

**RANCANG BANGUN DAN OPTIMASI ALAT STERILISASI OTOMATIS
APEL PASCAPANEN MENGGUNAKAN SINAR UV-C BERBASIS
ARDUINO UNO R3 MELALUI KONTROL PANJANG GELOMBANG
DAN INTENSITAS CAHAYA TERHADAP JAMUR *Fusarium oxysporum***

(Skripsi)

Oleh

**BRILLIANT NAUFAL FARROS
NPM 2117041090**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**RANCANG BANGUN DAN OPTIMASI ALAT STERILISASI OTOMATIS
APEL PASCAPANEN MENGGUNAKAN SINAR UV-C BERBASIS
ARDUINO UNO R3 MELALUI KONTROL PANJANG GELOMBANG
DAN INTENSITAS CAHAYA TERHADAP JAMUR *Fusarium oxysporum***

Oleh

BRILLIANT NAUFAL FARROS

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Fisika Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN DAN OPTIMASI ALAT STERILISASI OTOMATIS APEL PASCAPANEN MENGGUNAKAN SINAR UV-C BERBASIS ARDUINO UNO R3 MELALUI KONTROL PANJANG GELOMBANG DAN INTENSITAS CAHAYA TERHADAP JAMUR *Fusarium oxysporum*

Oleh

BRILLIANT NAUFAL FARROS

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem sterilisasi pascapanen yang mampu menekan pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel Fuji melalui pemanfaatan radiasi sinar UV-C dengan kontrol parameter terukur dan presisi. Sistem dirancang berbasis mikrokontroler *Arduino Uno R3* yang mengatur tiga variasi panjang gelombang lampu UV-C (200 nm, 220 nm, 280 nm) serta sembilan variasi intensitas cahaya (10-90 lux) dalam durasi penyinaran konstan selama tiga jam. Eksperimen dilakukan pada kultur *Fusarium oxysporum* yang ditumbuhkan pada media PDA dan diukur pertumbuhan miseliumnya setiap hari selama tujuh hari. Hasil menunjukkan bahwa variasi panjang gelombang mempengaruhi laju pertumbuhan miselium secara signifikan, dengan efektivitas penghambatan tertinggi dihasilkan pada panjang gelombang 200 nm. Variasi intensitas cahaya juga memberikan hubungan berbanding terbalik terhadap pertumbuhan jamur, di mana intensitas 90 lux menghasilkan tingkat penghambatan paling besar. Sistem sterilisasi yang dikonstruksi berhasil bekerja stabil dan konsisten dalam pengaturan parameter radiasi, sehingga potensial digunakan sebagai metode alternatif pengendalian patogen pascapanen yang lebih aman, praktis, serta bebas residu kimia.

Kata Kunci: UV-C, *Arduino Uno R3*, *Fusarium oxysporum*, apel pascapanen, intensitas cahaya, panjang gelombang.

ABSTRACT

DESIGN AND OPTIMIZATION OF AN AUTOMATIC POSTHARVEST APPLE STERILIZATION DEVICE USING UV-C LIGHT BASED ON ARDUINO UNO R3 THROUGH WAVELENGTH AND LIGHT INTENSITY CONTROL AGAINST *Fusarium oxysporum*

By

BRILLIANT NAUFAL FARROS

This research aims to develop an automated postharvest sterilization system for Fuji apples using UV-C irradiation to inhibit the growth of *Fusarium oxysporum*. The device was designed based on an Arduino Uno R3 microcontroller capable of controlling three UV-C wavelength variations (200 nm, 220 nm, 280 nm) and nine levels of light intensity (10-90 lux) with a constant irradiation period of three hours. The fungal cultures were grown on PDA media and observed daily for seven days to measure mycelial diameter growth. The results indicate that wavelength parameters significantly affect fungal inhibition, with 200 nm producing the highest suppressive response. Light intensity variations also demonstrated an inverse correlation with fungal growth, where 90 lux yielded the highest inhibition rate. The developed system operated steadily with precise control of UV-C exposure characteristics, demonstrating strong potential as a safe, residue-free alternative for postharvest pathogen control technology.

