambar 4.9	Tampilan GUI sistem	52
Gambar 4.10	Diagram blok program kelas konversi matriks menjadi citra.....	53
Gambar 4.11	Tampilan <i>Graphical User Interface</i> perangkat lunak	54
Gambar 4.12	Proses pengambilan data karakterisasi modulasi laser.....	55
Gambar 4.13	Hubungan intensitas akustik dengan frekuensi laser	56
Gambar 4.14	Hubungan intensitas akustik dengan <i>duty cycle</i>	56
Gambar 4.15	Area <i>scanning</i> pada sampel besi	58
Gambar 4.16	posisi <i>scanning</i> sampel	61

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 <i>Datasheet</i> Arduino Uno	15
Tabel 3.1 Alat yang digunakan.....	29
Tabel 3.2 Bahan yang digunakan.....	30
Tabel 3.3 Rancangan tabel data kalibrasi sistem gerak XY <i>stage</i>	40
Tabel 3.4 Rancangan tabel data karakterisasi mikrofon.....	41
Tabel 3.5 Rancangan tabel hubungan frekuensi laser dengan intensitas suara	41
Tabel 3.6 Rancangan tabel hubungan <i>duty cycle</i> laser dengan intensitas suara ...	42
Tabel 3.7 Rancangan tabel hasil pemindaian sampel.....	42
Tabel 4.1 Hasil pengambilan data sampel lubang	59
Tabel 4.2 Hasil pengambilan data sampel garis	60
Tabel 4.3 Hasil pengambilan data sampel lubang atas dan bawah	62
Tabel 4.4 Hasil pengambilan data sampel garis atas dan bawah	63
Tabel 4.5 <i>Datasheet</i> sistem citra	64

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan serta pertambahan penduduk Indonesia yang semakin pesat mengakibatkan munculnya program-program pembangunan di segala bidang kehidupan, salah satu ciri pelaksanaan dari program pembangunan tersebut yaitu berkembangnya sektor perindustrian. Menurut Badan Pusat Statistik Indonesia jumlah perusahaan industri di Indonesia hingga akhir tahun 2022 sebanyak 29 ribu usaha atau perusahaan industri yang terdiri dari beberapa subsektor. Salah satu sektor industri yang berkembang pada saat ini adalah industri logam besi baja (Mitraryana dan Satriawan, 2020). Logam besi baja selalu digunakan dalam pembangunan dari skala kecil hingga skala besar. Kualitas dari besi baja sangat berpengaruh pada pemeliharaan suatu struktur bangunan sehingga perlu adanya uji kelayakan pada besi baja sebelum diaplikasikan (Zaki *et al.*, 2018). Salah satu hal yang dapat dilakukan untuk menguji kelayakan pada baja adalah dengan melakukan pengujian cacat/retak.

Keretakan permukaan pada suatu material dapat menimbulkan kerusakan pada material itu sendiri, sehingga deteksi retak sangatlah penting. Ada dua cara yang dapat digunakan untuk mendeteksi retak, yaitu *destructive testing* (DT) dan *non destructive testing* (NDT). Seperti namanya *destructive testing* adalah pengujian dengan cara merusak material, tujuan dari *destructive testing* sendiri adalah untuk memahami ketahanan suatu material dengan cara merusaknya agar dapat mengetahui seberapa kuat material jika di tekan, di tarik, atau di lengkungkan. Berlawanan dengan *destructive testing*, *non-destructive testing* adalah cara pengujian tanpa harus merusak material. Pendeteksian cacat ini dapat diketahui dengan melakukan inspeksi pada benda atau material tersebut (Irwansyah, 2019).

NDT dapat dilakukan dengan cara konvensional melalui pengamatan visual, namun untuk produksi massal biasa menggunakan metode pengolahan citra digital untuk proses yang lebih cepat (Riyadi *et al.*, 2017).

Pengolahan citra dilakukan dengan cara mentransformasikan sinyal masukan akustik yang berupa nilai numerik menjadi hasil keluaran berupa citra (Febrianti *et al.*, 2020). Sebuah citra dengan resolusi dan kontras yang tinggi ialah sebuah sistem yang digunakan untuk menghasilkan tomografi fotoakustik (Matua *et al.*, 2017). Tomografi fotoakustik sendiri merupakan model yang dikembangkan aplikasinya dalam proses industri dengan menggabungkan teknologi sensor dan metoda rekonstruksi matematis. Di antara teknologi yang dikembangkan untuk proses industri ialah *Electrical Impedance Tomography* (EIT) untuk aplikasi di bidang geologi, proses kimia, perminyakan, dll; *Electrical Capacitance Tomography* (ECT) untuk aplikasi industri perminyakan, pemrosesan powder, pemrosesan hidrokarbon dan industri-industri kimia lain (Warsito, 2005). Namun teknik pencitraan tersebut memiliki nilai ekonomi yang tinggi sehingga dibutuhkan teknik metode pencitraan yang memiliki nilai ekonomi rendah, seperti teknologi laser dioda yang digunakan sebagai sistem fotoakustik pencitraan permukaan (Widyaningrum *et al.*, 2018).

Teknologi laser dioda telah banyak digunakan karena harga yang terjangkau namun menghasilkan frekuensi tinggi yang berperan penting dalam pencitraan fotoakustik. Laser dioda sendiri merupakan laser yang paling banyak aplikasinya dibanding laser jenis lainnya. Secara komersial laser dioda dengan berbagai panjang gelombang, bentuk yang kompak, dengan daya yang besar dan harga yang relatif cukup murah sudah banyak digunakan (Handayani, 2014). Setiawan pada tahun 2018 memanfaatkan efek dari fotoakustik berhasil membuat sistem citra untuk mendeteksi keretakan permukaan pada pelat aluminium dengan cara memodulasi sampel menggunakan laser dioda. Hanya saja pada penelitian tersebut untuk uji coba pada objek dengan kerusakan skala kecil, dengan keretakan permukaan hanya sampai 30 mm.

Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan perancangan sistem *surface crack detection* pada besi baja dengan analisis keretakan skala tembus dan tak tembus, dengan metode tomografi fotoakustik. Besi baja sebagai bahan sampelnya dengan motor *stepper* sebagai alat penggerak serta laser dioda merah 150 mW dengan panjang gelombang 653 nm sebagai alat modulasi dan mikrofon kondenser tipe behringer ECM 8000 sebagai alat perekaman pada besi baja untuk data hasil penelitian. Penggunaan arduino uno sebagai sistem kendali pada motor *stepper* serta mengatur frekuensi dan *duty cycle* pada laser dioda. Pada sistem perekaman fotoakustik menggunakan mikrofon kondenser akan dihasilkan data berupa akustik yang akan diubah menjadi citra.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana cara perancangan alat sistem citra fotoakustik sebagai pendeteksi kerusakan permukaan berlubang pada besi baja?
2. Bagaimana cara mengetahui kerusakan permukaan yang dapat dan tidak dapat dilihat oleh mata pada besi baja?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan alat dalam mendeteksi kerusakan pada permukaan besi baja dengan hasil keluaran berupa citra fotoakustik.
2. Perancangan sistem citra fotoakustik sebagai pendeteksi kerusakan pada permukaan besi baja menggunakan laser dioda serta mikrofon kondenser dengan Arduino sebagai sistem kendali penggerak XY *stage* dan modulasi laser.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini ialah terbentuknya alat pendeteksi sistem citra fotoakustik dalam bidang industri khususnya *surface crack detection* pada besi baik secara tembus dan tak tembus serta sebagai referensi penelitian alat tomografi fotoakustik dalam bidang industri selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perancangan alat sistem citra fotoakustik menggunakan modulasi laser dioda merah 150 mW dengan panjang gelombang 653 nm serta modul mikrokontroler berupa arduino uno.
2. Perancangan alat sistem citra fotoakustik menggunakan *microfon condenser* tipe Behringer ECM8000.
3. Tempat penelitian dengan ruangan tertutup serta kedap suara bising.
4. Sampel yang digunakan penelitian ini menggunakan besi baja dengan ketebalan 10 mm.
5. Luasan sampel dengan skala 4×4 cm dan ketebalan 10 mm.

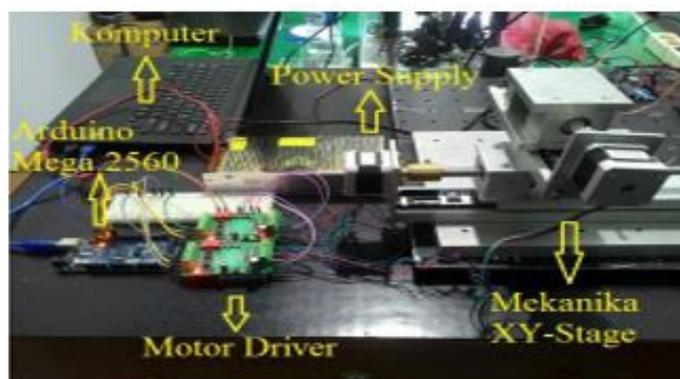
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian terkait fotoakustik tomografi menggunakan laser dioda dan mikrofon kondensor sebelumnya sudah pernah dilakukan. Pengukuran fotoakustik pertama kali dikembangkan pada tahun 1800-an, tetapi lambat dan terbatas karena kompleksitasnya (Favro *et al.*, 1980). Setiawan *et al* 2018, melakukan penelitian deteksi rekat permukaan sistem gambar fotoakustik dengan sederhana dan berbiaya rendah. Pada penelitiannya, terdapat skema eksperimen yang terdiri dari tiga bagian utama: kontrol unit, dioda laser, dan mikrofon. Salah satu fungsi dari unit control adalah untuk menggerakkan objek atau sensor untuk pemindaian 2D. Sistem tahap xy diposisikan pada sumbu x dan y menggunakan bipolar motor, SLO-SYN Model M061-FD02E. Motor ini didukung oleh motor stepper mikro *driver*, yang merupakan modul gerakan yang sangat presisi.

Tujuan dari penelitiannya adalah untuk mendeteksi sinyal fotoakustik dan efek dari frekuensi laser termodulasi. Tiga frekuensi berbeda digunakan dalam percobaan: 5502 Hz, 10194 Hz, dan 15013 Hz (masing-masing mewakili rentang frekuensi rendah, menengah, dan tinggi). Pada kesimpulan penelitian sistem fotoakustik yang dirancang pada percobaannya mampu menciptakan citra retakan mikro pada permukaan suatu material. Dengan sistem sederhana dan biaya yang murah serta menghasilkan gambar fotoakustik tinggi dan jelas.

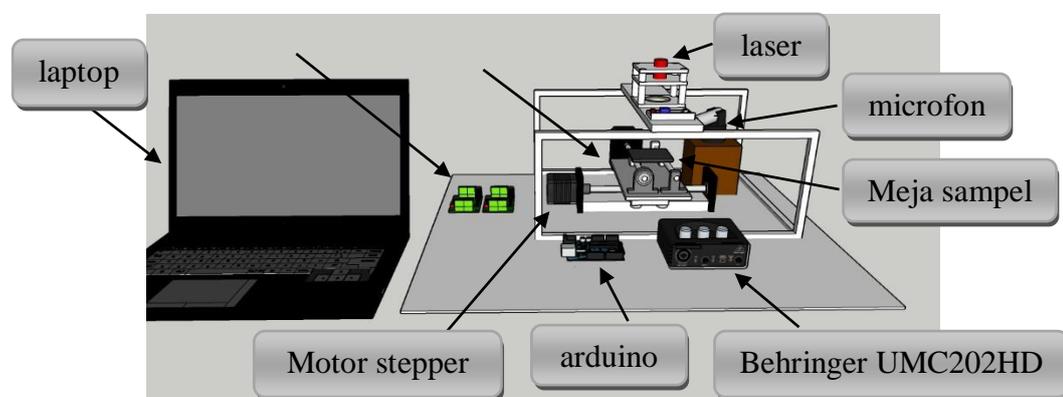
Matua *et al* 2017, telah membuat penerapan sistem kendali XY stage dan modulasi laser pada tomografi fotoakustik. Perancangan sistem terdiri dari perancangan perangkat keras dan lunak. Pengujian ini untuk mengetahui proses pembacaan puncak sinyal akustik dengan 3 objek berbeda yaitu pengujian terhadap latar, laser dan sampel. Sistem kendali pada penggerak mekanik xy-stage menggunakan motor stepper, sehingga perlu diketahui akurasi sistem kendali yang bekerja pada gerakan satu putaran yang pergerakannya diaktuasikan oleh *ball screw*. Dari data hasil yang telah didapat perekaman menunjukkan bahwa puncak sinyal fotoakustik pada perekaman dengan adanya sampel lebih tinggi dibandingkan perekaman tanpa sampel. Berdasarkan uji jarak tempuh pergerakan mekanik xy-stage menggunakan motor stepper jenis bipolar Nema 17, diperoleh jarak tempuh ($4,046 \pm 0,005$) mm untuk gerakan motor satu putaran dan dibutuhkan 25 step untuk memperoleh jarak tempuh sejauh ($0,50 \pm 0,05$) mm yang digunakan dalam proses pemaparan. Susunan rangkaian motor stepper dan motor *driver* seperti pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1. Implementasi rancangan mekanik XY-Stage.

Pengembangan sistem tomografi fotoakustik untuk objek pencitraan telah dilakukan, Nurjannah dan Mitrayana 2022, Penggunaan laser dioda hijau 532 nm sebagai sumber radiasi karena biayanya rendah, ukurannya ringkas, laju pengulangan pulsa yang tinggi, dan daya keluaran yang tinggi. Mikrofon kondensator omni Behringer ECM 8000 sebagai penguat untuk mendeteksi suara dengan frekuensi hingga 20 kHz. Sistem akan terhubung ke laptop yang telah diinstal perangkat lunak labview, yang berfungsi untuk interpretasi dan penyimpanan data dalam format x/x dan hasil gambar 2 dimensi. Sistem ini

digunakan untuk mencitrakan sebuah aorta ayam yang mengeluarkan lemak di dalamnya dan ditempatkan di media parafin. Memperoleh hasil data untuk mencitrakan objek secara optimal pada 50% dan frekuensi 19 kHz. Perbedaan hasil gambar aorta dan jaringan lemak terlihat ketika pewarna hijau ditambahkan untuk meningkatkan kontras gambar. Karena penyerapan jaringan aorta dan lemak tidak optimal pada panjang gelombang 532 nm. Penambahan sereal bakar sebagai bahan kontras yang dapat meningkatkan tingkat intensitas sampel tertinggi yaitu jenis nasi putih bakar dengan nilai TI rata-rata 71,3998 dB. Diharapkan sistem ini dapat dikembangkan untuk pencitraan jaringan pada manusia. Skema perangkat sistem pencitraan fotoakustik ditunjukkan **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. Skema perangkat sistem pencitraan fotoakustik.

