

**PENINGKATAN RESOLUSI CITRA FOTOAKUSTIK
MELALUI METODE *ENHANCED SUPER-RESOLUTION*
*GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS (ESRGAN)***

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh derajat Sarjana S1
Program Studi Fisika



Diajukan oleh:
Handi Putra Utama
20106020032

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN



**KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1164/Un.02/DST/PP.00.9/07/2024

Tugas Akhir dengan judul : Peningkatan Resolusi Citra Fotoakustik melalui Metode Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks (ESRGAN)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : HANDI PUTRA UTAMA
Nomor Induk Mahasiswa : 20106020032
Telah diujikan pada : Kamis, 11 Juli 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Valid ID: 669dc5f8746e8

Ketua Sidang

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
SIGNED



Valid ID: 669da90d39c9f

Penguji I

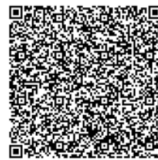
Dr. Thaqqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.
SIGNED



Valid ID: 66963580cceb7

Penguji II

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.
SIGNED



Valid ID: 669e0a264efab

Yogyakarta, 11 Juli 2024
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Handi Putra Utama

NIM : 20106020032

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Peningkatan Resolusi Citra Fotoakustik melalui Metode *Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks* (ESRGAN)” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 3 Juli 2024

Penulis



Handi Putra Utama
NIM. 20106020032

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/RO

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : HANDI PUTRA UTAMA
NIM : 20106020032
Judul Skripsi : Peningkatan Resolusi Citra Fotoakustik melalui Metode
Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks (ESRGAN)

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Pembimbing I

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
NIP. 19780510 200501 1 003

Yogyakarta, 2 Juli 2024

Pembimbing II

Rochan Rifai, S.Si., M.Sc.
NIP. 19980208 000000 1 301

PENINGKATAN RESOLUSI CITRA FOTOAKUSTIK MELALUI METODE *ENHANCED SUPER-RESOLUTION GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS (ESRGAN)*

Handi Putra Utama
20106020032

INTISARI

Pencitraan fotoakustik dengan metode *raster scanning* memerlukan waktu akuisisi yang lama dengan hasil resolusi citra yang rendah, metode interpolasi konvensional yang umum digunakan dalam pengolahan citra digital meliputi *neighborhood*, *bilinear*, dan *bicubic* tidak cukup optimal karena masih meninggalkan efek blur serta derau. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan resolusi citra fotoakustik sampel gigi melalui metode *ESRGAN (Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks)* dengan model Skyrim dan Deoldify. Proses tersebut dilakukan melalui program antarmuka yang telah dibuat. Dengan demikian dapat dievaluasi perbandingan antara citra dari dua model *ESRGAN* serta metode interpolasi konvensional. Interpolasi *neighborhood*, *bilinear*, dan *bicubic* berhasil meningkatkan resolusi citra fotoakustik yang mulanya memiliki kerapatan piksel paling lebar dengan FWHM (*Full Width at Half Maximum*) sebesar 3,76 piksel menjadi 3,64, 3,55, dan 3,49 piksel serta dominasi sinyal terhadap derau yang terukur oleh *SNR (Signal-to-Noise Ratio)* sebesar 2,17 dB menjadi 3,68, 3,87, dan 4,40 dB. Di sisi lain, penerapan *ESRGAN* mampu memberikan hasil resolusi yang lebih baik di mana model Skyrim dan Deoldify memiliki nilai FWHM sebesar 3,02 dan 2,99 piksel serta *SNR* sebesar 5,54 dan 5,71 dB.

Kata kunci: *ESRGAN*, Fotoakustik, Interpolasi konvensional, Peningkatan resolusi.

ENHANCING THE RESOLUTION OF PHOTOACOUSTIC IMAGES THROUGH ENHANCED SUPER-RESOLUTION GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS (ESRGAN) METHOD

Handi Putra Utama
20106020032

ABSTRACT

Photoacoustic imaging with the raster scanning method requires a long acquisition time and low image resolution results. Conventional interpolation methods commonly used in digital image processing, including neighborhood, bilinear, and bicubic, aren't optimal enough because they still leave blur and noise effects. This research aims to enhance the resolution of photoacoustic images of dental samples through the ESRGAN method with Skyrim and Deoldify models. The process is carried out using an interface program that has been created. Thus, comparisons between images from two ESRGAN models and conventional interpolation methods could be evaluated. Neighborhood, bilinear, and bicubic interpolation works enhance the resolution of photoacoustic image resolution, which initially had the widest pixel density by FWHM (Full Width at Half Maximum) of 3,76 pixels achieved to 3,64, 3,55, and 3,49 pixels, as well as signal dominance against noise measured by SNR (Signal-to-Noise Ratio) of 2,17 dB to 3,68, 3,87, and 4,40 dB. Other side, ESRGAN can provide better resolution results where the Skyrim and Deoldify models have FWHM values of 3,02 and 2,99 pixels also SNR of 5,54 and 5,71 dB.

Keywords: *ESRGAN, Photoacoustic, Conventional interpolation, Enhanced resolution.*

MOTTO

*Be precious like a time, do something good or something right. Then, everything
will get better for you.*



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini dipersembahkan untuk:

Allah Swt.

Diri saya sendiri

Kedua orang tua penulis

Study Club Fisika Instrumentasi

Fisika 2020

Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, puji syukur atas kehadiran Allah Swt. atas segala rahmatnya penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “PENINGKATAN RESOLUSI CITRA FOTOAKUSTIK MELALUI METODE *ENHANCED SUPER-RESOLUTION GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS (ESRGAN)*” dengan baik. Shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada Rasulullah Muhammad Saw. Semoga kelak kita memperoleh syafaatnya.