Keywords: UV-C, Arduino Uno R3, *Fusarium oxysporum*, postharvest apples, light intensity, wavelength control.

Judul Skripsi : RANCANG BANGUN DAN OPTIMASI ALAT
STERILISASI OTOMATIS APEL PASCAPANEN
MENGUNAKAN SINAR UV-C BERBASIS
ARDUINO UNO R3 MELALUI KONTROL
PANJANG GELOMBANG DAN INTENSITAS
CAHAYA TERHADAP JAMUR *Fusarium
oxysporum*

Nama Mahasiswa : Brilliant Naufal Farros

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041090

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Sri Wahyu Suciati, S.Si., M.Si.
NIP. 197108291997032001

Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.
NIP. 199011252019032018

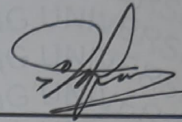
2. Plt. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.
NIP. 198206182008121001

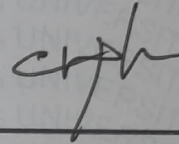
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

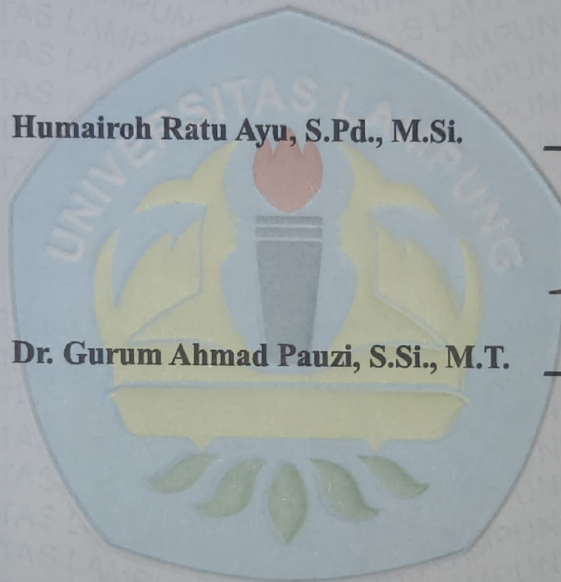
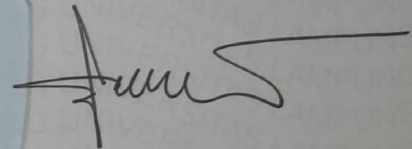
Ketua : **Dr. Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si.**



Sekretaris : **Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.**



Anggota : **Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 1971100120050011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 2 Februari 2026

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Brilliant Naufal Farros

NPM : 2117041090

Menyatakan bahwa skripsi berjudul "Rancang Bangun dan Optimasi Alat Sterilisasi Otomatis Apel Pascapanen Menggunakan Sinar UV-C Berbasis *Arduino Uno R3* melalui Kontrol Panjang Gelombang dan Intensitas Cahaya terhadap Jamur *Fusarium oxysporum*" adalah murni hasil karya saya sendiri. Seluruh isi skripsi ini disusun sesuai kaidah akademik dan ketentuan penulisan ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran akademik, pemalsuan data, atau plagiat, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku termasuk pembatalan gelar akademik.

Bandar Lampung, 10 Januari 2026



Brilliant Naufal Farros
NPM. 2117041090

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Brilliant Naufal Farros lahir di Nambah Dadi, Kecamatan Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah, pada tanggal 19 Agustus 2002. Penulis memulai pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 4 Nambah Dadi tahun 2008-2014, kemudian melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Negeri 3 Terbanggi Besar tahun 2014-2017, lalu melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Terbanggi Besar pada tahun 2017-2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada tahun 2021.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai pengurus organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) bidang minat dan bakat pada tahun 2022 dan menjabat sebagai Wakil Ketua Umum Himafi tahun 2023. Selain itu, penulis pernah menjadi asisten praktikum Fisika Komputasi. Penulis menempuh kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Great Giant Pineapple (GGP) Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah, Lampung dan melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Way Mili, Kecamatan Gunung Pelindung, Kabupaten Lampung Timur. Pengalaman menulis ilmiah penulis yaitu menulis laporan PKL dengan judul “Analisis Pengendalian Ketinggian Air pada Deaerator Menggunakan *Magnetic Level Transmitter* Berbasis *Distributed Control System* di Departemen Power Plant PT Great Giant Pineapple”.