Setiawan *et al* 2016, Telah melakukan pengembangan pada sistem citra fotoakustik serta pengujian terhadap keretakan dan elemen subpermukaan. Pada strategi yang digunakan yaitu memperkecil berkas pengusik dan menggeser frekuensi kerja fotoakustik pada ranah audio. Hasil pada pengujiannya sendiri memperlihatkan, perangkat audio komersial dapat digunakan untuk mendeteksi sinyal fotoakustik dengan batasan frekuensi modulasi hingga 2153 Hz. Sedangkan untuk mencapai frekuensi yang lebih rendah berhasil dikembangkan metode *Phase Sensitive Detector* untuk daerah kerja 400 hingga 600 Hz. Ujicoba pada objek dengan keretakan permukaan 30 mm dapat dideteksi dengan jelas, meskipun terjadi perbedaan ukuran akibat pengaruh diameter berkas laser yang digunakan. Untuk ujicoba pada tingkat subpermukaan dapat dideteksi adanya korosi hingga kedalaman 0,8 mm pada objek logam padat. Sistem pencitraan

fotoakustik ini diharapkan dapat digunakan sebagai alternatif baru dalam pengembangan pada detector kerusakan bahan yang lebih presisi dan terjangkau.

Irwansyah 2019, melakukan pengujian tidak merusak dengan teknik deteksi cacat pada material. Pengujian tidak merusak atau *non-destruktif test* ini terdiri dari *Visual Inspection*, inspeksi *visual* berarti inspeksi peralatan dan struktur menggunakan kombinasi indera manusia seperti penglihatan, pendengaran, sentuhan dan penciuman. *Liquid Penetrant Test*, metode *liquid penetrant test* merupakan metode NDT yang paling sederhana, metode ini digunakan untuk menemukan cacat di permukaan terbuka dari komponen solid, baik logam maupun non logam, seperti keramik dan plastik fiber. *Magnetic Particle Inspection*, dengan menggunakan metode ini, cacat permukaan (*surface*) dan bawah permukaan (*subsurface*) suatu komponen dari bahan ferromagnetik dapat diketahui. Prinsipnya adalah dengan memagnetisasi bahan yang akan diuji. *Eddy Current Test*, metode ini pada prinsipnya hampir sama dengan metode *magnetic particles*, akan tetapi medan listrik yang dipancarkan dari arus listrik bolak-balik, ketika ada *crack* maka medan listrik akan berubah dan perubahannya itu akan terbaca pada alat pengukur *impadance*. *Ultrasonic Inspection*, pengujian ultrasonik merupakan pengujian NDT yang memanfaatkan gelombang suara frekuensi tinggi untuk mendeteksi cacat atau perubahan dari sifat material. *Radiographic Inspection*, pemeriksaan radiografi didasarkan pada paparan oleh mesin sinar-X atau sumber radioaktif (Ir-192, Co-60, atau dalam kasus yang jarang, Cs-137) dapat digunakan sebagai sumber foton. dan *Acoustic Emission Testing*, di saat suatu material solid diberi tegangan akan menambah parah kondisi cacat jika semua material memancarkan ledakan singkat dari suatu energi akustik (*acoustic energy*) yang disebut “*emissi*”.

Mengetahui kualitas suatu material pengujian sangat erat kaitannya dengan pemilihan bahan yang akan dipergunakan dalam konstruksi. Di dunia industri tidak asing dengan teknik pengujian tidak merusak atau *non-destruktif test* (NDT). Maka dari itu dengan pengujian akan diketahui kualitas material tersebut sehingga produk yang dihasilkan bisa dipertanggungjawabkan. Pengujian yang sering digunakan salah satunya dengan pengujian tidak merusak atau *non- destruktif test*.

Tujuan dari pengujian tidak merusak atau *non-destruktif test* adalah untuk mengetahui cacat atau tidaknya sebuah material. Hasil dari penelitian ini antara lain, Termografi memungkinkan suatu profil thermal dalam suatu benda, mesin atau bangunan yang dapat dipresentasikan dalam suatu bentuk grafik yang mengikuti pembebanan temperatur kerja yang diperoleh. Analisa getaran mesin yang berputar akan menghasilkan getaran suara (*noise*), dengan mengawasi frekuensi, amplitudos dan sebagainya maka kondisi getaran pada mesin dapat diestimasi.

Widyaningrum 2019, melakukan penelitian tentang teknik pencitraan fotoakustik untuk deteksi karsinogenesis oral. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan sistem pencitraan fotoakustik untuk deteksi karsinogenesis oral. Sistem pencitraan fotoakustik pada penelitian ini terdiri dari laser dioda sebagai sumber EM, mikrofon condenser sebagai detektor, dan *custom build xy-stage* yang dikendalikan dengan komputer. Modulasi laser dioda *kontinu* dengan mengatur *duty cycle* teknik *pulse width modulation* (PWM) sehingga menghasilkan paparan laser *fluktuatif* untuk membangkitkan sinyal akustik dari sampel. Untuk menentukan *duty cycle* serta jenis laser yang tepat untuk mencitrakan jaringan, dilakukan uji pengaruh *duty cycle* laser terhadap sinyal akustik dan terhadap kualitas citra fotoakustik. Sistem diuji lebih lanjut untuk mencitrakan angiogenesis pada jaringan inflamasi, yang dilanjutkan dengan uji diagnostik untuk deteksi karsinogenesis oral secara *ex vivo*.

Model jaringan inflamasi dengan angiogenesis berupa induksi ulkus traumatik pada dorsal lidah tikus *Sprague-Dawley* menggunakan *punch biopsy* diameter 2 mm teknik standar, sedangkan jaringan karsinogenesis oral didapatkan dari induksi larutan *4-nitroquinoline-1-oxide* (4NQO) pada lidah tikus *Sprague Dawley* selama 8, 16, dan 24 minggu. Seluruh citra fotoakustik didapatkan dari sampel jaringan yang telah difiksasi menjadi sediaan blok parafin. Intensitas warna merah dan hijau diperoleh dengan pengolahan citra digital berupa ekstraksi ciri statistika yang diterapkan pada citra fotoakustik. Uji korelasi Spearman menunjukkan bahwa *duty cycle* laser berkorelasi ($p < 0,05$) sangat kuat terhadap sinyal akustik ($r = 0,851$ pada laser 450 nm , dan $r = 0,983$ pada laser

532 nm). Kualitas citra fotoakustik yang dihasilkan oleh sistem dipengaruhi oleh modulasi laser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pencitraan fotoakustik yang dibangun pada penelitian ini memiliki potensi diagnostik untuk deteksi karsinogenesis oral.

2.2 Landasan teori

2.2.1 Laser

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) merupakan suatu alat yang memancarkan radiasi elektromagnetik, biasanya dalam bentuk cahaya yang tidak dapat dilihat maupun dapat dilihat dengan mata normal, melalui proses pancaran koheren terstimulasi. Karena sifatnya tersebut, sinar laser banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, misalnya pada bidang pelayanan (jasa), industri, astronomi, fotografi, elektronika, komunikasi dan bidang kedokteran (Tanzila, 2014). Pada bidang industri dikenal ada dua jenis intensitas laser, yaitu laser berdaya tinggi (*high level*) dan laser berdaya rendah (*low level*). Klasifikasi tersebut didasarkan pada panjang gelombang yang dimiliki sinar tersebut. Secara umum untuk tujuan rehabilitasi medik digunakan radiasi laser berdaya rendah (LLLT) dengan panjang gelombang antara 600 - 1100nm (Wang, 2004).

Laser pada bidang industri sendiri umumnya sangat koheren, yang mengandung arti bahwa cahaya yang dipancarkan tidak menyebar dan rentang frekuensinya sempit (*monochromatic light*). Laser merupakan bagian khusus dari sumber cahaya. Sebagian besar sumber cahaya, emisinya tidak koheren, spektrum frekuensinya lebar, dan phasanya bervariasi terhadap waktu dan posisi. Daerah kerja divais laser tidak terbatas pada spektrum cahaya tampak saja tetapi dapat bekerja pada daerah frekuensi yang luas, Oleh karena itu, divais tersebut dapat berupa laser *infra red*, laser ultra violet, laser *x-ray*, atau laser *visible* (Halliday dan Resnick, 1991).

Laser dikatakan baik jika frekuensi atau panjang gelombang yang dipancarkannya bersifat tunggal. Daya laser dapat dibuat bervariasi dari mulai nano watt untuk laser kontinyu sampai triliunan watt untuk laser pulsa. Laser merupakan komponen utama pada sistem komunikasi modern saat ini. Selain itu, laser juga dimanfaatkan sebagai probe untuk pembacaan data CD atau DVD, sebagai sumber cahaya pada alat pembaca barcode, alat bantu navigasi pada bidang militer, alat bantu operasi pada bidang kedokteran, dan masih banyak lagi aplikasi lainnya. Secara umum suatu divais laser terdiri dari media penguat berkas cahaya (gain medium), sumber energi pemompa (pumping source), dan resonator optik (optical resonator) (Hecht, 1987).

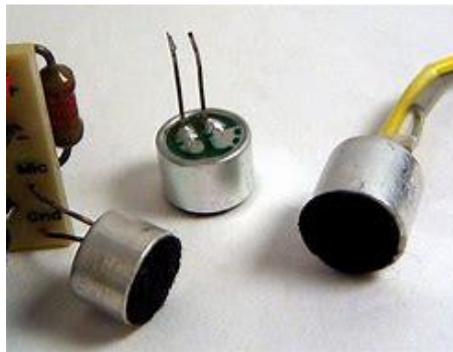
Saat ini dikenal 3 jenis laser yaitu yang pertama Laser zat padat, bahan aktifnya berupa zat padat seperti laser Ruby, Laser Nd-YAG, laser semikonduktor (dioda), yang kedua Laser gas, bahan aktifnya berupa gas, seperti laser N₂, laser HeNe, laser CO₂ dan yang ketiga Laser zat cair, bahan aktifnya berupa zat cair, seperti laser zat warna (*dye lasers*) (Gabriel dr. J.F, 1998). Cara kerjanya mencakup optika dan elektronika. Para ilmuwan biasa menggolongkannya dalam bidang elektronika kuantum. Sebetulnya laser merupakan perkembangan dari *MASER*, huruf M disini singkatan dari *Microwave*, artinya gelombang mikro. Cara kerja maser dan laser adalah sama, hanya saja mereka bekerja pada panjang gelombang yang berbeda. Laser bekerja pada spektrum inframerah sampai ultra ungu, sedangkan maser memancarkan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang jauh lebih panjang, sekitar 5 cm, lebih pendek sedikit dibandingkan dengan sinyal TV - UHF. Laser yang memancarkan sinar tampak disebut laser *optic* (Pikatan, 1991).

Laser sendiri terdiri dari beberapa jenis bergantung pada medium laser yang digunakan. Laser dioda merupakan laser yang paling banyak aplikasinya dibanding laser jenis lainnya. karena laser dioda tersedia secara komersial dengan berbagai panjang gelombang, bentuk yang kompak, daya yang besar dan harga yang relatif murah. Namun laser dioda mempunyai kekurangan yaitu bentuk berkasnya yang eliptikal dan panjang gelombang mudah berubah karena perubahan lingkungan. Pengukuran panjang gelombangnya perlu dilakukan

(Minarni *et al.*, 2013). Penggunaan laser diode untuk laser daya rendah akan memberi keuntungan secara teknis dan biaya. Tidak diperlukan sumber daya tegangan tinggi dan sistem pendingin yang rumit. Laser bekerja pada gelombang elektromagnetik pada spektrum merah, biru, jingga, nila dan ungu. Dalam hal ini yang bekerja sebagai substrat adalah ZnO, proses yang terjadi dalam ruang hampa (*chamber*) yang merupakan bagian dari laser (Wulandari, 2018).

2.2.2 Mikrofon Kondenser

Mic Condenser atau mikrofon merupakan transduser elektromekanis yang mengubah perubahan-perubahan dalam tekanan udara menjadi perubahan-perubahan yang sesuai dalam sinyal listrik **Gambar 2.3**.

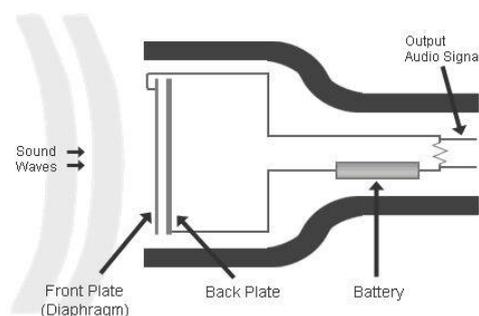


Gambar 2.3. Elektret *mic condenser*.

Mikrofon jenis ini bekerja sesuai prinsip kapasitor dengan membran diafragma berfungsi sebagai salah satu lempeng kapasitor (*capacitor plate*). Saat terjadi vibrasi akibat paparan gelombang suara, jarak antar lempeng berubah proporsional terhadap amplitudo gelombang yang mengakibatkan perubahan nilai kapasitansinya. Tegangan jepit pada komponen elektronika ini berubah secara instan yang merupakan refleksi dari perubahan kapasitansi relatif terhadap beda potensial (bias voltage) di antara kedua terminalnya (Komarudin *et al.*, 2018).