Penyusunan skripsi ini menjadi bagian dari tanggung jawab penulis dalam menyelesaikan studi serta sebagai syarat kelulusan. Harapan penulis, skripsi ini dapat memberikan manfaat dan berkah bagi pihak-pihak terkait. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis telah mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, sepantasnya penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Suparjan dan Ibu Aslamiyah Bety Cahyatiningsih, serta kakak penulis Tristi Dita Putri Cahyati. Terima kasih atas segala do'a, dukungan, serta kasih sayang yang selalu diberikan.
2. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, S.Ag., M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

5. Bapak Andi, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan saran terbaik untuk setiap mahasiswanya.
6. Bapak/Ibu seluruh dosen Prodi Fisika yang telah memberi ilmu serta dedikasi bagi para mahasiswanya.
7. Bapak Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I dalam penelitian tugas akhir ini, terima kasih atas dedikasi dan bimbingan yang telah diberikan.
8. Bapak Rochan Rifai, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing II yang juga selalu memberikan dedikasi dan bimbingan bagi seluruh tim riset fotoakustik.
9. Tim riset fotoakustik serta teman-teman terdekat penulis : Haikal, Nika, Dinan, Namira, Bintang, dan Riko yang selalu bersama dan saling menguatkan.
10. Teman-teman Graviteez-Fisika 2020.
11. *Study Club* Fisika Instrumentasi.
12. Seluruh pihak yang telah memberi bantuan.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
GLOSARIUM.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Penelitian.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Studi Pustaka	9
2.2 Landasan Teori	14
2.2.1 Efek Fotoakustik.....	14
2.2.2 Pencitraan Fotoakustik	15
2.2.3 Citra	18
2.2.4 Peningkatan Resolusi.....	21
2.2.5 Metode Interpolasi.....	22
2.2.6 <i>Artificial Intelligence</i> (Kecerdasan Buatan)	24
2.2.7 <i>Deep Learning</i>	27
2.2.8 <i>Generative Adversarial Networks</i> (GAN)	30
2.2.9 <i>Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks</i> (<i>ESRGAN</i>).....	31
2.2.10 Python.....	34
2.2.11 Tampilan Antarmuka Pengguna.....	35
2.2.12 <i>Point Spread Function</i> (PSF)	37
2.2.13 <i>Full Width at Half Maximum</i> (FWHM).....	38
2.2.14 <i>Signal-to-Noise Ratio</i> (SNR).....	40
2.2.15 PyCharm	40
2.2.16 Wawasan Islam Tentang Kebermanfaatan	44
BAB III METODE PENELITIAN	46
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	46
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	47
3.2.1 Alat Penelitian	47

3.2.2 Bahan Penelitian	48
3.3 Prosedur Penelitian	50
3.3.1 Pembuatan Program.....	50
3.3.2 Penerapan <i>ESRGAN</i>	58
3.3.3 Pengujian Resolusi Citra	64
3.4 Rencana Pembahasan Hasil	68
3.4.1 Pembahasan Hasil Pembuatan Program	68
3.4.2 Pembahasan Hasil Penerapan <i>ESRGAN</i>	69
3.4.3 Pembahasan Hasil Pengujian Resolusi Citra	69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	71
4.1 Hasil Penelitian	71
4.1.1 Hasil Pembuatan Program	71
4.1.2 Hasil Penerapan <i>ESRGAN</i>	73
4.1.3 Hasil Pengujian Resolusi Citra	76
4.2 Pembahasan	78
4.2.1 Pembahasan Hasil Pembuatan Program	79
4.2.2 Pembahasan Hasil Penerapan <i>ESRGAN</i>	82
4.2.3 Pembahasan Hasil Pengujian Resolusi	87
4.3 Integrasi-Interkoneksi	92
BAB V PENUTUP	94
5.1 Kesimpulan	94
5.2 Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	96
LAMPIRAN.....	103
Lampiran 1: Pembuatan Program	103
Lampiran 2: Penerapan Metode.....	108
Lampiran 3: Pengujian Metode	109

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Alur waktu penelitian.....	46
Tabel 3.2 Alat penelitian.....	47
Tabel 3.3 Bahan pembuatan program.....	48
Tabel 3.4 Bahan pengambilan data.....	49
Tabel 3.5 Bahan penerapan <i>ESRGAN</i>	49
Tabel 3.6 Bahan pengujian resolusi.....	49
Tabel Lampiran 3.1 Data pengukuran tingkat keabuan pada pengujian FWHM.....	109
Tabel Lampiran 3.2 Tabel pengukuran dominasi obyek terhadap derau pada parameter SNR.....	110



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses yang terjadi pada molekul setelah radiasi laser $h\nu$ terserap.....	15
Gambar 2.2	Prinsip pencitraan tomografi fotoakustik.....	16
Gambar 2.3	(a) Sampel arteri dalam parafin, (b) Hasil citra fotoakustik, (C) Citra fotoakustik penerapan interpolasi linear.....	18
Gambar 2.4	Susunan piksel dalam citra.	19
Gambar 2.5	Proses akuisisi citra.	20
Gambar 2.6	Hasil proyeksi citra. (a) Proyeksi gambar kontinu ke array sensor. (b) Hasil pengambilan sampel dan kuantisasi citra.	21
Gambar 2.7	Prinsip kerja metode interpolasi.	23
Gambar 2.8	Hubungan antara AI, machine learning, dan deep learning.....	28
Gambar 2.9	Ilustrasi sederhana dari model jaringan saraf deep learning.....	29
Gambar 2.10	Perbandingan citra <i>ESRGAN</i> terhadap metode interpolasi lain.	32
Gambar 2.11	Konsep arsitektur RRDB pada <i>ESRGAN</i>	33
Gambar 2.12	Jarak pemisahan spasial FWHM.	39
Gambar 2.13	Tampilan halaman pemrograman PyCharm.	41
Gambar 3.1	Diagram blok prosedur penelitian.	50
Gambar 3.2	Diagram alir proses pemrograman <i>ESRGAN</i>	51
Gambar 3.3	Diagram alir pembuatan tampilan antarmuka dengan LabVIEW.	54
Gambar 3.4	Gambaran tampilan antarmuka untuk program <i>ESRGAN</i>	57
Gambar 3.5	Diagram alir proses pengambilan data citra fotoakustik.	59
Gambar 3.6	Skema pengambilan data citra fotoakustik.	59
Gambar 3.7	Diagram alir proses penerapan metode interpolasi konvensional.	62
Gambar 3.8	Diagram alir proses penerapan metode <i>ESRGAN</i>	63
Gambar 4.1	Hasil program antarmuka LabVIEW. (a) Program kontrol display,.....	72
Gambar 4.2	Tampilan antarmuka <i>ESRGAN</i>	72
Gambar 4.3	(a) Sampel gigi, (b) Citra fotoakustik hasil pengambilan data.	73
Gambar 4.4	Citra fotoakustik hasil penerapan metode interpolasi.....	74
Gambar 4.5	(a) Citra fotoakustik model Skyrim, (b) Citra fotoakustik model Deoldify.	75
Gambar 4.6	Pembandingan detail obyek citra fotoakustik. (a) Citra fotoakustik, (b) Interpolasi neighborhood, (c) Bilinear, (d) Bicubic, (e) Skyrim,	76
Gambar 4.7	Grafik PSF dan FWHM. (a) Sampel citra fotoakustik gigi, (b) Citra fotoakustik hasil interpolasi neighborhood, (c) Bilinear, (d) Bicubic, (e) Citra fotoakustik hasil model Skyrim, dan (f) Model Deoldify.	77
Gambar 4.8	Grafik hasil pengujian <i>SNR</i>	78
Gambar Lampiran 1.1	Pembuatan kode program <i>ESRGAN</i>	103
Gambar Lampiran 1.2	Pembuatan tampilan antarmuka pengguna.....	103
Gambar Lampiran 2.1	Pengambilan data citra fotoakustik sampel gigi.	108
Gambar Lampiran 2.2	Penerapan program <i>ESRGAN</i> pada citra fotoakustik gigi.	108
Gambar Lampiran 3.1	Pengujian citra parameter (a) FWHM, (b) <i>SNR</i>	109