MOTTO

“Aku terlahir dengan taruhan terbesar: nyawa seorang ibu. Maka hidupku tak pantas berjalan tanpa arti.”
(Penulis)

“Menuntut Ilmu Hukumnya wajib atas setiap muslim”
(HR. Ibnu Majah)

“Hidup adalah medan eksperimen; hanya mereka yang berani mencoba yang menemukan hukum kebenaran.”
(Francis Bacon)

**"SCIENCE WITHOUT RELIGION IS LAME,
RELIGION WITHOUT SCIENCE IS BLIND."**
(Albert Einstein)

"Hala Madrid"
(Real Madrid FC)

"Keep The Blue Flag Flying High"
(Chelsea FC)

PERSEMBAHAN



Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karya ini
kupersembahkan kepada:

Kedua Orangtuaku

Ayah (almarhum) dan Ibu
yang telah memberikan kasih sayang, dukungan moral maupun materi, serta doa
yang tiada henti dalam mengantarkan penulis menempuh pendidikan hingga
tingkat sarjana.

Adik Tercinta

Adikku,
terima kasih atas doa, dukungan, dan semangat yang senantiasa diberikan kepada
penulis.

Bapak dan Ibu Dosen

Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Lampung, atas ilmu pengetahuan, bimbingan, nasihat, dan arahan yang telah
diberikan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.

Teman-Teman Seperjuangan Fisika 2021

atas kebersamaan, dukungan, dan semangat yang telah diberikan selama
menempuh pendidikan.

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG.

KATA PENGANTAR

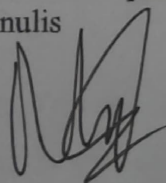
Puji syukur ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun dan Optimasi Alat Sterilisasi Otomatis Apel Pascapanen Menggunakan Sinar UV-C Berbasis *Arduino Uno R3* melalui Kontrol Panjang Gelombang dan Intensitas Cahaya terhadap Jamur *Fusarium oxysporum*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan skripsi ini masih terdapat keterbatasan, baik dari segi perancangan alat, pengambilan data, maupun penyajian hasil penelitian. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ilmiah ini di masa yang akan datang. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan kontribusi ilmiah, khususnya dalam bidang fisika instrumentasi serta pengembangan teknologi sterilisasi pascapanen berbasis sinar UV-C yang ramah lingkungan.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, peneliti selanjutnya, serta menjadi referensi tambahan dalam pengembangan penelitian dan penerapan teknologi di bidang terkait.

Bandar Lampung, 10 Januari 2026

Penulis



Brilliant Naufal Farros
NPM. 2117041090

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun dan Optimasi Alat Sterilisasi Otomatis Apel Pascapanen Menggunakan Sinar UV-C Berbasis *Arduino Uno R3* melalui Kontrol Panjang Gelombang dan Intensitas Cahaya terhadap Jamur *Fusarium oxysporum*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

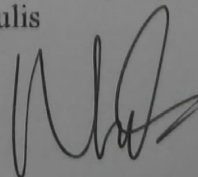
1. Ibu Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I, atas bimbingan, arahan, saran, serta motivasi yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
2. Ibu Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II, atas bimbingan, masukan, dan kesabaran dalam membimbing penulis hingga skripsi ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji, atas saran dan masukan yang membangun guna penyempurnaan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Si., selaku Pelaksana Tugas Ketua Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung, atas arahan, dukungan, serta fasilitas yang diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung, beserta seluruh jajaran pimpinan fakultas dan para wakil dekan, atas dukungan dan kebijakan akademik yang menunjang kelancaran studi penulis.