Mic condenser sendiri terdiri dari lempengan kapasitif yang disekat pada kerapatan beberapa micron. Sementara itu prinsip kerja dari *mic condenser* merupakan proses pengisian dan pembuangan kapasitansi yang diakibatkan oleh

lempengan *condenser* yang bergerak akibat frekuensi suara yang diterimanya sehingga mengakibatkan frekuensi kapasitansi yang berubah-ubah pula pada saat ada suara yang diterima. *Microphone* (disingkat *mic*) merupakan transduser yang mendeteksi sinyal suara dan menghasilkan sinyal elektrik berupa tegangan atau arus yang proporsional terhadap sinyal suara. *Microphone* memberikan *output* sinyal analog yang sebanding dengan perubahan tekanan akustik bergantung pada fleksibilitas diaphragm. Sinyal listrik kemudian digunakan untuk pengiriman, perekaman atau pengukuran pada karakteristik sinyal akustik. Penggunaan yang paling umum adalah pada audio *broadcasting*, perekaman, dan reproduksi, dengan frekuensi yang berada pada rentang pendengaran manusia yaitu 20Hz-20KHz. Salah satu tipe *microphone* yang biasa digunakan untuk kepentingan musikal adalah tipe *condenser*. Adapun simbol dan diagram *mic condenser* ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4. Konstruksi dan bagian *mic condenser*.

Condenser berarti kapasitor, komponen elektronika yang menyimpan energi dalam bentuk medan elektrostatis. *Microphone condenser* memerlukan power dari baterai atau suplai *eksternal*. Sinyal audio yang dihasilkan oleh tipe ini lebih kuat dibandingkan dengan tipe yang lainnya. *Condenser* juga lebih sensitif dan *responsif* sehingga tepat digunakan untuk mengambil perbedaan pada suara. Namun tipe ini tidak cocok digunakan pada volume tinggi karena sensitifitasnya membuat mudah terdistorsi. Mikrofon kondenser merupakan komponen elektronik yang menyimpan energy dalam medan elektrostatis, mikrofon jenis ini merupakan transduser yang menggunakan bahan dasar kapasitor yang berfungsi mengubah energi akustik menjadi energ listrik (Prawira *et al.*, 2015).

2.2.3 Motor Stepper

Motor *Stepper* adalah perangkat elektromekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit (Silaban *et al.*, 2020). Motor *stepper* bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan kepada motor. Karena itu, untuk menggerakkan motor *stepper* diperlukan pengendali motor stepper yang membangkitkan pulsa-pulsa periodik. Penggunaan motor stepper memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan penggunaan motor DC biasa (Soedjarwanto *et al.*, 2021). Motor *stepper* dapat berputar atau berotasi dengan sudut *step* yang bisa bervariasi tergantung motor yang digunakan. Ukuran *step* (*step size*) dapat berada pada *range* $0,9^{\circ}$ sampai 90° (Syahrul, 2011).

Pada dasarnya terdapat 3 tipe motor stepper yaitu:

- a. Motor *stepper* tipe *variable reluctance* (VR)
Motor stepper jenis ini memiliki bentuk rotor yang unik yaitu berbentuk silinder dan pada semua unitnya memiliki gerigi yang memiliki hubungan dengan kutub-kutub stator. Rotor pada magnet tipe ini tidak menggunakan magnet permanent. Stator terlilit oleh lilitan sehingga pada saat teraliri arus, stator akan menghasilkan kutub magnet. Jumlah gerigi pada rotor akan menentukan langkah atau step motor (Yudhaswana dan Joeffie, 2011).
- b. Motor *stepper* tipe permanen *magnet* (PM)
Motor stepper jenis ini memiliki rotor yang berbentuk seperti kaleng bundar yang terdiri atas lapisan magnet permanen yang diselang-seling dengan kutub yang berlawanan. Dengan adanya magnet permanen, maka intensitas fluks magnet dalam motor ini akan meningkat sehingga dapat menghasilkan torsi yang lebih besar. Motor jenis ini biasanya memiliki resolusi langkah (*step*) yang rendah yaitu antara $7,5^{\circ}$ hingga 15° per langkah atau 48 hingga 24 langkah setiap putarannya (Aji, 2017).
- c. Motor *stepper* tipe *hybrid*
Motor *stepper* tipe *hybrid* merupakan motor stepper kombinasi antara PM dan VR motor stepper. Motor hybrid mengkombinasikan karakteristik terbaik dari motor variable reluktansi dan motor magnet permanent. Motor

ini dibangun dengan kutub stator yang banyak-gigi dan rotor magnet permanent. Motor hybrid standar mempunyai 200 gigi rotor dan berputar pada 1,8 derajat sudut *step*. Karena memperlihatkan torsi tinggi dan dinamis serta berputar dengan kecepatan yang tinggi maka motor ini digunakan pada aplikasi yang sangat luas (Yudhaswana dan Joefrie, 2011).

2.2.4 Arduino uno

Arduino UNO adalah *board* yang menggunakan IC Mikrokontroler Atmega328. Atmega 328 adalah papan rangkaian sistem minimum yang menggunakan IC Atmega dan bersifat *open source*. Untuk pemograman menggunakan *software* Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) dengan *library* C/C++. Berfungsi untuk mengendalikan Inverter 3 Fasa untuk mengatur PWM (*Pulse Width Modulation*). Arduino uno membutuhkan sumber tegangan 5 VDC dari rangkaian catu daya. Sinyal keluaran mikrokontroler selanjutnya menuju *buffer* 7408 agar tegangan tetap 5 Volt sebelum menjadi sinyal masukan untuk *driver* (Astuti dan Masdi, 2022).

Tabel 2.1 Datasheet Arduino Uno (Iirsyam, 2019)

Karakteristik	Keterangan
<i>Microcontroller</i>	Atmega328
<i>Operating Voltage</i>	5 V
<i>Input Voltage</i>	7 – 12 V
<i>Digital I/O Pins</i>	14 (6 pin PWM Output)
<i>DC Current per I/O Pin</i>	40 mA
<i>Flash Memory</i>	32 KB (Atmega), 0,5 KB digunakan <i>bootloader</i>
<i>SRAM</i>	2 KB (Atmega328)
<i>EEPROM</i>	1 KB (Atmega328)
<i>Clock Speed</i>	16 MHz



Gambar 2.5 Arduino Uno (Arfandi dan Supit, 2019).

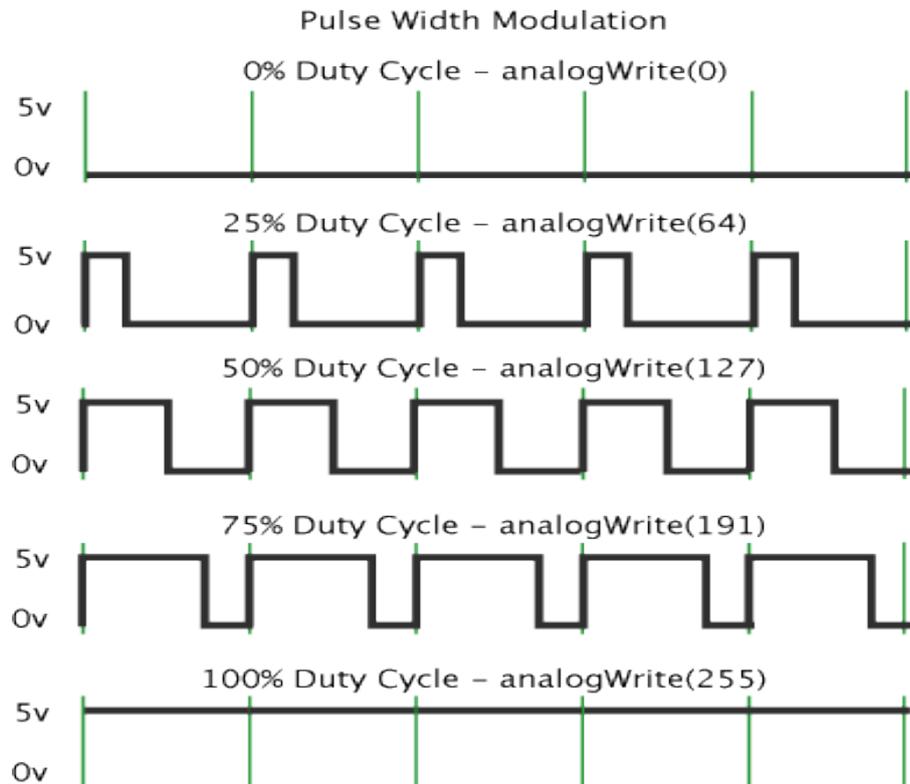
PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah suatu metode untuk mendapatkan *output* tegangan bervariasi pada mikrokontroler. PWM dibentuk dengan membuat *output* gelombang kotak pada frekuensi tinggi. Tegangan *output* dapat diatur dengan merubah lebar pulsa *high* (*duty cycle*) (Arif dan Aswardi, 2020).

$$\text{Perioda} = T_{on} + T_{off} \quad (2.1)$$

$$\text{Frekuensi} = 1/\text{perioda} \quad (2.2)$$

$$\text{Duty Cycle} = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (2.3)$$

Pada **Gambar 2.6** di jelaskan bentuk gelombang sinyal PWM saat *duty cycle* 0% hingga *duty cycle* 100 %.



Gambar 2.6 Sinyal PMW.

Pembuatan hardware serta perancangan desain dilakukan semaksimal mungkin agar dapat bekerja dengan baik ketika dioperasikan sehingga menghasilkan *output* sesuai dengan tujuan dari tugas akhir yang dibuat. Dalam tahap pengujian, terdapat *error* yang mungkin terjadi yang timbul dari masing–masing komponen saat dioperasikan tersebut (Astuti dan Masdi, 2022).

PWM digunakan sebagai penggerak motor melalui perubahan *duty cycle*. Ketika *duty cycle* 0% motor akan berhenti. Ketika *duty cycle* 50% motor akan berputar dengan kecepatan setengah dari maksimal. Ketika *duty cycle* dalam kondisi 100% motor akan berputar dengan kecepatan maksimal (Putra dan Zulwisli, 2019).

2.2.5 Besi Baja

Baja (*Steel*) adalah suatu produksi besi yang mengandung kadar karbon berkisar sekitar 1,7%. Produk ini secara teknik dinyatakan sebagai baja karbon (*Carbon Steel*) (Darmanto, 2006). Penggunaan baja karbon rendah St37 dalam kehidupan

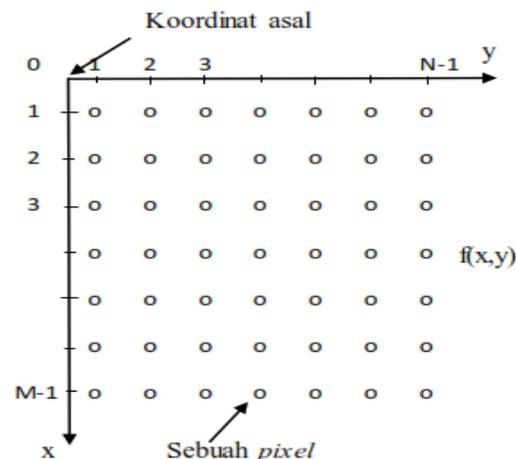
sehari-hari adalah sebagai bahan pembuatan mur, baut, ulir sekrup, alat pengangkat presisi, batang tarik, perkakas silinder dan yang lainnya. Namun penggunaan baja St37 ini terbatas pada bagian-bagian yang kurang mendapatkan beban dan gesekan yang berat. Hal ini karena baja karbon St37 memiliki sifat mekanis terutama kekerasan dan keuletan kurang sesuai dengan kebutuhan yang ada. Untuk mendapatkan suatu konstruksi bahan yang keras pada permukaan dan ulet pada bagian inti baja maka dilakukan *carburizing* (Suherman, 2003).

Penggunaan baja telah mengalami peningkatan yang cukup pesat di industri manufaktur dan sebagian ditentukan oleh nilai ekonomisnya (Surdia dan Met, 2006). Baja St37 merupakan salah satu jenis baja karbon rendah yang memiliki sifat mudah di tempa dan mudah di proses permesinan. Pahat bubut HSS banyak digunakan untuk melakukan proses permesinan baja St37 dalam pembuatan roda gigi, poros dan baut. Pada proses penyelesaian pekerjaan, selain dimensi produk jadi, kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan salah satu karakteristik kualitas yang kritis (*Critical to Quality Charactersistics/CTQ*) yang penting untuk menunjukkan kualitas pengerjaan. Secara khusus, kekasaran permukaan memegang peranan penting pada kualitas produk dan merupakan salah satu parameter yang penting untuk mengevaluasi dari hasil proses keakurasian permesinan (Petropoulos *et al.*, 2009).

2.2.6 Pengolahan Citra

Pengolahan citra menjelaskan pemrosesan data 2 dimensi yang terbagi menjadi 2 yaitu citra analog dan citra digital. Citra analog sendiri tidak dapat di representasikan dalam komputer, sehingga untuk dapat diproses maka citra analog harus dikonversi menjadi citra digital. Citra digital sendiri ialah sebuah larik (*array*) yang berisi nilai real maupun kompleks yang direpresentasikan dengan deretan bit tertentu. Sebuah citra dapat didefinisikan sebagai fungsi $f(x,y)$ berukuran M baris dan N kolom, dengan x dan y merupakan koordinat spasial, dan amplitudo f di titik koordinat (x,y) dengan nama intensitas atau tingkat keabuan dari citra pada titik tersebut. Apabila nilai x, y, serta nilai amplitudo f

secara keseluruhan berhingga (*finite*) serta bernilai diskrit maka dapat dikatakan bahwa citra tersebut merupakan citra digital. Pada **Gambar 2.7** menunjukkan koordinat pada citra digital.



Gambar 2.7 Koordinat pada citra digital (Nafi'iyah, 2015).