GLOSARIUM

- Deoldfy* : Sebuah model *ESRGAN* yang dirancang untuk meningkatkan resolusi citra dengan detail dan kontras tajam.
- Diskriminator : Jaringan *ESRGAN* yang bertugas membedakan antara citra input dengan citra yang dihasilkan oleh generator.
- Duty cycle* : Parameter tomografi fotoakustik yang berperan sebagai pengatur waktu aktif laser dalam pemancaran energi terhadap sampel.
- Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks (ESRGAN)* : Sebuah arsitektur deep learning yang memungkinkan untuk menciptakan data baru berupa citra yang serupa dengan data input berdasarkan proses pelatihan model yang dimiliki.
- Frekuensi modulasi : Parameter tomografi fotoakustik yang berperan dalam penentuan tingkat kontras, sensitivitas, kedalaman materi dan resolusi citra berdasarkan frekuensi yang termodulasi dalam proses pemindaian.
- Generator : Jaringan *ESRGAN* yang bertugas menghasilkan citra baru dengan resolusi tinggi berdasarkan citra input.
- JSON (JavaScript Object Notation)* : Format file berbasis teks yang umum digunakan untuk pertukaran data antara server dengan user. Ekstensi JSON berupa teks yang dapat dibaca manusia dan dipahami oleh komputer.
- Leaky Rectified Linear Unit (LReLU)* : Sebuah unit linear yang terdapat dalam *residual block* yang berperan dalam perbaikan fitur citra sesuai model terlatih.
- Pemanasan lokal : Proses pemanasan yang terjadi pada area tertentu dalam sampel saat termodulasi oleh laser.
- Residual Dense Block (RDB)* : Sebuah struktur model jaringan saraf deep learning yang digunakan dalam pemrosesan citra. Dalam konteks *ESRGAN*, RDB berperan sebagai penghasil citra tiruan.
- Residual-in-Residual Dense Block (RRDB)* : Unit jaringan *ESRGAN* yang berperan dalam peningkatan kualitas visual citra, terutama pada restorasi tekstur sehingga citra tampak lebih realistis.
- Skyrim : Model *ESRGAN* dengan karakteristik yang berfokus pada perbaikan tekstur halus suatu citra.
- Super-Resolution Residual Networks (SRResNet)* : Sebuah komponen yang menghasilkan citra Super-Resolusi. Dalam arsitektur *ESRGAN*, SRResNet bertindak sebagai generator.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fisika merupakan ilmu yang sangat kompleks, banyak fenomena dalam kehidupan yang asal-usulnya dapat dijabarkan dengan kaitan ilmu fisika. Salah satu fenomena yang menarik untuk dibahas yaitu gelombang bunyi. Dalam kajian fisika gelombang bunyi termasuk dalam gelombang mekanik karena memerlukan medium perantara, dengan arah rambat dan arah getarnya yang sejajar membuat gelombang bunyi digolongkan sebagai gelombang longitudinal (Hirose dan Lonngren, 2010); (Widodo dkk, 2022).

Tidak hanya dalam konteks fisika, gelombang suara juga tercantum dalam ayat Al-Qur'an surah az-Zumar ayat 68 yang menjelaskan tentang peristiwa ditiupnya sangkakala pada hari akhir. Dalam ayat tersebut Allah Swt. berfirman:

وَنُفِخَ فِي الصُّورِ فَصَعِقَ مَنْ فِي السَّمَوَاتِ وَمَنْ فِي الْأَرْضِ إِلَّا مَنْ شَاءَ اللَّهُ ثُمَّ نُفِخَ فِيهِ أُخْرَىٰ
فَإِذَا هُمْ قِيَامٌ يَنْظُرُونَ ﴿٦٨﴾

Artinya: “Dan ditiuplah sangkakala, maka matilah semua (makhluk) yang (ada) di langit dan di bumi, kecuali mereka yang dikendaki Allah. Kemudian ia ditiup sekali lagi, seketika mereka bangkit (dari kubur dan) menunggu (keputusan Allah).” (Kementerian Agama RI, 2017).

Al-Asyqar (2007) menafsirkan bahwa sangkakala adalah tanduk yang akan ditiup oleh malaikat Israfil dan semua makhluk baik di langit dan di bumi akan mati akibat bunyi yang dihasilkan. Shihab (2002) menafsirkan bahwa kata “*shûr*” berarti “*bûq*” (‘terompet’), maksud yang terkandung dalam ayat ini adalah sangkakala merupakan sebuah terompet dari alam gaib yang suaranya mampu membinasakan

seluruh makhluk pada hari kiamat. Dalam fenomena sains, terompet dapat menghasilkan bunyi disebabkan oleh adanya pergerakan udara dalam bentuk tiupan. Secara teori bunyi didefinisikan sebagai suatu getaran yang merambat melalui media transmisi (Putri dkk, 2022).

Bahasan tentang gelombang bunyi memiliki cakupan yang luas, salah satu fenomena dari gelombang bunyi yaitu efek fotoakustik. Efek fotoakustik adalah peristiwa ketika gelombang bunyi (akustik) mengalami pembangkitan akibat radiasi elektromagnetik seperti cahaya yang terserap oleh suatu materi setelah mengalami perluasan termal yang cepat (Nugraha, 2021). Kemajuan teknologi telah membuat fenomena tersebut berhasil diterapkan dalam berbagai aplikasi seperti penerapan spektroskopi untuk sistem deteksi gas, konsentrasi, dan larutan yang memanfaatkan frekuensi audio sebuah mikrofon komersial dan diolah melalui *software* berdasarkan transformasi fourier (Khairunnisa dkk, 2021). Tidak sampai disitu, efek fotoakustik juga telah diterapkan sebagai salah satu sistem pencitraan dengan adanya tomografi fotoakustik (Alifkalaila dan Widyaningrum, 2021).