6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung atas ilmu pengetahuan dan pengalaman akademik yang telah diberikan selama masa perkuliahan
7. Staf dan laboran Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung, atas bantuan dan fasilitas yang diberikan selama kegiatan penelitian.
8. Teman-teman pimpinan HIMAFI Universitas Lampung periode 2023, atas kebersamaan, kerja sama, serta pengalaman berharga dalam menjalankan kepemimpinan organisasi selama lebih dari satu tahun, baik dalam suka maupun duka.
9. Teman-teman Fisika Instrumentasi 2021, yaitu Anis, Armel, Dina, Ega, Fathan, Feby, Gusti, Inayah, Ketrin, Lulu, Made, dan Okka, atas semangat, dukungan, serta kebersamaan yang senantiasa menguatkan penulis selama perjalanan akademik hingga penyelesaian tugas akhir ini.
10. Teman-teman seperjuangan Fisika Angkatan 2021, atas kebersamaan, dukungan, dan semangat selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung.
11. Para kreator konten dan streamer, yaitu Ade Setiawan, DeanKT, GEROMBALL, Luthfi Halimawan, dan Windah Basudara, atas hiburan, semangat, serta suasana positif yang secara tidak langsung menemani penulis selama proses pengerjaan skripsi.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ilmiah ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 10 Januari 2026

Penulis



Brilliant Naufal Farros

NPM. 2117041090

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Apel	15
2.3 <i>Fusarium oxysporum</i> sebagai Patogen Pascapanen	18
2.4 Mikroorganisme pada Apel.....	22
2.4.1 Komposisi Mikroflora Permukaan Apel	22
2.4.2 Kompetisi Mikroba dan Kondisi Lingkungan.....	23
2.4.3 Implikasi untuk Rancang Bangun Instrumentasi UV-C	23
2.4.4 Tantangan dan Studi Bandingan.....	24
2.5 Sinar Ultraviolet (UV).....	25
2.5.1 Mekanisme Fisika & Biologi	25
2.5.2 Aplikasi Pascapanen terhadap Buah & Tantangan	26
2.5.3 Implikasi untuk Rancang Bangun Alat Instrumentasi	27
2.6 <i>Dimmer</i> dalam Sistem Kendali Cahaya Ultraviolet	27
2.7 Penggunaan UV-C untuk Pengendalian Jamur pada Apel.....	31
2.8 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM).....	35
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	39
3.2 Alat dan Bahan	39
3.3 Prosedur Penelitian.....	41
3.4 Perancangan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>).....	44
3.4.1 Rangkaian Keseluruhan Sistem.....	45
3.4.2 Desain Alat Keseluruhan.....	47

3.5 Perancangan Perangkat Lunak (<i>Software</i>).....	48
3.6 Persiapan Kultur <i>Fusarium oxysporum</i>	50
3.6.1 Pembuatan Media Tumbuh <i>Fusarium oxysporum</i>	50
3.6.2 Persiapan Kultur <i>Fusarium oxysporum</i>	50
3.7 Uji Pengaruh Sinar UV-C terhadap Pertumbuhan <i>Fusarium oxysporum</i>	50
3.7.1 Kultivasi <i>Fusarium oxysporum</i> untuk Radiasi Sinar UV-C	50
3.7.2 Radiasi Sinar UV-C terhadap Kultur <i>Fusarium oxysporum</i>	51
3.8 Evaluasi Pengaruh Radiasi Sinar UV-C terhadap Pertumbuhan Miselia dan Tingkat Penghambatan <i>Fusarium oxysporum</i>	51
3.9 Sistem Kontrol Intensitas Cahaya	52
3.10 Pengambilan dan Pengujian Data Alat Sterilisasi	53
3.10.1 Pengujian Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Panjang Gelombang terhadap Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i>	54
3.10.2 Pengujian Efektivitas Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Intensitas Cahaya terhadap Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i>	55
3.11 Uji Efektivitas Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Panjang Gelombang terhadap Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i>	57
3.12 Uji Efektivitas Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Intensitas Cahaya terhadap Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i>	63