Citra digital merupakan sebuah representasi dari fungsi intensitas cahaya didalam bentuk diskrit pada bidang dua dimensi. Menurut presisi yang digunakan untuk menyatakan titik-titik koordinat pada domain spasial atau bidang dan untuk menyatakan nilai keabuan atau warna suatu citra, maka secara teoritis citra dapat dikelompokkan menjadi empat kelas citra, yaitu citra kontinu-kontinu, kontinu-diskrit, diskrit-kontinu, dan diskrit-diskrit. Di mana label pertama menyatakan presisi dari titik-titik koordinat pada bidang citra sedangkan label kedua menyatakan presisi nilai keabuan atau warna. Kontinu dinyatakan dengan presisi angka tidak berhingga, sedangkan diskrit dinyatakan dengan presisi angka berhingga (Septiaji dan Firdausy, 2018).

2.2.6.1 Jenis-jenis metode pengolahan citra

Pengolahan citra digital (*Digital Image Processing*) merupakan ilmu yang mempelajari tentang teknik-teknik dalam pengolahan citra. Citra merupakan gambar (foto) maupun vidio (yang berasal dari *webcam*). Sedangkan digital disini

mempunyai maksud bahwa pengolahan citra/gambar dilakukan secara digital menggunakan komputer. Secara matematis, citra bisa disebut fungsi *continue* dengan intensitas cahaya pada bidang dua dimensi. Sebelum diolah dengan komputer, suatu citra harus dipresentasikan secara numerik dengan nilai-nilai diskrit. Representasi dari fungsi *continue* menjadi nilai-nilai diskrit disebut digitalisasi citra. Pengolahan citra (*image processing*) merupakan proses pengolahan piksel-piksel dalam citra digital untuk suatu tujuan tertentu (Fauzi *et al.*, 2018).

Berikut merupakan jenis-jenis metode atau teknik pada pengolahan citra:

1. Konvolusi citra adalah tehnik untuk menghaluskan suatu citra atau memperjelas citra dengan menggantikan nilai piksel dengan sejumlah nilai piksel yang sesuai atau berdekatan dengan piksel aslinya. Tetapi dengan adanya konvolusi, ukuran dari citra tetap sama, tidak berubah. Konvolusi memiliki dua buah fungsi $f(x)$ dan $g(x)$ yang didefinisikan pada **Persamaan 2.1.**

$$h(x) = f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(a) \cdot g(x - a) da \quad (2.1)$$

yang dalam hal ini, tanda (*) menyatakan operator konvolusi dan perubah (*variable*) adalah perubah bantu. Untuk pengolahan citra, operasi yang dilakukan adalah diskrit karena nilai koordinat piksel merupakan nilai yang diskrit. Selanjutnya filter atau mask yang digunakan pada pengolahan citra biasanya berukuran terbatas, dalam artian bobot atau pengaruh dari titik-titik yang cukup jauh sudah tidak signifikan, sehingga dapat diabaikan (dianggap nol) (Gazali *et al.*, 2012).

2. Ekstraksi ciri merupakan metode pengambilan ciri yang didasarkan pada karakteristik histogram citra. Histogram menunjukkan probabilitas kemunculan nilai derajat keabuan piksel pada suatu citra. Dari nilai-nilai pada histogram yang dihasilkan, dapat dihitung beberapa parameter ciri, antara lain ialah *mean*, *variance*, *skewness*, *kurtosis*, dan *entropy* (Permadi dan Murinto, 2015).
3. *Thresholding* merupakan salah satu metode segmentasi citra yang memisahkan antara objek dengan *background* dalam suatu citra berdasarkan

pada perbedaan tingkat kecerahannya atau gelap terangnya. *Region* citra yang cenderung gelap akan dibuat semakin gelap (hitam sempurna dengan nilai intensitas sebesar 0), sedangkan *region* citra yang cenderung terang akan dibuat semakin terang (putih sempurna dengan nilai intensitas sebesar 1). Oleh karena itu, keluaran dari proses segmentasi dengan metode *thresholding* adalah berupa citra biner dengan nilai intensitas piksel sebesar 0 atau 1. Setelah citra sudah tersegmentasi atau sudah berhasil dipisahkan objeknya dengan *background*, maka citra biner yang diperoleh dapat dijadikan sebagai *masking* untuk melakukan proses *cropping* sehingga diperoleh tampilan citra asli tanpa *background* atau dengan *background* yang dapat diubah-ubah (Setiawan *et al.*, 2019).

4. Jaringan Syaraf Tiruan (JST) merupakan salah satu representasi buatan dari otak manusia yang selalu mencoba untuk mensimulasikan proses pembelajaran pada otak manusia tersebut. Istilah buatan digunakan karena jaringan syaraf ini diimplementasikan dengan menggunakan program komputer yang mampu menyelesaikan sejumlah proses perhitungan selama proses pembelajaran (Kusumaningtyas dan Asmara, 2016).

2.2.7 Fotoakustik

Efek fotoakustik merupakan pembentukan gelombang akustik sesudah penyerapan cahaya modulasi dalam sampel material. Untuk menghasilkan efek ini, intensitas cahaya harus bervariasi, baik secara berkala (cahaya yang dimodulasi) atau sebagai lampu kilat tunggal (cahaya berdenyut) (Sanjaya *et al.*, 2022). Efek fotoakustik sendiri ialah pembentukan gelombang suara akibat penyerapan cahaya termodulasi pada obyek. Pencitraan fotoakustik merupakan teknik pencitraan yang menggunakan efek fotoakustik, yaitu fenomena timbulnya sinyal akustik dari material yang terpapar energi elektromagnetik (EM) intermiten. Proses citra fotoakustik dapat dikelompokkan menjadi tiga tahap yaitu:

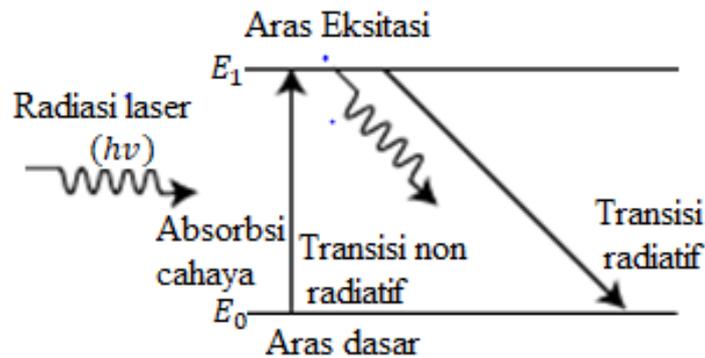
- a. Pemancaran cahaya sementara pada daerah spesifik dengan gelombang pendek dari cahaya laser. Sampel menyerap cahaya yang ditembakkan dari laser.

- b. Ekspansi termal sampel untuk daerah spesifik akibat dari pancaran laser membuat terciptanya sinyal akustik frekuensi tinggi.
- c. Perekaman pada sinyal akustik oleh transduser yang selanjutnya akan melakukan rekonstruksi gambar secara komputasi (Singh, 2020).

2.2.7.1 Peristiwa terbentuknya fotoakustik

Peristiwa efek fotoakustik akan terbentuk saat molekul sampel menyerap radiasi foton seperti tertera pada gambar 2.6, jadi molekul yang terjadi pada tingkat energi dasar E_0 (*ground state*) akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi E_1 (*excited state*). Akhirnya terbentuk perbedaan energi antara dua tingkat tersebut (ΔE) memakai $\Delta E = E_1 - E_0 = h\nu$, ν membentuk frekuensi radiasi foton yang diserap. Molekul tersebut secara cepat maupun lambat akan melepaskan energi dan kembali pada keadaan dasar yang stabil dengan membuang energi ΔE (proses *deeksitasi*) (Mitrayana *et al.*, 2017).

Efek dari fotoakustik akan terjadi akibat atom-atom maupun molekul-molekul langka mengalami deeksitasi radiatif dengan energi eksitasi dikirim kedalam bentuk energi translasi melalui proses tumbukan molekul satu dengan yang lain. Panas yang terjadi akibat tumbukan tersebut mengakibatkan kenaikan energi kinetic rata-rata, sehingga temperatur akan mengakibatkan kenaikan pada tekanan. Jika berkas radiasi yang datang pada sampel dimodulasi intensitasnya secara periodic pada frekuensi audio ν maka dapat memperoleh kenaikan dan penurunan tekanan secara periodik pula dan akan mengakibatkan bunyi pada frekuensi ν pula. Gelombang akustik yang akan terbentuk dapat dideteksi menggunakan mikrofon (Mitrayana *et al.*, 2017).



Gambar 2.8 Efek fotoakustik (Rosencwaig, 1980 dalam Setiawan *et al.*, 2005).

Pada saat berkas laser menumbuk permukaan maka intensitas yang diserap permukaan akan menurun secara eksponensial sebagai fungsi kedalaman z mengikuti persamaan *Lambert-Beer*

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.1)$$

dengan I_0 ialah intensitas awal dan α ialah koefisien absorpsi medium. Penyerapan cahaya pada permukaan akan menyebabkan ekspansi pada material. Hal ini akan menaikkan volume yang sebanding dengan peningkatan temperatur θ yang dapat dituliskan

$$\Delta v = \beta \theta v \quad (2.2)$$

dengan β ialah koefisien ekspansi termal dan v ialah volume awal terjadinya pemanasan. Ekspansi ini akan menimbulkan konsekuensi terjadinya stress yang dapat memicu munculnya tekanan dalam bentuk sinyal akustik. Tekanan yang mula-mula terjadi p_0 dapat dituliskan

$$p_0 = B \frac{\Delta v}{v} \quad (2.3)$$

dengan B adalah modulus *Bulk isothermal*. Dengan memakai persamaan (2.2) dan (2.3) maka fungsi antara tekanan dan temperatur dapat dituliskan dalam bentuk

$$p_0 = B \beta \theta \quad (2.4)$$

Sesuai dengan hukum termodinamika temperatur θ merupakan fungsi dari energi yang telah tersimpan pada medium dan berhubungan dengan kapasitas panas C dan massa jenis ρ dalam bentuk

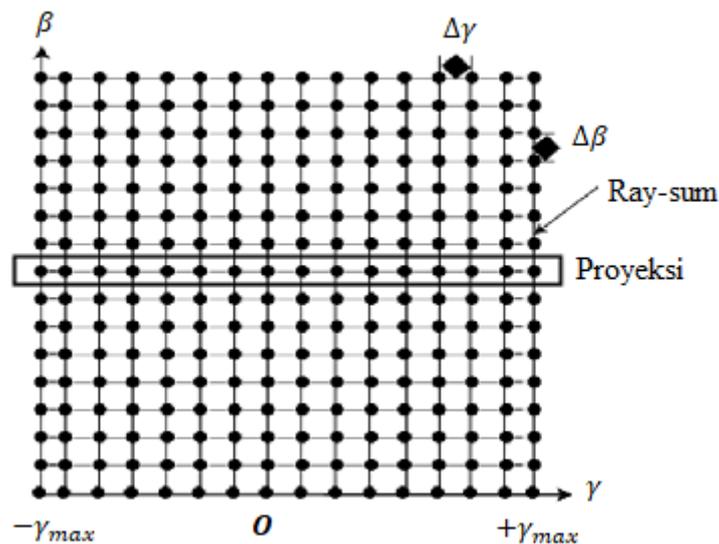
$$\theta = \frac{1}{\rho C} I(z) = \frac{1}{\rho C} I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.5)$$

Persamaan pada (2.4) dan (2.5) dapat dituliskan Kembali menjadi (2.6)

$$p_0 = \frac{B\beta}{\rho c} I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.6)$$

Pada persamaan (2.6) telah memberikan relasi antara tekanan pada suatu permukaan akibat terkena pulsa singkat cahaya laser. Dengan demikian karakteristik absorpsi cahaya dari sebuah medium akan dapat mempengaruhi besarnya tekanan akustik yang muncul, inilah yang menjadikan prinsip dasar dari fotoakustik (Sanjaya *et al.*, 2022).

Tomografi akustik dapat dibentuk dengan cara memperoleh data TOF (*Time of Flight*) lengkap dari berbagai arah. Sekumpulan data TOF tersebut dapat direkonstruksi sehingga didapatkan nilai kecepatan akustik yang merupakan nilai akustik pada masing-masing materi.



Gambar 2.9 Kisi sinogram data lengkap TOF.

Pemodelan sistem tomografi listrik-akustik ini dapat menghasilkan data TOF, satu data TOF merupakan *ray-sum* dan sekumpulan data TOF pada posisi sudut β disebut proyeksi. Posisi dari masing-masing data diletakan pada kisi dengan urutan tertentu yang dikenal dengan sinogram yang ditampilkan pada **Gambar 2.9**.

2.2.7.2 Perambatan Gelombang Fotoakustik

Pada awal perambatannya, material menyerap cahaya yang intens menggunakan durasi yang singkat ($\sim ns$), akan terjadi kenaikan tekanan pada awal daerah yang diterangi cahaya. Dengan kata lain, terbentuk gradien tekanan awal atau distribusi tekanan yang tidak seragam (yang mengukur gaya per satuan volume) yang diberikan oleh ∇P . Gaya yang mendapat dari variasi distribusi tekanan spasial $P_0(\vec{r}, t, T)$ ialah gaya gradien tekanan yang bergerak pada partikel/molekul pembentuknya dan ditunjukkan dari daerah bertekanan tinggi menuju daerah bertekanan lebih rendah agar dapat dinyatakan sebagai:

$$\vec{F}_{pg} = -\vec{\nabla}P \quad (2.7)$$

dengan \vec{F}_{pg} merupakan densitas gaya atau gaya per satuan volume. Dengan menyederhanakan secara matematis, dapat dihilangkan ketergantungan argumen terhadap ruang (\vec{r}), waktu, dan suhu (T).