Tomografi fotoakustik bekerja dengan rambatan getaran gelombang yang dihasilkan dari efek fotoakustik. Gelombang akustik tersebut akan bergetar melalui udara yang kemudian ditangkap oleh mikrofon. Setelah itu, gelombang akustik diubah oleh transduser menjadi sinyal elektrik sebagai bagian dari proses pembentukan citra fotoakustik berdasarkan titik spasial suatu obyek yang dimodulasi dengan arah X-Y (Prasetya dkk, 2022). Sistem fotoakustik telah berhasil dirancang oleh Setiawan (2016) dengan basis laser dioda dan model sel terbuka.

Tomografi fotoakustik menjadi sebuah teknik pencitraan medis yang menggabungkan prinsip akustik dengan prinsip pencitraan optik untuk menghasilkan citra 2D dari struktur anatomi manusia atau organisme lain (Muhammad dan Mitrayana, 2021). Proses pencitraan fotoakustik diawali dengan obyek yang disinari oleh pulsa cahaya pendek seperti laser yang kemudian sebagian energinya akan terserap oleh materi dan menghasilkan perubahan suhu yang cepat hingga mengakibatkan terjadinya ekspansi termal. Getaran yang terjadi akibat proses ekspansi termal tersebut akan merambat di dalam materi, selanjutnya gelombang akustik akan diubah menjadi sinyal elektrik oleh transduser untuk menghasilkan citra fotoakustik berdasarkan distribusi spasial suatu sampel (Julianto dan Mitrayana, 2022).

Metode pemindaian yang digunakan dalam pencitraan fotoakustik yaitu metode *raster scanning*. Metode tersebut merupakan sebuah teknik pemindaian yang bekerja dari titik ke titik sampel untuk direkonstruksi menjadi citra (Nugraha, 2021). Pada pencitraan fotoakustik, sinar optik akan terarah ke satu titik sampel hingga menghasilkan gelombang akustik akibat peristiwa efek fotoakustik selama pemanasan berlangsung. Pergerakan sinar optik dan detektor dilakukan melalui motor *stepper* yang bergeser dari setiap titik sampel selama pemindaian berlangsung. Teknik pencitraan fotoakustik telah banyak diaplikasikan pada bidang medis seperti keperluan diagnostik, pemetaan pembuluh darah, dan penelitian neurologis (Ahmad dan Mitrayana, 2020).

Penelitian dari Matua dkk, (2017) mengambil citra fotoakustik berdasarkan penerapan sistem kendali *XY-Stage* yang termodulasi oleh laser diode. Berdasarkan

penelitian tersebut, sistem pencitraan fotoakustik bekerja dari titik ke titik pada proses akuisisinya sehingga resolusi spasial yang dihasilkan masih sangat kecil serta memerlukan proses pemindaian yang sangat lama dalam akuisisi suatu sampel. Bukti tersebut dikuatkan oleh penelitian dari Nurjannah (2020), penelitian tersebut mencoba mengaplikasikan tomografi fotoakustik untuk pencitraan arteri dengan variasi media kontras berupa larutan serealialia bakar. Hasilnya, citra fotoakustik tampak berupa titik spasial dengan detail tepi yang kurang tajam, sehingga tidak mudah dianalisis. Untuk memperoleh hasil citra yang lebih baik, dilakukan pergantian warna latar belakang sampel serta peningkatan kualitas citra melalui metode interpolasi linear.

Dalam proses pengolahan citra digital terdapat sebuah metode pembesaran piksel yang mampu diaplikasikan untuk memperbaiki resolusi citra. Metode tersebut dikenal dengan metode interpolasi, terdapat tiga metode interpolasi yang umum digunakan dalam pengolahan citra digital yaitu *neighborhood*, *bilinear*, dan *bicubic* (Aripin dan Sunandar, 2016). Semakin banyak piksel baru yang ditambahkan secara berdekatan, maka akan diperoleh hasil rekonstruksi yang lebih akurat. Akan tetapi, penggunaan metode interpolasi konvensional masih kurang optimal dengan timbulnya efek *blur* dan detail tepi obyek yang kurang jelas akibat derau yang dihasilkan (Zarcelonia, 2014).

Goodfellow dkk (2014) dalam penelitiannya berhasil menciptakan sebuah program untuk meningkatkan kualitas citra berbasis *Artificial Intelligence* (AI) yang mampu menciptakan citra baru dan serupa dengan citra input berdasarkan karakteristik dataset model yang diterapkan, program tersebut dikenal dengan

istilah *GAN (Generative Adversarial Networks)*. *GAN* terdiri dari dua jaringan yang bekerja secara berlawanan (*adversarial*) serta tidak akan berhenti untuk terus melakukan perbaikan dalam proses pelatihannya sehingga kualitas *output* yang dihasilkan akan semakin baik. Pengembangan lebih lanjut dilakukan oleh Wang dkk (2018) melalui penelitian tentang *Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks (ESRGAN)* yang merupakan inovasi dari *GAN* dengan arsitektur *networks*, *adversarial loss*, dan *perceptual loss* yang membuat proses pelatihan data lebih efektif daripada *GAN*, sehingga data baru yang dihasilkan memiliki kualitas resolusi super. Sulaeman dkk (2019) dalam penelitiannya telah berhasil menerapkan *ESRGAN* untuk meningkatkan resolusi citra bangunan dengan detail yang baik serta efek derau yang rendah.

Keberhasilan tersebut membuka peluang diterapkannya program *ESRGAN* sebagai metode untuk meningkatkan resolusi citra fotoakustik hasil pengambilan data agar diperoleh citra *output* beresolusi tinggi dengan detail tepi tajam serta derau yang rendah. Pada penelitian ini, telah berhasil dibuat program *ESRGAN* berbasis tampilan antarmuka yang dibuat menggunakan LabVIEW. Adapun model *ESRGAN* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Skyrim* dan *Deoldify*. Pemilihan model tersebut didasari oleh jumlah dataset dan data latih yang dimiliki menunjukkan bahwa kedua model dapat memberikan peningkatan resolusi berupa ketajaman detail tepi serta penurunan derau. Selain itu, pemilihan kedua model ini juga mempertimbangkan kemampuan perangkat keras yang hanya dapat mengoperasikan *runtime CPU (Central Processing Unit)* dimana kinerja *runtime*

tersebut berada di bawah *GPU (Graphics Processing Unit)* dan *CUDA (Compute Unified Device Architecture)*.