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Realisasi Alat	68
4.2 Pengujian Perangkat Keras	73
4.2.1 Tahap Inisialisasi Sistem.....	73
4.2.2 Tampilan Menu Utama dan Pemilihan Lampu UV-C	74
4.2.3 Pengujian Kontrol Lampu UV-C Berdasarkan Panjang Gelombang.....	74
4.2.3.1 Pengujian Kontrol Lampu UV-C (280 nm).....	75
4.2.3.2 Pengujian Kontrol Lampu UV-C (220 nm).....	76
4.2.3.3 Pengujian Kontrol Lampu UV-C (200 nm).....	76
4.2.4 Pengaturan dan Penyimpanan Waktu Penyinaran	77
4.2.5 Proses <i>Countdown</i> dan <i>Running</i> Sistem	78
4.2.6 Proses Selesai dan Pembatalan Manual	79
4.3 Perancangan Perangkat Lunak.....	80
4.3.1 Struktur Umum Program.....	81
4.3.2 Inisialisasi Sistem dan Tampilan Awal	82
4.3.3 Tampilan Menu Utama dan Navigasi <i>Keypad</i>	82
4.3.4 Pengaturan Intensitas Daya Lampu UV-C	83
4.3.5 Pengaturan Waktu Penyinaran.....	84

4.3.6 Proses Countdown dan Sistem Keamanan.....	84
4.3.7 Pembatalan Manual dan Akhiran Proses	85
4.4 Hasil Pengujian Kontrol (Variasi Panjang Gelombang).....	85
4.5 Hasil Pengujian Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C	88
4.6 Rata-rata dan Efektivitas Hasil Pengujian Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C terhadap Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i>	94
4.7 Hasil Pengujian Kontrol (Variasi Intensitas Cahaya).....	97
4.8 Hasil Pengujian Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C	99
4.9 Rata-rata dan Efektivitas Hasil Pengujian Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C terhadap Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i>	104

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan	109
5.2 Saran	109

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Alat yang digunakan dalam penelitian	39
3.2 Bahan yang digunakan dalam penelitian.....	40
3.3 Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian.....	41
3.4 Komponen rangkaian keseluruhan sistem.....	46
3.5 Spesifikasi box sterilisasi	48
3.6 Data Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C (Hari ke-1 hingga Hari ke-7).....	58
3.7 Laju Pertumbuhan Miselia (LPM) dan Persentase Penghambatan Pertumbuhan pada Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C.....	61
3.8 Data Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Intensitas Cahaya UV-C (Hari ke-1 hingga Hari ke-7)	64
3.9 Laju Pertumbuhan Miselia (LPM) dan Persentase Penghambatan Pertumbuhan <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C.....	66
4.1 Rata-rata pertumbuhan diameter miselium <i>Fusarium oxysporum</i> pada kelompok kontrol selama tujuh hari pengamatan (Variasi Panjang Gelombang).....	87
4.2 Rerata Diameter Miselium <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Panjang Gelombang UV-C (nm).....	92
4.3 Rata-rata LPM dan Persentase Penghambatan pada Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C (Intensitas 90 lux)	94
4.4 Rata-rata pertumbuhan diameter miselium <i>Fusarium oxysporum</i> pada kelompok kontrol selama tujuh hari pengamatan (Variasi Intensitas Cahaya)	98

4.5 Rerata Diameter Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Intensitas Cahaya UV-C Selama Tujuh Hari (lux).....	102
4.6 Rata-Rata LPM dan Persentase Penghambatan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Setiap Intensitas Cahaya UV-C.....	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Prototipe ruang desinfeksi UV-C. Tampilan (a) tanpa pencahayaan dan (b) setelah pencahayaan.....	6
2.2 Desain ruang sterilisasi UV-C yang terdiri dari: (A) penahan baki, (B) panel depan, (C-D, F) kipas pendingin, dan (E) saluran kabel.....	7
2.3 (a) Alat sterilisasi UV-C berbasis Arduino dan (b) rangkaian elektronik penyusunnya.....	8
2.4 Regulasi jalur metabolisme malat pada apel selama penyimpanan pada suhu 4 °C, 20 °C, dan perlakuan UV-C.....	10
2.5 Ringkasan tahapan perancangan perangkat disinfeksi permukaan.....	11
2.6 Efek paparan UV-C dosis 6,48 J/cm ² terhadap kulit tikus setelah 24 jam.....	13
2.7 Siklus penyakit <i>Fusarium</i> pascapanen pada buah tropis.....	14
2.8 Kontur intensitas radiasi permukaan pada model empat lampu dengan jarak horizontal 300 mm	16
2.9 Kontur intensitas radiasi pada permukaan mangga yang diposisikan sejajar (a) dan tegak lurus (b) terhadap lampu	17
2.10 Pengaruh dosis UV-C terhadap diameter miselium lima jenis jamur patogen pascapanen.....	19
2.11 Aktivitas metabolik relatif beberapa jenis jamur setelah perlakuan UV dan NTP pada 24 jam (A) dan 48 jam (B) setelah perlakuan	21
2.12 Komposisi mikroba pada permukaan apel selama penyimpanan	22
2.13 Rentang subwilayah spektrum UV yang digunakan dalam aplikasi teknologi dan fotoresepsi tumbuhan	24