Dengan mempertimbangkan gaya tekanan-gradien, sementara dapat mengabaikan gaya lain, kerapatan gaya total dalam sistem hidrostatis yang dipertimbangkan dapat ditulis sebagai $\vec{F}_{eff} = \vec{F}_{pg}$ atau $\vec{F}_{eff} = -\vec{\nabla}P$. Dari Hukum II Newton tentang gerak ($\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{eff}$), persamaan gerak partikel dengan massa densitas ρ dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho\vec{v})}{dt} &= -\vec{\nabla}P \\ \vec{v} \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{d\vec{v}}{dt} &= -\vec{\nabla}P \end{aligned} \quad (2.8)$$

dengan $\vec{p} = \rho\vec{v}$ adalah momentum densitas dalam sistem termodinamika hidrostatis sedangkan \vec{v} adalah kecepatan partikel penyusun (Wang dan Wu, 2007; Pramanik dan Wang, 2009). Bagian kirim pada Persamaan 2.10, suku ke-1 dan ke-2 mengatur aliran massa dan percepatan partikel penyusun, yang keduanya terinduksi oleh gradien tekanan ($\vec{\nabla}P$) setelah stimulasi sistem termodinamika dengan sinar optik pulsa pendek.

Dari kekekalan massa, persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai (Pramanik dan Wang, 2009):

$$\frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\vec{\nabla}P$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = -\vec{\nabla} P \quad (2.9)$$

dengan $\vec{j} = \rho \vec{v}$ adalah arus densitas arus massa yang juga dapat dianggap sebagai densitas momentum. Dari hipotesis kontinum (*continuum hypothesis*), dalam kaitannya dengan asumsi keseimbangan lokal (Dittman, 1997).

2.2.8 Deteksi retak

Material merupakan bahan-bahan mentah yang belum diolah dan belum dapat digunakan, banyak jenis-jenis bahan material seperti material logam yaitu baja, besi, titanium, material karet yaitu iospren, neopren, karet alam, meterial keramik yaitu alumina, karbida silikon, nitrida sillikon (Hartina, 2020). Material yang sering menjadi bahan kajian pada sebuah penelitian adalah plat baja yang biasanya digunakan untuk berbagai keperluan industri. Penurunan kualitas pada struktur material yang diakibatkan oleh perencanaan yang tidak memadai, estimasi yang salah, pengerjaan yang buruk, kondisi lingkungan dan kurangnya perawatan mempengaruhi daya tahan struktur material menyebabkan kerusakan pada struktur material. Kerusakan yang terjadi akan mempengaruhi pelayanan dan biaya pemeliharaan pada struktur material. Sehingga, struktur material tersebut perlu diperbaiki pada waktu struktur yang masih dini (Zaki *et al.*, 2018).

Analisa tingkat kerusakan sedini mungkin atas retakan yang terjadi pada struktur material bisa mengurangi dampak yang lebih besar dan dapat mengefesienkan biaya perbaikan pada struktur material tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode pengujian tanpa merusak (*non-destructive testing (NDT) method*) pada struktur material tersebut, yaitu: teknik inspeksi visual (*visual inspection technique*) (Zaki *et al.*, 2018). Metode pengujian tanpa merusak atau *non-destructive testing (NDT)* adalah sebuah metode deteksi dan inspeksi objektif pada struktur material yang mengalami kerusakan secara umum, yaitu di antaranya: teknik inspeksi visual (*visual inspection*), *half-cell potential (HCP)*, *ultrasonic pulse velocity (UPV)*, *ground penetrating radar (GPR)*, *acoustic emission (AE)*, *infrared thermography (IRT)*, *rebound hammer* dan lain-lain. Inspeksi visual (*visual inspection*) adalah salah satu metode NDT yang digunakan

secara luas untuk menilai retakan dan kerusakan yang terjadi pada permukaan struktur material.

Keretakan pada material ada yang bisa dilihat oleh mata secara langsung dan ada pula yang tidak bisa dilihat dengan mata telanjang. Keretakan material sendiri terjadi akibat pengolahan bahan material yang tidak benar, sehingga menghasilkan kualitas yang tidak baik. (Hartina, 2020). Salah satu solusi yang bisa dilakukan untuk memperbaiki masalah agar dapat mengetahui keretakan pada material agar tidak terjadinya kerusakan adalah dengan membuat sebuah alat pendeteksi agar menghasilkan sebuah informasi dalam bentuk citra untuk melihat suatu keretakan material yang lebih jelas dan akurat. Retakan sendiri merupakan kerusakan pada struktur yang memerlukan perbaikan atau pergantian (Zaki *et al.*, 2018).

Dilihat dari tempatnya, retak dibedakan menjadi 3 keretakan, yaitu:

a. Retak pada Permukaan Atas

Jenis kerusakan ini terlihat langsung oleh pandangan mata atau *visual check* setelah dilakukan uji penetrant. kerusakan permukaan terdiri *crater crack* atau *crow feet* (retak kawah), *surface crack* (retak permukaan), *longitudinal/transversal crack*.

b. Retak pada Permukaan Bawah

Jenis kerusakan seperti ini tidak tampak oleh pandangan mata (*visual check*), dikarenakan biasanya terjadi pada langkah awal (*root weld*) atau merupakan tembusan, maka pengidentifikasiannya menggunakan uji ultrasonik atau radiografi. Jenis keretakan yang sering muncul adalah *root crack*.

c. Retak pada Internal

Keretakan pada internal terjadi berupa keretakan bagian hasil itu sendiri dan bisa juga keretakan yang terjadi pada bagian sisi material. Cara pengidentifikasiannya yang digunakan adalah *Ultrasonic (UT)*. Adapun jenis keretakannya adalah internal (*longitudinal crack, transversal crack*), dan *under bead crack* (Arista dan Prasetyo, 2018).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2022 – Januari 2023. Tempat dilaksanakannya penelitian, Perancangan dan pembuatan alat serta pengambilan data dilakukan di ruang Workshop, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Dalam pembuatan fotoakustik tomografi terdapat suatu alat dan bahan yang akan digunakan untuk mendukung berjalannya pembuatan perangkat, yakni sebagai berikut.

3.2.1 Alat

Alat yang akan digunakan untuk pembuatan tomografi fotoakustik meliputi perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*). Alat yang digunakan untuk pembuatan fotoakustik tomografi ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1. Alat yang digunakan

No.	Nama alat	Fungsi
1.	Motor Stepper	Sebagai alat penggerak pada <i>XY stage</i>
2.	Laser Dioda Merah 150 mW dengan Panjang gelombang 653 nm	Sebagai alat untuk menghasilkan akustik pada sampel.
3.	Behringer ECM8000 Mic Condenser	Sebagai alat perekam untuk menghasilkan puncak akustik pada sampel.
4.	Behringer UMC202HD	Sebagai alat penguat puncak akustik dari mikrofon.
5.	PC/Laptop	Digunakan untuk mengolah pemrograman dan pembuatan laporan penelitian.
6.	<i>Driver</i> TB6560	Digunakan sebagai penghubung antara arduino uno dengan motor <i>stepper</i> .
7.	Lab VIEW	Sebagai program untuk mengatur <i>XY stage</i> , modulasi laser, perekaman puncak akustik, dan konversi puncak akustik menjadi citra.
8.	Gerinda	Sebagai bahan yang digunakan untuk memotong serta membuat kerusakan berupa garis pada sampel.
9.	Jangka sorong	Digunakan sebagai alat dalam mengukur ketebalan, luas, dan kedalaman kerusakan pada sampel lubang.

3.2.2. Bahan

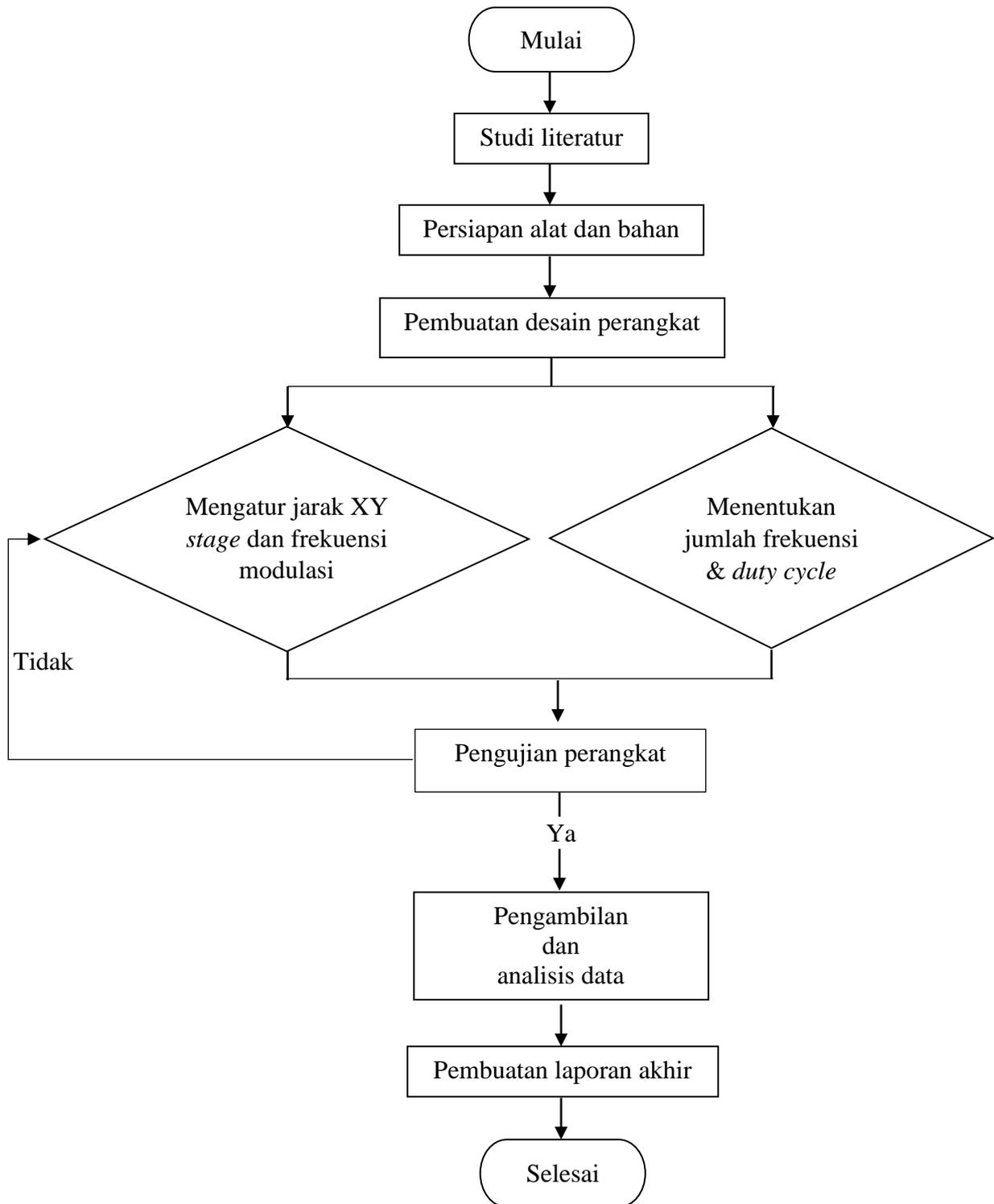
Bahan yang akan digunakan untuk pembuatan tomografi fotoakustik adalah perangkat keras (*hardware*). Bahan yang digunakan untuk pembuatan fotoakustik tomografi ditunjukkan pada **Tabel 3.2.**

Tabel 3.2. Bahan yang digunakan

No.	Nama bahan	Fungsi
1.	Arduino Uno	Sebagai tempat proses <i>XY stage</i> dan modulasi laser diode.
2.	Kabel jumper	Digunakan sabagai kabel penghubung antar rangkaian alat penelitian.
3.	Sampel	Sebagai bahan uji pencitraan fotoakustik.
4.	Akrilik	Digunakan sebagai alas pada perangkaian alat.
5.	USB	Berfungsi untuk menyambungkan antara arduino dengan PC.
6.	X, Y <i>Stage</i>	Berfungsi sebagai perantara penggerak meja sampel
7.	Lensa	Digunakan sebagai penerusan sinar laser menuju sampel pada penelitian.
8.	Bor	Sebagai bahan yang digunakan untuk membuat sampel kerusakan berupa lubang.

3.3 Prosedur Penelitian

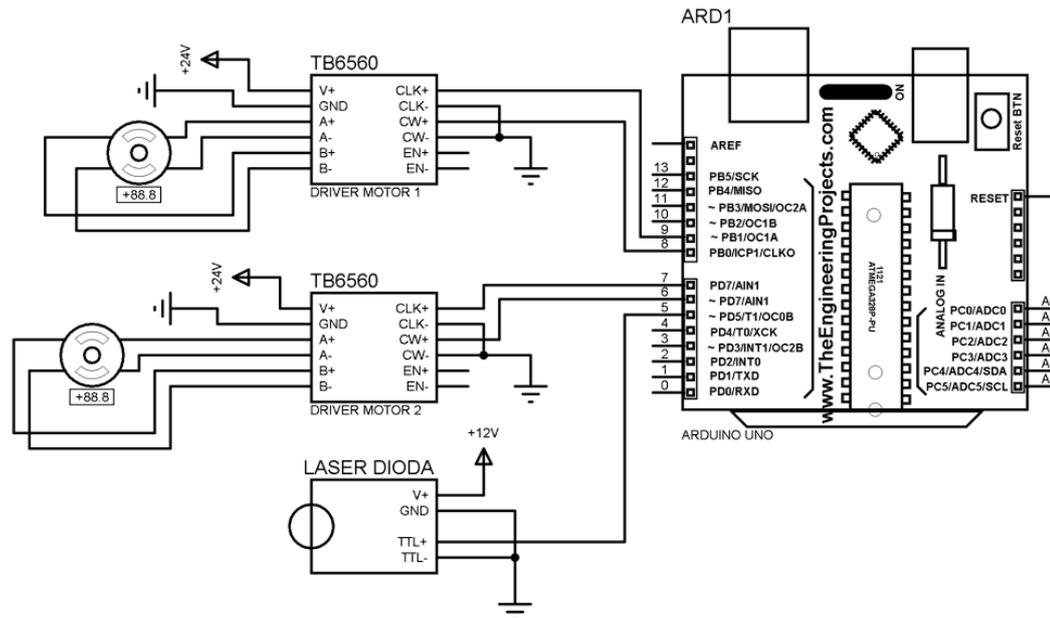
Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang dilakukan yaitu perancangan perangkat, pengujian kerja alat, dan pengambilan data. Sedangkan langkah-langkah yang akan dilakukan pada pembuatan fotoakustik tomografi ini ditunjukkan dalam diagram alir penelitian seperti pada **Gambar 3.1.**