Proses berikutnya yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu penerapan *ESRGAN*. Proses ini dilakukan dengan tiga tahapan yaitu, tahapan pengambilan data citra fotoakustik sampel gigi, tahapan penerapan metode interpolasi konvensional, dan tahapan penerapan program *ESRGAN*. Tujuan dari proses ini yaitu untuk mengevaluasi keberhasilan penerapan *ESRGAN* terhadap metode interpolasi konvensional dalam meningkatkan resolusi citra fotoakustik. Target dari proses ini yaitu diperolehnya citra hasil penerapan *ESRGAN* dan metode interpolasi konvensional berdasarkan citra fotoakustik sampel gigi yang diperoleh pada tahapan pengambilan data. Adapun, Pemilihan sampel gigi sebagai obyek citra fotoakustik didasari oleh beberapa alasan, salah satunya yaitu struktur multi lapisan dalam gigi yang kompleks seperti *enamel*, *dentin*, dan *pulp*. Hal ini memberikan pengaruh terhadap variasi indeks akustik yang berbeda pada masing-masing lapisannya, sehingga serapan gelombang akustik dari setiap lapisan gigi dapat memberikan kontras dan detail yang berbeda.

Setelah resolusi citra fotoakustik berhasil ditingkatkan melalui metode interpolasi serta program *ESRGAN*, maka hasil citra fotoakustik yang diperoleh perlu dilakukan pengujian. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan penerapan *ESRGAN* terhadap metode interpolasi konvensional dalam meningkatkan resolusi citra fotoakustik. Sementara itu, target dari tahapan ini yaitu diperolehnya hasil pengujian resolusi dengan cara membandingkan citra fotoakustik hasil penerapan *ESRGAN* dengan metode interpolasi konvensional yang

meliputi *neighborhood*, *bilinear*, dan *bicubic*. Adapun, parameter pengujian resolusi yang digunakan yaitu FWHM (*Full Width at Half Maximum*) untuk mengukur resolusi cita melalui tingkat kerapatan piksel dan *SNR* (*Signal-to-Noise Ratio*) untuk mengukur resolusi citra melalui tingkat dominasi obyek terhadap derau.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti. Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana hasil pembuatan program *ESRGAN* berbasis tampilan antarmuka sebagai metode untuk meningkatkan resolusi citra fotoakustik?
2. Bagaimana hasil penerapan program *ESRGAN* sebagai metode peningkatan resolusi citra fotoakustik?
3. Bagaimana hasil pengujian resolusi citra dari penerapan *ESRGAN* sebagai metode peningkatan resolusi citra fotoakustik?

1.3 Tujuan Penelitian

Untuk menjawab rumusan masalah di atas, maka ditetapkan tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Membuat program *ESRGAN* berbasis tampilan antarmuka sebagai aplikasi penerapan metode untuk meningkatkan resolusi citra fotoakustik.
2. Menerapkan program *ESRGAN* sebagai metode peningkatan resolusi citra fotoakustik.
3. Menguji tingkat resolusi citra hasil penerapan *ESRGAN* sebagai metode peningkatan resolusi citra fotoakustik.

1.4 Batasan Penelitian

Pada implementasi tujuan penelitian tersebut, maka diperlukan batasan penelitian dengan maksud agar penelitian dapat fokus terhadap rumusan masalah. Berikut ini merupakan batasan penelitian yang akan dilakukan:

1. Perangkat lunak yang digunakan untuk pembuatan program *ESRGAN* yaitu PyCharm dengan versi bahasa pemrograman Python 3.11.
2. Perangkat lunak yang digunakan dalam pembuatan tampilan antarmuka *ESRGAN* yaitu LabVIEW.
3. *ESRGAN* akan dijalankan dengan *runtime CPU (Central Processing Unit)*.
4. Model *ESRGAN* yang digunakan yaitu model Skyrim dan model Deoldify, keduanya diperoleh dari referensi berikut: <https://openmodeldb.info/>
5. Evaluasi hasil citra *ESRGAN* didasarkan pada hasil citra metode interpolasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini memiliki beberapa manfaat di antaranya:

1. Diperolehnya tampilan antarmuka dari program *ESRGAN* sebagai aplikasi peningkatan resolusi citra fotoakustik.
2. Proses penerapan metode *ESRGAN* dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien serta hasil citra yang maksimal dengan adanya antarmuka aplikasi yang telah dibuat.
3. Citra fotoakustik dapat lebih mudah dianalisis, sehingga proses diagnosis dapat dilakukan dengan lebih akurat.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk membuat antarmuka program *ESRGAN*, menerapkan program, dan menguji resolusi citra *ESRGAN* terhadap metode interpolasi konvensional. Berdasarkan hasil penelitian serta pembahasan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan, diantaranya.

1. Tampilan antarmuka *ESRGAN* telah berhasil dibuat dan secara fungsional dapat dioperasikan dengan baik. Model *ESRGAN* yang digunakan yaitu model Skyrim dan Deoldify.
2. Program *ESRGAN* telah berhasil diterapkan melalui tampilan antarmuka yang telah dibuat. Penerapan tersebut berhasil meningkatkan resolusi citra fotoakustik dengan hasil yang lebih baik dibandingkan hasil penerapan metode interpolasi konvensional, ditandai dengan detail tepi yang tajam tanpa meninggalkan efek blur serta derau yang tinggi.
3. Resolusi citra fotoakustik hasil penerapan program *ESRGAN* telah berhasil diuji tingkat kerapatan piksel dengan FWHM serta dominasi obyek terhadap derau melalui *SNR*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa citra *ESRGAN* memiliki piksel yang lebih rapat dengan FWHM di antara 2,99-3,02 piksel, serta *SNR* di antara 5,54-5,71 dB. Dibandingkan citra hasil interpolasi yang pikselnya lebih renggang, dengan FWHM di antara 3,49-3,64 piksel serta dominasi obyek yang lebih kecil terhadap derau dengan *SNR* berada pada rentang 3,68-4,40 dB.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, terdapat beberapa kekurangan yang dapat diperbaiki pada penelitian berikutnya, di antaranya yaitu.