2.14 Spora <i>Fusarium culmorum</i> tanpa perlakuan (A), setelah radiasi UV (B), dan setelah perlakuan NTP (C).....	26
2.15 (A) Jalur propagasi cahaya pada lampu merkuri tekanan rendah. (B) Simulasi <i>ray tracing</i> distribusi iradiasi pada unit UV-C, dengan gradasi warna menunjukkan tingkat fluensi	28
2.16 Kinetika inaktivasi UV-C 254 nm terhadap <i>E. coli</i> dan <i>L. innocua</i> pada tiga jarak sumber cahaya, serta perbandingan hasil pemodelan Weibull dengan data eksperimen	29
2.17 Spektrum puncak panjang gelombang UV-C dari lampu merkuri tekanan rendah dan UV-C LED	30
2.18 Simulasi <i>ray tracing</i> distribusi inaktivasi <i>E. coli</i> pada tiga posisi uji dengan paparan UV-C selama 120 detik	31
2.19 Pengaruh variasi dosis UV-C terhadap tingkat keparahan <i>crown rot</i> pada apel selama penyimpanan.....	32
2.20 Ringkasan penelitian penggunaan UV-C pada buah dan sayuran pascapanen, termasuk apel	33
2.21 Perbandingan kandungan gula dan asam organik pada apel di bawah penyimpanan suhu berbeda dan perlakuan UV-C	34
2.22 Pengaruh dosis UV-C terhadap produksi spora relatif beberapa jenis jamur patogen pascapanen.....	35
2.23 (a) Diagram alir sinyal dan (b) bentuk gelombang fasa a	37
2.24 Diagram kerangka estimasi kerentanan variabel tingkat tinggi.....	37
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	43
3.2 Diagram blok sistem box sterilisasi UV-C berbasis <i>Arduino Uno R3</i>	44
3.3 Rangkaian keseluruhan sistem box sterilisasi UV-C berbasis <i>Arduino Uno R3</i>	46
3.4 Desain alat keseluruhan box sterilisasi UV-C berbasis <i>Arduino Uno R3</i>	47
3.5 Perancangan perangkat lunak (software) box sterilisasi UV-C berbasis <i>Arduino Uno R3</i>	49

3.6 Kultivasi untuk radiasi sinar UV = potongan agar dari kultur usia 7 hari; PDA = media <i>Potato Dextrose Agar</i> dalam cawan Petri	51
3.7 Pengukuran diameter miselia.....	52
3.8 (a) Tampilan menu utama panel kontrol intensitas cahaya, dan (b) Tampilan konfirmasi penyimpanan nilai intensitas cahaya.....	53
3.9 Posisi empat cawan petri berisi jamur <i>Fusarium oxysporum</i> sejauh 20 cm dari sumber sinar UV-C di dalam box sterilisasi	55
3.10 Posisi cawan petri berisi jamur <i>Fusarium oxysporum</i> pada variasi intensitas cahaya sinar UV-C sejauh 20 cm dari sumber radiasi di dalam box sterilisasi	56
3.11 Grafik Pertumbuhan Miselia pada λ 200, 220, 280 nm.....	59
3.12 Grafik Pertumbuhan Miselia pada Kontrol (Tanpa UV-C).....	59
3.13 Grafik Gabungan Panjang Gelombang + Kontrol	60
3.14 Grafik Persentase Penghambatan Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> terhadap Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C	62
3.15 <i>Lux Meter</i> Digital LX1010B.....	64
3.16 Grafik Pertumbuhan Miselia pada Intensitas 10 lux hingga 90 lux.....	65
3.17 Grafik Pertumbuhan Miselia pada Kontrol	65
3.18 Grafik Gabungan Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C dan Kontrol.....	66
3.19 Grafik Persentase Penghambatan Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> terhadap Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C	67
4.1 Realisasi alat sterilisasi otomatis berbasis <i>Arduino Uno R3</i>	69
4.2 Panel kontrol sistem kendali alat sterilisasi otomatis berbasis <i>Arduino Uno R3</i>	71
4.3 Alat sterilisasi otomatis berbasis <i>Arduino Uno R3</i> yang telah terintegrasi dengan box sterilisasi UV-C	72