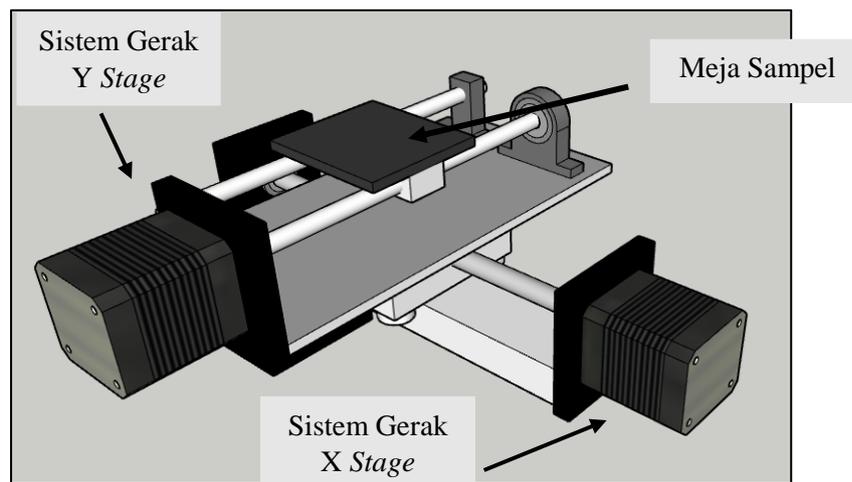
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.3.1 Perancangan Sistem XY Stage dan Modulasi Laser

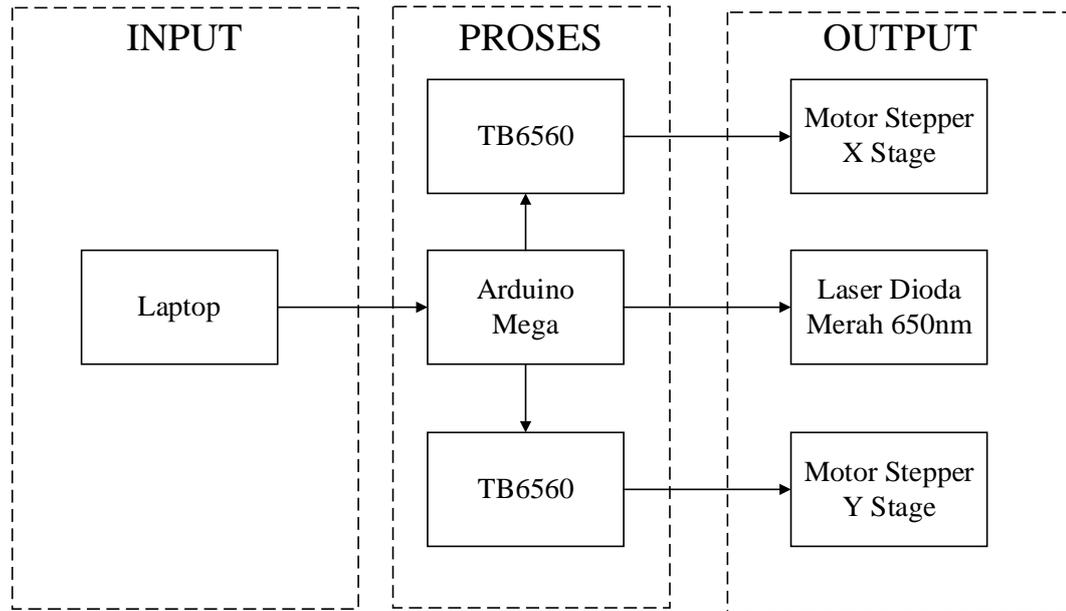
Sistem gerak XY *stage* ialah sistem yang berfungsi untuk menggerakkan meja sampel secara linear dengan gerakan secara horizontal (sumbu x) dan vertikal (sumbu y). Skema rancang bentuk sistem gerak XY *stage*, skema rangkaian, dan diagram blok ditunjukkan pada **Gambar 3.2**, **Gambar 3.3**, dan **Gambar 3.4**.



Gambar 3.2. Skema rangkaian sistem XY *stage* dan modulasi laser



Gambar 3.3. Desain sistem XY *Stage*.



Gambar 3.4. Diagram blok sistem XY *stage* dan modulasi laser.

Komponen-komponen dari perancangan sistem tahap XY *stage* yaitu motor *stepper*, driver TB 6560, arduino uno, laser dioda merah dan laptop.

- a. Pc/laptop sebagai tempat untuk menginput jumlah titik X dan Y, jarak antara titik, frekuensi laser dan *duty cycle* laser. Kemudian nilai input dari laptop diproses pada arduino.
- b. Arduino uno
 Arduino uno digunakan untuk memproses perintah dari laptop untuk mengatur pergerakan motor *stepper* pada sumbu x dan y. Selain itu, arduino uno dapat mengatur frekuensi dan *duty cycle* yang dihasilkan oleh laser.
- c. *Driver* TB6560
 Driver TB6560 berfungsi sebagai penghubung antara Arduino uno dan motor *stepper*. Dengan menggunakan driver TB6560 sebagai pengatur jumlah langkah yang diperlukan motor *stepper* untuk bergerak satu putaran penuh. TB6560 memiliki 4 mode *stepping*, yaitu *full step*, *half step*, $\frac{1}{8}$ *step* dan $\frac{1}{16}$ *step*. Dalam mode langkah penuh, jumlah langkah yang diperlukan untuk satu putaran penuh motor *stepper* nema 17 adalah 200 langkah. Ini karena bergerak 1 langkah menghasilkan sudut 1,8 derajat. Penelitian ini menggunakan mode $\frac{1}{8}$ langkah yaitu 1600 langkah mendapat putaran penuh atau 1 langkah sama

dengan 0,225 derajat. Penggunaan langkah $\frac{1}{8}$ untuk meningkatkan akurasi dan presisi gerakan sistem tahap xy.

d. *Motor Stepper*

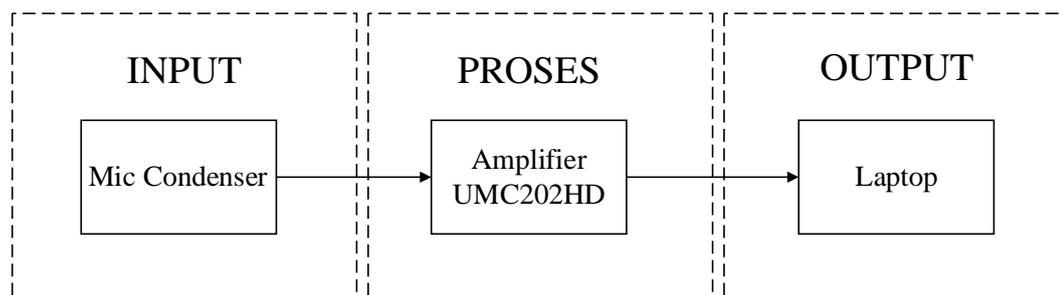
Pada perancangan sistem gerak tahap XY ini terdapat 2 buah motor *stepper*. Motor *stepper* bawah bergerak pada koordinat x (horizontal), sedangkan motor *stepper* atas bergerak pada koordinat y (vertikal). Dua motor *stepper* dihubungkan dengan batang yang berulir dan *bearing holder* dipasang diujung batang berulir. Peran Batang berulir dan *bearing holder* adalah untuk mengubah gerakan rotasi yang dihasilkan oleh motor *stepper* menjadi gerakan translasi pada meja sampel.

e. Laser Dioda

Laser dioda digunakan sebagai sumber cahaya untuk menghasilkan efek fotoakustik. Posisi laser ditempatkan tepat di atas meja sampel sejauh 10 cm dengan arah tembakan laser ke meja sampel. Dalam sistem ini, yang digerakan hanya meja sampel sedangkan untuk laser dioda secara statis.

3.3.2 Perancangan Sistem Perekaman Puncak Akustik

Pada tahap ini dilakukan perancangan sistem perekaman puncak akustik yang akan dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram blok **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5. Diagram blok sistem.

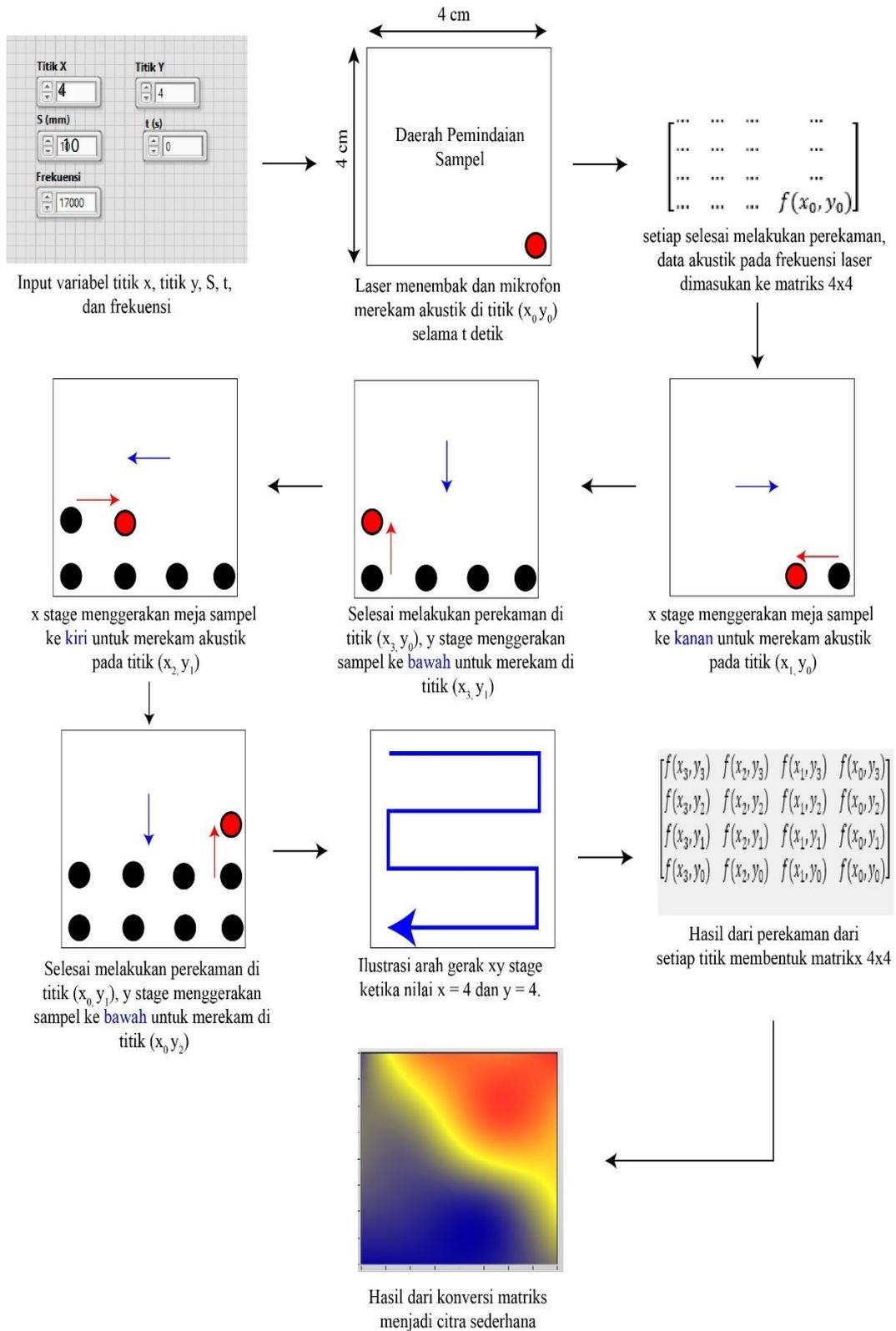
Bagian-bagian dari perancangan sistem perekaman puncak akustik meliputi *mic condenser*, amplifier UMC202HD, dan laptop. *Mic condenser* sendiri bertindak sebagai input untuk merekam akustik yang akan dihasilkan oleh sampel saat

ditembak laser yang termodulasi. Sebelum data akustik yang terekam oleh *mic condenser* dikirimkan ke laptop, data akustik akan melalui proses penguatan pada amplifier UMC202HD. Data akustik lalu diolah pada laptop untuk mendapatkan nilai puncak akustik yang sesuai dengan frekuensi laser.

3.3.3 Perancangan Citra Fotoakustik dalam Pengambilan Data

Langkah-langkah dalam pengambilan data citra fotoakustik ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.

- a. Penginputan nilai pada variabel jumlah pada titik x , jumlah titik y , S (jarak antar titik), F_1 (frekuensi laser yang termodulasi), dan t (waktu rekam mikrofon setiap titik). Variabel jumlah titik x dan jumlah titik y berfungsi untuk memetakan sampel ke dalam matriks dengan x sebagai kolom dan y sebagai baris. Variabel S diaplikasikan untuk mengendalikan jarak antara titik x_0 ke titik $x_0 + 1$ dan jarak antara titik y_0 ke titik $y_0 + 1$. Variabel t diaplikasikan untuk mengendalikan waktu rekam mikrofon kondenser pada titik (x_0, y_0) .
- b. Kemudian laser yang termodulasi menembak ke sampel di titik (x_0, y_0) dan mikrofon kondenser merekam akustik yang diciptakan akibat modulasi laser pada titik (x_0, y_0) selama t detik.
- c. Sesudah t detik, sistem gerak untuk koordinat x menggerakkan meja sampel ke kanan sejauh S untuk menjalankan pengambilan data akustik pada titik berikutnya merupakan titik (x_1, y_0) . Laser yang termodulasi menembak ke sampel di titik (x_1, y_0) dan mikrofon kondenser akan merekam akustik yang diciptakan selama t detik.
- d. Langkah b dan c akan diulangi hingga sistem gerak untuk koordinat x berada pada titik x_n ($x_n = \text{jumlah titik } x - 1$). Sehingga diperoleh data akustik untuk baris pertama.