1. Model *ESRGAN* yang digunakan masih memanfaatkan model yang diperoleh dari referensi luar. Hal ini akan lebih sempurna apabila penelitian berikutnya mampu membuat model sendiri dengan dataset berupa citra fotoakustik sehingga dapat diperoleh hasil yang lebih valid.
2. Dalam pengujian resolusi citra fotoakustik terutama pada pengukuran nilai FWHM, akan lebih baik jika data *Point Spread Function (PSF)* dapat diolah bukan hanya berupa grafik sebaran titiknya saja, namun juga diperoleh pemodelan titiknya sehingga resolusi citra dapat dianalisis berdasarkan respon pencitraan terhadap obyeknya. Hal ini karena setelah dilakukan pengujian, peneliti belum dapat memodelkan titik obyek tersebut disebabkan oleh ketidaksesuaian dimensi pada citra yang dianalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, N. M., Aisyah, S., & Arnia, F. 2011. Peningkatan Kualitas Citra Digital Menggunakan Metode Super Resolusi Pada Domain Spasial. *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, **Vol.9 No.3** : 137–142.
- Ahmad, S. 2020. *Sistem Citra Fotoakustik Real-Time Berbasis Laser Dioda* (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Al-Asyqar, M. S. A. 2007. *Zibdatul Tafsir Min Fathil Qadir*. Kementerian Islam Qatar.
- Alifkalaila, A., & Widyaningrum, R. 2021. Photoacoustic Imaging System based on Diode Laser and Condenser Microphone for Characterization of Dental Anatomy. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, **Vol.11 No.6 Desember 2021** : 2363–2368.
- Arifin, T. 2016. Analisa Perbandingan Metode Segmentasi Citra pada Citra Mammogram. *INFORMATIKA*, **Vol.3 No.1 Agustus 2016** : 156–153.
- Aripin, S., & Sunandar, H. 2016. Perancangan Aplikasi Perbaikan Citra Pada hasil Screenshot. *Pelita Informatika Bumi Darma*, **Vol.15 No.1 Oktober 2016** : 51–58.
- Awar, N. Al, Zhu, S., Biros, G., & Gligoric, M. 2021. A Performance Portability Framework for Python. *Proceedings of the International Conference on Supercomputing*, 467–478.
- Azmi, F., Sherly, Lahagu, S., & David. 2019. Implementasi Metode Retinex dan Histogram Equalization Pada Kecerahan Citra Digital Implementating Retinex and Histogram Equalization Methods in Digital Images Brightness. *Journal of Informatics and Telecommunication Engineering (JITE)*, **Vol.2 No.2 Januari 2019** : 62–68.
- Bengio, Y., Thibodeau-Laufer Guillaume Alain, Webé., & Yosinski, J. 2014. *Deep Generative Stochastic Networks Trainable by Backprop.*
- Beniz, D. B., & Espindola, A. M. 2017. *Using Tkinter of Python to Create Graphical User Interface (GUI) for Scripts In LNLS*. <http://lnls.cnpem.br/beamlines/xafs/beamlines>
- Bitter, rick, Mohiuddin, T., & Nawrocki, M. 2017. *LabVIEW Advanced Programing Technique* (2nd ed.). CRC Press. Florida.
- Bouhamed, M. M., Díaz, G., Chaoui, A., Kamel, O., & Nouara, R. 2021. Models Runtime: The Development and Re-configuration Management of Python Applications using Formal Methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, **Vol.11 No.20 Oktober 2021** : 1–21.

- Cholissodin, I., Sutrisno, S., Soebroto, A. A., Hasanah, U., & Febiola, Y. I. 2020. *AI, Machine Learning & Deep Learning*. Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Brawijaya, Malang.
- Darujati, C., Anam, S., Dwi Cahyono, H., & Bimo Gumelar, A. 2014. Magnifikasi Perbaikan Citra Digital Multi Resolusi dengan Metode Gabungan Tapis Lolos Bawah dan Interpolasi Bilinear. *Jurnal Ilmiah Mikrotek*, **Vol.1 No.2** : 31–38.
- El-Sharkawy, Y. H., & El-Sherif, A. F. 2012. Photoacoustic Diagnosis of Human Teeth Using Interferometric Detection Scheme. *Opt Laser Technol*, 1501–1506.
- Fatimah Azhara, M., Dewang, S., Dewi Astuty, S., Rosyidah, U., & Abdul Samad, B. 2023. Analisis Modulation Transfer Function (MTF) dan Contrast-to-Noise Ratio (CNR) untuk Optimasi Kualitas Citra CT-Scan. *Berkala Fisika*, **Vol.26 No.1** : 1–7.
- Febriani, A. R. 2024. *Sebaik-baik Manusia Adalah yang Bermanfaat bagi Orang Lain, Ini Hadisnya*. DetikHikmah. Diakses pada 4 Februari 2024 dari [Sebaik-baik Manusia Adalah yang Bermanfaat bagi Orang Lain, Ini Haditsnya \(detik.com\)](https://www.detik.com/berita/islam/Sebaik-baik-Manusia-Adalah-yang-Bermanfaat-bagi-Orang-Lain,-Ini-Haditsnya)
- Fedus, W., Goodfellow, I., & Dai, A. M. 2018. Maskgan: Better Text Generation via Filling in the_. *ArXiv Preprint ArXiv:1801.07736*.
- Gao, S., & Gruev, V. 2011. *Bilinear and Bicubic Interpolation Methods for Division of Focal Plane Polarimeters*.
- Gao, Y., Xu, W., Chen, Y., Xie, W., & Cheng, Q. 2022. Deep Learning-Based Photoacoustic Imaging of Vascular Network Through Thick Porous Media. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **Vol.41 No.8** : 2191–2204.
- Ghiffary, M. N. El, Susanto, T. D., & Herdiyanti, A. 2018. Analisis Komponen Desain, Layout, Warna, dan Kontrol pada Antarmuka Pengguna Aplikasi Mobile berdasarkan Kemudahan Penggunaan. *Jurnal Teknik ITS*, **Vol.7 No.1 April 2018** : 143–148.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. 2014. Generative adversarial networks. *Communications of the ACM*, **Vol.63 No.11** : 139–144.
- Hadi, S. 2014. Metode Interpolasi dan Implementasinya dalam Citra Digital. *ResearchGate*, **Vol.2 No.1 April 2014** : 1–6.
- Hamed, A. M. 2017. Improvement of point spread function (PSF) using linear-quadratic aperture. *Optik*, **Vol.131 Februari 2014** : 838–849.
- Hamet, P., & Tremblay, J. 2017. Artificial intelligence in medicine. *Metabolism*, **Vol.69 April 2017** : 36–40.
- Hao, J., & Ho, T. K. 2019. Machine Learning Made Easy: A Review of Scikit-Learn Package in Python Programming Language. In *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, **Vol.44 No.3 Juni 2019** : 348–361.

- Hartomo, K. D. 2006. Implementasi Metode Interpolasi Linear Untuk Perbesaran Resolusi Citra. *TEKNOIN*, **Vol.11 No.3 September 2006** : 219–232.
- Hassan, S. A., Akbar, S., Rehman, A., Saba, T., Kolivand, H., & Bahaj, S. A. 2021. Recent Developments in Detection of Central Serous Retinopathy Through Imaging and Artificial Intelligence Techniques—A Review. *IEEE Access*, **Vol.9 Agustus 2021** : 168731–168748.
- Hayashi, A., Ishizaki, K., Koblents, G., & Sarkar, V. 2015. Machine Learning based Performance Heuristics for Runtime CPU/GPU Selection. In *Proceedings of the principles and practices of programming on the Java platform* : 27–36.
- Herculano-Houzel, S. 2009. The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaled-Up Primate Brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, **Vol.3 November 2009** :1–11.
- Heryadi, Y., & Irwansyah, E. 2020. *Deep Learning dan Aplikasinya di Bidang Informasi Geospasial*. Artifisia Wahana Informa Teknologi. Depok.
- Hinton, G., Deng, L., Yu, D., Dahl, G., Mohamed, A. R., Jaitly, N., Senior, A., Vanhoucke, V., Nguyen, P., Sainath, T., & Kingsbury, B. 2012. Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition: The Shared Views of Four Research Groups. *IEEE Signal Processing Magazine*, **Vol.29 No.6** : 82–97.
- Hu, Q., Ma, L., & Zhao, J. 2018. DeepGraph: A PyCharm Tool for Visualizing and Understanding Deep Learning Models. *2018 25th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)*, 628–632.
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. 2017. *Densely Connected Convolutional Networks*. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) : 4700-4708.
- Hunt, E. B. 2014. *Artificial Intelligence*. Academic Press. Massachusetts.
- Ivando, A., Junianto, E., & Puspasari, S. 2014. Implementasi Metode Interpolasi Bicubic Modifikasi untuk Perbaikan Citra Hasil Penskalaan. *Core Paper* : 1–5.
- Julianto, R., & Mitrayana. 2022. *Karakterisasi Sistem Citra Tomografi Fotoakustik Berbasis Cahaya 450nm dan Aplikasinya Untuk Deteksi Daging Ikan*. (Tesis), Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Kelleher, J. D. 2019. *Deep learning*. MIT press. Massachusetts.
- kementerian Agama RI. 2017. *Al-Quran Tajwid Warna Terjemah dan Transliterasi Al-Misbah*. Beras Alfath.
- Khairunnisa, Sarifudin, & Ahyadi, Z. 2021. Uji Kualitas Sinyal Audio dengan Metode Fourier dan Metode Wavelet. *SENTRINOV*, **Vol.7 No.1 November 2021** : 555–562.

- Kodosky, J. 2020. LabVIEW. *ACM Digital Library*, 1–54.
- Kolkman, R. G. M., Steenbergen, W., & van Leeuwen, T. G. 2006. In Vivo Photoacoustic Imaging of Blood Vessels with a Pulsed Laser Diode. *Lasers in Medical Science*, **Vol.21 No.3** : 134–139.
- Kumar, R., & Malik, R. 2021. A Review on Generative Adversarial Networks used for Image Reconstruction in Medical imaging. *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, **Vol.10 Oktober 2021** : 1–5.
- Kundu, R. 2022. *Image Processing: Techniques, Types, and Applications*. V7 Labs. Diakses pada 8 Maret 2024 dari [Image Processing: Techniques, Types, & Applications \[2023\] \(v7labs.com\)](https://v7labs.com)
- Kusumanto, R. D., & Tomponu, A. N. 2011. Pengolahan Citra Digital Untuk Mendeteksi Obyek Menggunakan Pengolahan Warna Model Normalisasi RGB. In *Seminar Nasional Teknologi Informasi & Komunikasi Terapan* : 1-7.
- Kwon, K.-S., & Ready, S. 2014. *Practical Guide to Machine Vision Software: An Introduction with LabVIEW* (1st ed.). Wiley-Vch. Weinhein.
- Ledig, C., Theis, L., Huszár, F., Caballero, J., Cunningham, A., Acosta, A., Aitken, A., Tejani, A., Totz, J., Wang, Z., & Shi Twitter, W. 2017. *Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network* : 4680-4690.
- Li, M., Tang, Y., & Yao, J. 2018. Photoacoustic tomography of blood oxygenation: A mini review. *Photoacoustics*, **Vol.10** : 65–73.
- Louk, A. C., & Suparta, G. B. 2014. Pengukuran Kualitas Sistem Pencitraan Radiografi Digital Sinar-X. *Berkala MIPA*, **Vol.24 No.2 Mei 2014** : 149–166.
- Lupu, T., Martis, R. A., Nicu, A. I., & Martis, C. S. 2021. Open source software based design and optimization tool for electrical machines. *2021 9th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 1–5.
- Manalu, S. B. 2021. Image Restoration Menggunakan Metode Lucy-Richardson Pada Citra Underwater. *Media Online*, **Vol.1 No.3** : 179–187.
- Matua, G., Widodo, T. W., & Mitrayana, M. 2017. Penerapan Sistem Kendali XY-Stage dan Modulasi Laser Pada Tomografi Fotoakustik Menggunakan Arduino. *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, **Vol.7 No.2 Oktober 2017** : 149-160.
- Mitrayana. 2017. *Aplikasi Spektroskopi Laser pada Bidang Lingkungan dan Kedokteran* (3rd ed., Vol. 1). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Mitrayana. 2019. *Aplikasi Spektroskopi Fotoakustik Laser CO2 pada Bidang Penyakit Dalam* (Vol. 4). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.