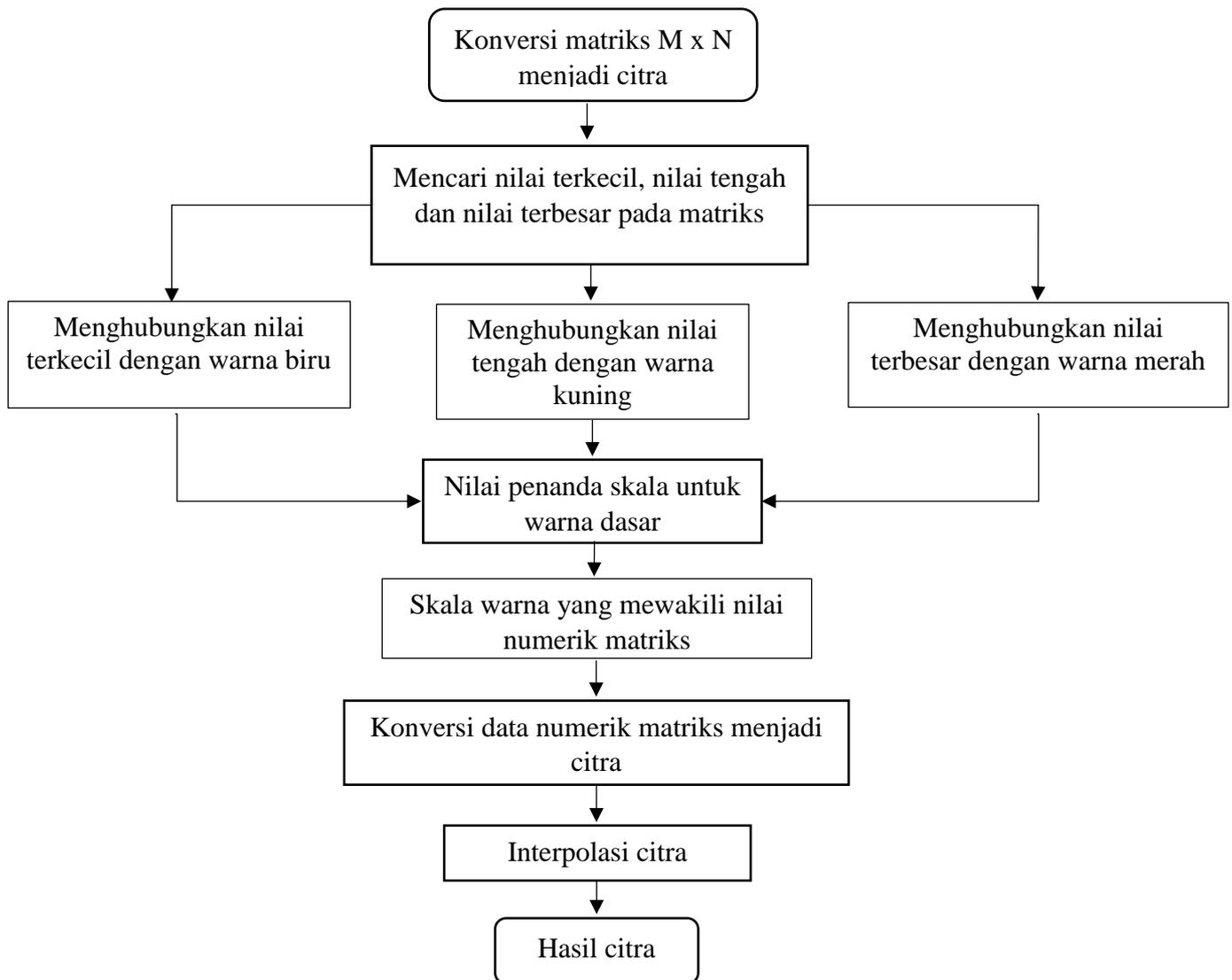
Gambar 3.6. Ilustrasi dari *output* yang dihasilkan perangkat lunak.

- e. Berikutnya sistem gerak untuk koordinat y menggerakkan meja sampel ke bawah untuk pengambilan data akustik pada titik (x_n, y_1) . Laser yang termodulasi menembak ke sampel di titik (x_n, y_1) dan mikrofon kondenser akan merekam akustik yang diciptakan selama t detik.
- f. Sesudah t detik, sistem gerak untuk koordinat x menggerakkan meja sampel ke kiri sejauh S untuk menjalankan pengambilan data akustik pada titik (x_{n-1}, y_1) . Laser yang termodulasi menembak ke sampel di titik (x_{n-1}, y_1) dan mikrofon kondenser akan merekam akustik yang diciptakan selama t detik.
- g. Langkah f akan diulangi terus hingga sistem gerak untuk koordinat x berada pada titik x_0 . Sehingga diperoleh data akustik untuk baris kedua.
- h. Cara gerak pada koordinat y kembali bergerak ke atas sejauh S untuk pengambilan data akustik di titik (x_0, y_2) .
- i. Langkah b hingga h akan diulangi hingga sistem gerak pada koordinat x dan y berada pada titik (x_n, y_n) dengan titik $y_n = \text{jumlah titik } y - 1$. Sehingga diperoleh data akustik yang menyusun matriks $M \times N$.
- j. Data akustik yang sudah membentuk matriks $M \times N$, akan diproses dalam kelas konversi matriks menjadi citra. Sehingga diperoleh hasil akhir berupa citra sederhana.

3.3.4 Kelas Konversi Matriks Menjadi Citra

Diagram alir untuk kelas konversi matriks menjadi citra dapat dilihat pada **Gambar**

3.7.

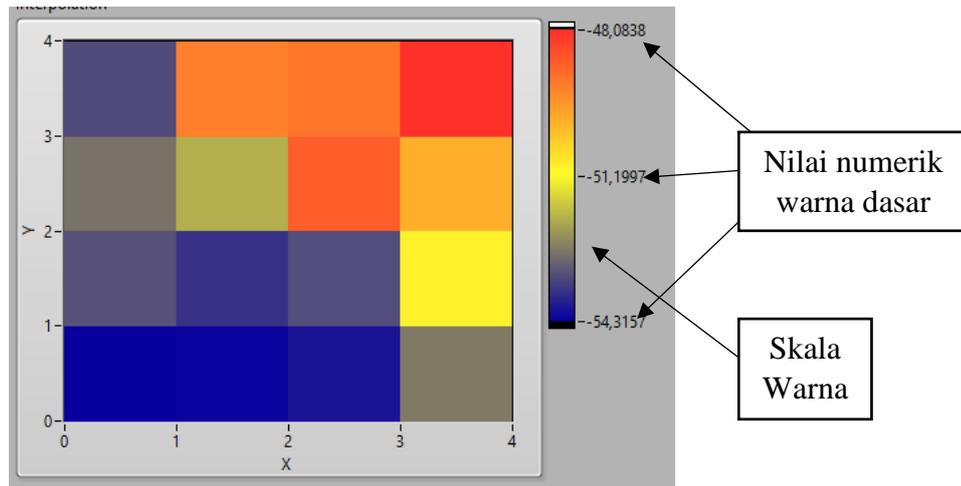


Gambar 3.7 Diagram alir kelas konversi matriks menjadi citra.

Penjelasan diagram alir kelas konversi matriks menjadi citra adalah sebagai berikut.

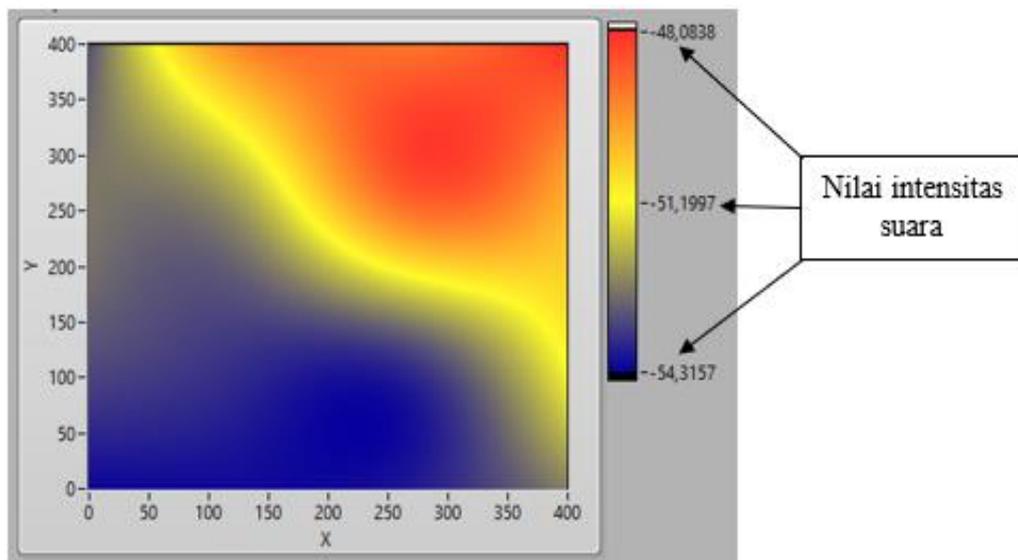
- Nilai terbesar, skor tengah, dan terkecil akan didapat dari data akustik yang telah tersusun. Skor tengah dapat dicari dengan memakai *Nilai Tengah* = $\frac{(\text{nilai besar} - \text{nilai kecil})}{2}$. Ketiga skor ini akan digunakan sebagai penanda skala.
- Nilai dari masing – masing akan dikaitkan dengan variabel warna. Nilai terbesar dikaitkan dengan warna merah. Nilai tengah dikaitkan dengan warna kuning. Nilai terkecil dikaitkan dengan warna biru.

- c. Hubungan antara nilai dengan warna menghasilkan skala warna merah ke warna biru dengan basis penanda skala dari nilai terbesar ke nilai terkecil dari data akustik.
- d. Semua nilai numerik data akustik diubah menjadi citra dengan menggunakan skala warna merah ke warna biru.



Gambar 3.8 Konversi data akustik menjadi citra tanpa interpolasi

- e. Citra dari data numerik akan diperhalus dengan membanyak piksel pada citra menggunakan interpolasi *bilinear*. Hasil akhir dari citra setelah dilakukan interpolasi dapat dilihat pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9 Hasil citra yang telah di interpolasi.

3.4 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dibagi menjadi empat bagian yaitu kalibrasi sistem gerak XY *stage*, karakterisasi mikrofon sistem perekaman puncak akustik, karakterisasi modulasi laser, dan pengujian keseluruhan sistem menggunakan sampel.

3.4.1 Kalibrasi Sistem Gerak XY *Stage*

Kalibrasi sistem gerak XY *stage* dilakukan dengan membandingkan nilai *input* di labview dalam satuan *step* dengan hasil pengukuran jarak tempuh *output* pada *ball screw* menggunakan *dial micrometer* dalam satuan mm. Penambahan nilai Data kalibrasi digunakan untuk mengubah satuan *step* pada *input* di labview menjadi satuan mm. Data kalibrasi sistem gerak XY *stage* akan disajikan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3. Rancangan tabel data kalibrasi sistem gerak XY *stage*

No.	<i>Input</i> Jarak (mm)	Hasil Pengukuran <i>Output</i> (mm)		
		1	2	3
1.				
2.				
3.				

3.4.2 Karakterisasi Mikrofon

Karakterisasi mikrofon dilakukan dengan menggunakan aplikasi frekuensi generator pada *smartphone*. Aplikasi ini berfungsi sebagai kalibrator yang menghasilkan sumber suara dengan frekuensi yang dapat diatur. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan program deteksi puncak akustik pada labview. Frekuensi pada aplikasi diatur 1000 Hz dan *smartphone* didekatkan pada mikrofon. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan frekuensi dari 1000 Hz dan 20000 Hz dengan penambahan nilai frekuensi 1000 Hz tiap pengujian (Hanif *et al.*, 2022). Data karakterisasi mikrofon akan disajikan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4. Rancangan tabel data karakterisasi mikrofon

No.	Frekuensi Generator (Hz)	Frekuensi Terekam (Hz)		
		1	2	3
1.				
2.				
3.				

3.4.3 Karakterisasi Modulasi Laser

Karakterisasi modulasi laser dilakukan untuk menentukan nilai frekuensi dan *duty cycle* yang optimal terhadap sampel. Frekuensi dan *duty cycle* yang optimal bertujuan untuk menghasilkan objek yang dicitrakan dengan kualitas yang baik. Variasi nilai frekuensi dari 16000 Hz – 16050 Hz dengan kenaikan frekuensi 10 Hz tiap pengujian. *Duty cycle* divariasikan dari 10% – 90% dengan kenaikan *duty cycle* 10% tiap pengujian. Kombinasi frekuensi dan *duty cycle* yang menghasilkan puncak akustik tinggi akan digunakan pada pengambilan citra sampel. Data karakterisasi frekuensi dan *duty cycle* akan disajikan pada **Tabel 3.5.** dan **Tabel 3.6.**

Tabel 3.5. Rancangan tabel hubungan frekuensi laser dengan intensitas suara

No.	Frekuensi Laser (Hz)	Intensitas Suara (dB)
1.		
2.		
3.		

Tabel 3.6. Rancangan tabel hubungan *duty cycle* laser dengan intensitas suara

No.	<i>Duty Cycle</i> (%)	Intensitas Suara (dB)
1.		
2.		
3.		

3.4.4 Pengujian Keseluruhan Sistem Menggunakan Sampel

Sampel yang telah diberi kerusakan berupa bulatan lubang buatan diletakan pada meja sampel XY *stage*. Kemudian dilakukan pemindaian dengan cara modulasi sampel menggunakan laser dioda dengan frekuensi modulasi dan *duty cycle* optimal yang diperoleh dari data variasi frekuensi modulasi dan *duty cycle*. Data yang diperoleh dari pemindaian sampel akan disajikan pada **Tabel 3.7.**

Tabel 3.7. Rancangan tabel hasil pemindaian sampel

No.	Waktu Pengujian (jam)	Luasan (cm)	Kedalaman lubang (mm)	Hasil Citra
1.				
2.				
3.				