- Muarifin, Z., Darlis, D., & Novianti, A. 2020. Perencanaan dan Implementasi Image Processing untuk Absensi Kehadiran. *EProceedings of Applied Science*, **Vol.6 No.2** : 2348–2363.
- Muhammad, R. M., & Mitrayana. 2021. *Karakterisasi Sistem Citra Tomografi Fotoakustik dan Aplikasinya Untuk Klasifikasi Madu*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Muhardian, A. 2018. *Belajar Pemrograman Python: Pengenalan Dasar Python dan Persiapan Awal*. Petanikode.Com. Diakses pada 26 Desember 2023 dari [Belajar Pemrograman Python: Pengenalan Dasar Python dan Persiapan Awal \(petanikode.com\)](https://petanikode.com)
- Munir, R. 2021. Pembentukan Citra dan Digitalisasi Citra. *Institut Teknologi Bandung*, 1–46.
- Nugraha, M. K. 2021. *Karakterisasi Kinerja Sistem Pencitraan Fotoakustik Berbasis Cahaya Tampak 450 nm Untuk Pencitraan Phantom Bahan Kontras Pewarna Sintetik*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Nurjannah, I. 2020. *Aplikasi Sistem Tomografi Fotoakustik untuk Pencitraan Arteri dengan Variasi Media Kontras berupa Larutan Serealia Bakar*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Ota, R., Nakajima, K., Ogawa, I., Tamagawa, Y., Shimoi, H., Suyama, M., & Hasegawa, T. 2019. Coincidence time resolution of 30 ps FWHM using a pair of Cherenkov-radiator-integrated MCP-PMTs. *Physics in Medicine & Biology*, **Vol.64 No.7 Maret 2019** : 1–6.
- Prasetya, E. W., Tasmara, F. A., & Mitrayana. 2022. Fish Eye Imaging as Water Pollution Bioindicator using Photoacoustic Tomography System. *Proceedings - 2022 8th International Conference on Science and Technology, ICST 2022*.
- Putri, P. O. M. K., Rafiah, J. A., & Salma, F. E. 2022. *Interpretasi Bunyi dalam Islam dan Sains*. Prosiding Integrasi Interkoneksi Islam dan Sains, **Vol.4 Februari 2022** : 305-308.
- Rakotonirina, N. C., & Rasoanaivo, A. 2020. *ESRGAN+ : Further Improving Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network*. *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 3637–3641.
- Ramesh, A. N., Kambhampati, C., Monson, J. R. T., & Drew, P. J. 2004. Artificial intelligence in medicine. In *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, **Vol.86 No.5 September 2004** : 334–338).
- Reader, A. J., Corda, G., Mehranian, A., Costa-Luis, C. da, Ellis, S., & Schnabel, J. A. 2021. Deep Learning for PET Image Reconstruction. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, **Vol.5 No.1 Januari 2021** : 1–25.

- Reddy, A. N. K., & Karuna Sagar, D. 2015. Half-Width at Half-Maximum, Full-Width at Half-Maximum Analysis for Resolution of Asymmetrically Apodized Optical Systems with Slit Apertures. *Pramana - Journal of Physics*, **Vol.84 No.1 Januari 2015** : 117–126.
- Rosencwaig, A. 1980. Photoacoustic Spectroscopy. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, **Vol.9 No.1 Juni 1980** : 31–54.
- Rusk, N. 2016. Deep learning. *Nature Methods*, **Vol.13 No.1 Januari 2016**: 35–35.
- Sari, M. D., Fitriyani, D., & Prasetyo, H. 2023. Analisis Sensitivitas dalam Deteksi Homogenitas ROI Pada Pengukuran Kualitas Citra Pesawat CT-Scan. *Jurnal Fisika Unand*, **Vol.12 No.1 Januari 2023** : 159–164.
- Shechtman, Y., Sahl, S. J., Backer, A. S., & Moerner, W. E. 2014. Optimal Point Spread Function Design for 3D Imaging. *Physical Review Letters*, **Vol.113 No.13 September 2014** : 1-5.
- Shihab, M. Q. 2002. *Tafsir Al-Misbah* (Vol. 12). Lentera Hati. Tangerang.
- Sinh, V. T., & Minh, N. Le. 2019. A Study on Self-Attention Mechanism for AMR-to-Text Generation. *Natural Language Processing and Information Systems: 24th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems, NLDB 2019, Salford, UK, June 26–28, 2019, Proceedings* **Vol.24** : 321–328.
- Sparzinanda, E., & Nurhidayah, dan. 2017. Pengaruh Faktor Eksposi Terhadap Kualitas Citra Radiografi. *Journal of Physics*, **Vol.3 November 2017** : 14–22.
- Sulaeman, A., Fasya Adzkiya, M., & Rauda Ramdania, D. 2019. ESRGAN untuk Memperbesar Resolusi pada Citra Bangunan. *Indonesian Journal of Computer Science Attribution*, **Vol.11 No.1 April 2019** : 200–207.
- Sumijan, & Purnama, P. A. W. 2021. *Teori dan Aplikasi Pengolahan Citra Digital: Penerapan dalam Bidang Citra Medis* (S. J. Insani & Y. Alhidayah, Eds.). Insan Cendekia Mandiri. Solok.
- Suresh, C., Singh, S., Saini, R., & Saini, A. K. 2013. A Comparative Analysis of Images Scaling Algorithms. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, **Vol.5 No.6 Mei 2013** : 49–56.
- Tasmara, F. A., Widyaningrum, R., Setiawan, A., & Mitrayana, M. 2023. Photoacoustic Imaging of Hidden Dental Caries using Visible–Light Diode Laser. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, **Vol.24 No.5 Januari 2023** : 1–8.
- Utama, J. 2011. Akuisisi Citra Digital Menggunakan Pemrograman MatLab. *Majalah Ilmiah UNIKOM*, **Vol.9 No.1 November 2011** : 71–80.
- Wang, L. V. 2009. *Photoacoustic Imaging and Spectroscopy* (Vol. 1). CRC Press. London.

- Wang, L. V., & Gao, L. 2014. Photoacoustic Microscopy and Computed Tomography: From Bench to Bedside . *Annu Rev Biomed Eng*, **Vol.16 Mei 2014** : 155–185.
- Wang, X., Yu, K., Wu, S., Gu, J., Liu, Y., Dong, C., Qiao, Y., & Loy, C. C. 2018. *ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks*.
- Widodo, A., Aisyah, M. C., Ningrum, I. E., Annas, M. A., & Musfiana, M. 2022. Analisis Percobaan Superposisi Gelombang Suara Menggunakan Software Audacity. *YASIN: Jurnal Pendidikan Dan Sosial Budaya*, **Vol.2 No.4 Agustus 2022** : 459–466.
- Xu, M., & Wang, L. V. 2006. Photoacoustic imaging in biomedicine. *Review of Scientific Instruments*, **Vol.77 No.4 April 2006** : 1–22.
- Yan, H., Xu, W., Yu, D., Heroux, A., Lee, W.-K., Li, L., Campbell, S., & Chu, Y. 2017. PyXRF: Python-Based X-ray Fluorescence Analysis Package., *X-Ray Nanoimaging: Instruments and Methods III* : 30–37).
- Yudha, S., & Dewilza, N. 2023. *Radiografi Digital*. Deepublish. Yogyakarta.
- Zarcelonia, Z. 2014. *Perancangan Aplikasi Perbesaran Citra dengan Metode Proyeksi Cahaya*. Jurnal Sistem dan Teknologi Informasi (JUSTIN), **Vol.2 April 2014** :1-7.