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

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

1. Alat *surface crack detector* pada penelitian ini telah mampu mendeteksi kerusakan besi baja pada sampel kerusakan lubang dan kerusakan garis.
2. Sistem citra fotoakustik sebagai pendeteksi kerusakan pada permukaan besi baja menggunakan laser dioda serta mikrofon kondenser berjalan dengan baik dengan dibuktikan sistem kendali penggerak *XY stage* dan modulasi laser dapat digunakan untuk menguji sampel kerusakan lubang dan kerusakan garis.
3. Pada sistem citra penelitian ini telah didapat hasil untuk frekuensi tertinggi dengan nilai 16011 Hz dan *duty cycle* terbaik pada 60% dengan hasil data untuk proses *scanning* rata-rata pada rentang 18 menit dengan area luasan 14×14 mm telah mampu membedakan antara area kerusakan dengan area normal.

5.2 Saran

Saran pada penelitian selanjutnya yang dapat diterapkan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Dilakukan penambahan pengujian dengan variasi panjang gelombang laser dan variasi daya laser guna memperluas pemahaman terhadap kemampuan alat dalam mendeteksi kerusakan pada permukaan besi baja.

2. Dilakukan penambahan program yang memungkinkan pengaturan *thresholding* warna citra agar daerah normal dan daerah kerusakan dapat diidentifikasi dengan menggunakan satu warna yang mewakili masing-masing daerah tersebut.
3. Perubahan dilakukan pada perangkat lunak yang digunakan dalam sistem kendali, dari labVIEW ke python, karena python merupakan perangkat lunak dengan sifat *open source* yang memungkinkan *fleksibilitas* dan *aksesibilitas* yang lebih baik dalam pengembangan dan modifikasi sistem kendali.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, R. P. 2017. Analisis Daya Pada Panel Surya Menggunakan Motor Stepper Sebagai Penggerak Panel Surya Dengan Mengikuti Sinar Matahari. In *Digital Repository Universitas Jember*. Universitas Jember.
- Arfandi, A. dan Supit, Y. 2019. Prototipe Sistem Otomasi Pada Pengisian Depot Air Minum Isi Ulang Berbasis Arduino Uno. *Simtek : jurnal sistem informasi dan teknik komputer*. Vol. 4. No. 1. Hal. 91–99.
- Arif, D. T. dan Aswardi, A. 2020. Kendali Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah Berbeban Berbasis Arduino, *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, Vol. 6. No. 2. Hal. 33.
- Arista, A., dan Prasetyo, R. 2018. Identifikasi Faktor Penyebab Keretakan Pada Platform Module (H-Beam) Menggunakan Metode NDT (*Non Destructive Test*) Di Pt Multi Gunung Mas Batam. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*. Vol. 4. No. 1. Hal. 40-49.
- Astuti, P. dan Masdi, H. 2022. Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*. Vol. 3. No.1. Hal. 120-135.
- Darmanto. 2006. Pengaruh Holding Time Terhadap Sifat Kekerasan Dengan Refining The Core Pada Proses Carburizing Material Baja Karbon Rendah. *Jurnal Traksi*. Vol. 4. No. 2. Hal. 91–99.
- Dittman, R. H. 1997. *Heat and thermodynamics*. New York: McGraw-Hill.
- Fauzi, J. F., Tolle, H., dan Dewi, R. K. 2018. Implementasi Metode RGB To HSV Pada Aplikasi Pengenalan Mata Uang Kertas Berbasis Android Untuk Tuna Netra. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*. Vol. 2. No. 6. Hal. 2319–2325.
- Favro, L. D., Kuo, P. K., Pouch, J.J., Thomas, R.L., Melander, N., dan Henningsen, J. 1980. A Photoacoustic Study of Absorption. *Applied Physics Letters*, Vol. 36. No. 12. Hal: 45–60.

- Febrianti, A., Hamdi, M., dan Juandi, M. 2020. Analisis Sinyal Untrasonic Non-Destructive Testing Untuk Deteksi Cacat Pada Material Berbasis Metode Komputasi Simulink Matlab Mathematica. *Jurnal Ilmiah Edu Sains*. Vol. 3. No. 2. Hal. 51-62.
- Ganguly, P., Rao, C.N.R., 1981. Photoacoustic Spectroscopy of Solids and Surface. *Journal of Chemical Sciences*, Vol. 90. No. 3. Hal: 153–214.
- Gazali, W., Soeparno, H., dan Ohliati, J. 2012. Penerapan Metode Konvolusi Dalam Pengolahan Citra Digital. *Jurnal Mat Stat*. Vol. 12. No. 2. Hal. 103-113.
- Halliday., dan Resnick. 1991. *Fisika. Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Halliday., dan Resnick. 2000. *Fisika Jilid 2 Edisi Ketiga*. Jakarta: Erlangga.
- Handayani, S. L. 2014. Analisis Pola Interferensi Celah Banyak Untuk Menentukan Panjang Gelombang Laser He-Ne dan Laser Dioda. *Jurnal Fisika* Vol. 4. No. 1. Hal. 26-31.
- Hanif, L. N., Satriawan, M., dan Mitrayana. 2022. The Characterization of a Photoacoustic Tomography Imaging System and Its Application To Distinguish Healthy Liver and Worm-Infected Liver. *International Conference on Science and Applied Science (ICSAS)*. Gajah Mada University, Yogyakarta, Indonesia.
- Hartina, L. S. 2020. Deteksi Tepi Citra Termografi Untuk Pendeteksian Keretakan Material Menggunakan Metode Sobel. *Jurnal Pelita Informatika*. Vol. 8. No. 3. Hal. 378-381.
- Hecht, E. 1987. *Optics, 2nd Ed*, Addison Wesley.
- Irwansyah. 2019. Deteksi Cacat Pada Material Dengan Teknik Pengujian Tidak Merusak. *LENSA*. Vol. 2. No. 48. Hal. 07-13.
- Irsyam, M. 2019. Perancangan Alat Pendeteksi Kelayakan Oli Pada Kendaraan Sepeda Motor Berbasis Arduino Uno Atmega328. *Sigma Teknika*. Vol. 2. No. 2. Hal. 179.
- Komarudin, A., Singgih, H., dan Luqman, M. 2018. Kajian Penerapan Sensor Mic-Condenser Dalam Rancang Bangun Sound Level Meter Digital. *Jurnal ELTEK*. Vol. 16. No. 1. Hal. 86-97.
- Kusumaningtyas, S., dan Asmara, R. A. 2016. Identifikasi Kematangan Buah Tomat Berdasarkan Warna Menggunakan Metode Jaringan Syaraf Tiruan (JST). *Jurnal Infirmatika Polinema*. Vol. 2. No. 2. Hal. 72-75.

- Matua, G., dan Mitrayana. 2017. Penerapan Sistem Kendali XY-Stage dan Modulasi Laser Pada Tomografi Fotoakustik Menggunakan Arduino. *IJEIS*. Hal. 149-160.
- Minarni., Saktiono., dan Lestari, G. 2013. Pengukuran Panjang Gelombang Cahaya Laser Dioda Menggunakan Kisi Difraksi Refleksi dan Transmisi. Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung. Hal. 167-171.
- Mitrayana., dan Satriawan, M. 2020. Photoacoustic Research Development in Industrial Era 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1491. No. 1. Hal. 0–9.
- Nafi'iyah, N. 2015. Algoritma Kohonen Dalam Mengubah Citra Graylevel Menjadi Citra Biner. *Jurnal Imiah Teknologi dan Informasia ASIA*. Vol. 9. No. 2. Hal. 49-55.
- Nurjannah, I. dan Mitrayana. 2022. Photoacoustic Tomography Imaging System Based on Laser Diode to Distinguish Biological Tissue and Image Enhancement with Application of Foodstuff Contrast Agent. *International Conference on Science and Applied Science (ICSAS)*. Gajah Mada University, Yogyakarta, Indonesia.
- Permadi, Y., dan Murinto. 2015. Aplikasi Pengolahan Citra Untuk Identifikasi Kematangan Mentimun Berdasarkan Tekstur Kulit Buah Menggunakan Metode Ekstraksi Ciri Statistik. *Jurnal Informatika*. Vol. 9. No. 1. Hal. 1028-1038.
- Petropoulos, G., Kechagias, J., Iakovakis, V., dan Maropoulos, S. 2009. *Surface Roughness Investigation Of A Reinforced Polymer Composite*. Vol. 10. No. 3. Hal. 26–27.
- Pikatan, S. 1991. *Laser*. Seminar Intern FT.Surabaya.
- Prawira, W. P., Muningsgar, J., Rai, M., dan Santi, S. 2015. Alat Perekam Aktivitas Jantung dengan Mic Kondensor dan PC-Link USB Smart I/O. *Jurnal Radiasi*. Vol. 06. No. 1. Hal. 136–140.
- Pramanik, M. dan L. V. Wang. 2009. Thermoacoustic and photoacoustic sensing of temperature. *Journal of Biomedical Optics*. Vol. 14. No. 5. Hal. 054024.
- Putra, S. P. dan Zulwisli. 2019. Inverter Pwm Untuk Menggerakkan Mesin Arus Searah Tanpa Sikat Berbasis Arduino. *Jurnal Vokasional Teknik Elektronika dan Informatika*. Vol. 7. No. 4. Hal. 68-75.
- Sanjaya, E. R., Muningsgar, J., dan Setiawan, A. 2022. Uji Coba Metode Pencitraan Multimodalitas Ultrasonografi dan Fotoakustik. *Jurnal fisika*. Vol. 7. No. 1. Hal. 8-14.

- Septiaji, Dwi, K., dan Firdausy, K. 2018. “Deteksi Kematangan Daun Selada (*Lactuca Sativa L*) Berbasis Android Menggunakan Nilai RGB Citra.” *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*. Vol. 4. No. 1. Hal. 20–27.
- Setiawan, A. 2016. Sistem Pencitraan Fotoakustik Sel Terbuka Berbasis Dioda Laser dan Mikrofon Komersial. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, UGM, Yogyakarta.
- Setiawan, A., Suparta, G. B., Mitrayana., dan Nugroho, W. 2018. Surface crack detection with low-cost photoacoustic imaging system. *International Journal of Technology*. Vol. 9. No. 1. Hal. 159–169.
- Setiawan, I., Dewanta, W., Nugroho, H. A., dan Supriyono, H. 2019. Pengolahan Citra Dengan Metode Tresholding Dengan Matlab R2014A. *Jurnal Media Infotama*. Vol. 15. No. 2. Hal. 65-70.
- Silaban, F. A., Budiyanto, S., dan Raharja, W. K. 2020. Stepper motor movement design based on FPGA. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 10. No. 1. Hal. 151–159.
- Singh, M. K. A. 2020. *LED-Based Photoacoustic Imaging*. 7 ed. Sydney: Springer.
- Soedjarwanto, N., Forda, G., dan Nugroho, R. A. 2021. *Prototipe Smart door lock Menggunakan Motor Stepper Berbasis IoT (Internet of Things)*. *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*. Vol. 15. No. 2. Hal. 73-82.
- Suherman, W. 2003. *Ilmu Logam*.
- Surdia, T., dan Met, M. S. 2006. Perbaikan Sifat Mekanis Besi Cor Kelabu Lewat Penambahan Unsur Cr Dan Cu. *In Rotasi*. Vol. 8. Issue 3.
- Syahrul. 2011. Motor Stepper: Teknologi, Metoda dan Rangkaian Kontrol. *Jurnal Ilmiah Unikom*. Vol. 6. No. 2. Hal. 189–201.
- Tanzila, R. A. 2014. Pengaruh *Low Level Laser Therapy* (LLLTT) Terhadap C-Reactive Protein (CRP), Hitung Jenis dan Jumlah Leukosit pada Proses Pemulihan setelah Latihan Interval Intensitas Tinggi. *Syifa’MEDIKA*. Vol. 4. No.2. Hal. 109-119.
- Wang, G. 2004. *Low Level Laser Therapy*. Technology Assessment.
- Wang, L. V. dan Wu, H. 2007. *Biomedical Optics: Principles and Imaging*. Hoboken: Wiley.
- Wasito. 2005. Komputasi Tomografi dan Aplikasinya dalam Proses Industri. *Prosiding Semiloka Teknologi Simulasi dan Komputasi serta Aplikasi*. Hal. 1-11.

- Widyaningrum, R., Agustina, D., Mudjosemedi, M., dan Mitrayana. 2018. Fotoakustik untuk Pencitraan Jaringan Lunak Oral berdasarkan Intensitas Laser Dioda Gelombang Kontinu Termodulasi. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. Vol. 8. No. 2. Hal. 622-627.
- Widyaningrum, R., Agustina, D., Mudjosemedi, M., dan Mitrayana. 2019. Pencitraan Fotoakustik untuk Deteksi Karsinogenesis Oral (Rancang Bangun Sistem dan Kajian Ex Vivo pada Lidah Tikus Sprague-Dawley yang Diinduksi 4-Nitroquinoline-1-Oxide). *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. Vol. 8. No. 2. Hal. 622-627.
- Wulandari, W. 2018. Pengaruh Variasi Waktu Paparan Laser Nd-Yag Untuk Fabrikasi Fotokatalis *Zinc Oxide* Untuk Degradasi *Methylene Blue*. *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Yudhaswana, K. Y., dan Joefrie, P. P. 2011. Pemrograman Motor Stepper Dengan Menggunakan Bahasa Pemrograman C. *Mektek*. Vol. 13. No. 1. Hal. 39-45.
- Zaki, A., Murdiansyah, L., dan Husnah. 2018. Inspeksi Visual Retakan Pada Atap Beton Gedung Thariq Bin Ziyad. *RACIC Jurnal Teknik Sipil Universitas Abdurrah*. Vol. 3. No. 1. Hal. 332-342.