4.4 Tampilan awal alat saat inisialisasi sistem	73
4.5 Tampilan menu utama alat.....	74
4.6 Tampilan saat Lampu 1 aktif (280 nm)	75
4.7 Konfirmasi penyimpanan daya Lampu 1	75
4.8 Tampilan saat Lampu 2 aktif (220 nm)	76
4.9 Konfirmasi penyimpanan daya Lampu 2	76
4.10 Tampilan saat Lampu 3 aktif (200 nm)	76
4.11 Konfirmasi penyimpanan daya Lampu 3.....	77
4.12 Tampilan pengaturan waktu penyinaran.....	77
4.13 Tampilan saat input waktu maksimum (03:00:00).....	78
4.14 Konfirmasi waktu tersimpan dan hasil waktu disimpan (03:00:00)	78
4.15 Tampilan saat proses <i>countdown</i> dimulai.....	79
4.16 Tampilan proses running waktu dan status lampu aktif (L1, L2, L3 = 90%)	79
4.17 Tampilan setelah proses selesai (lampu dimatikan)	80
4.18 Tampilan saat <i>countdown</i> dibatalkan secara manual.....	80
4.19 Hasil akhir pertumbuhan jamur <i>Fusarium oxysporum</i> pada kelompok kontrol tanpa penyinaran: (a) ulangan 1, (b) ulangan 2, (c) ulangan 3, dan (d) ulangan 4	86
4.20 Grafik pertumbuhan diameter miselium <i>Fusarium oxysporum</i> pada kelompok kontrol selama tujuh hari	87
4.21 Hasil akhir pertumbuhan jamur <i>Fusarium oxysporum</i> setelah tujuh hari penyinaran sinar UV-C dengan variasi panjang gelombang: (ad) 200 nm ulangan 1-4, (e-h) 220 nm ulangan 1-4, dan (i-l) 280 nm ulangan 1-4	90
4.22 Grafik Pertumbuhan Diameter Miselium pada λ 200 nm, 220 nm, 280 nm, dan Kontrol.....	93

4.23 Grafik Persentase Penghambatan Pertumbuhan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> terhadap Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C.....	95
4.24 Hasil akhir pertumbuhan jamur <i>Fusarium oxysporum</i> pada kelompok kontrol tanpa penyinaran UV-C.....	97
4.25 Grafik pertumbuhan diameter miselium <i>Fusarium oxysporum</i> pada kelompok kontrol selama tujuh hari	98
4.26 Hasil akhir pertumbuhan miselium <i>Fusarium oxysporum</i> pada variasi intensitas cahaya 10-90 lux: (a) 10 lux, (b) 20 lux, (c) 30 lux, (d) 40 lux, (e) 50 lux, (f) 60 lux, (g) 70 lux, (h) 80 lux, (i) 90 lux	100
4.27 Grafik Pertumbuhan Diameter Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Intensitas Cahaya UV-C.....	103
4.28 Persentase Penghambatan Miselia <i>Fusarium oxysporum</i> pada Variasi Intensitas Cahaya UV-C.....	107

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Apel (*Malus domestica*) merupakan salah satu buah yang paling banyak dikonsumsi di dunia karena kandungan nutrisinya yang kaya, seperti serat, vitamin C, dan senyawa polifenol dengan sifat antioksidan tinggi (Boyer & Liu, 2004). Menurut Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2021), produksi apel global mencapai lebih dari 85 juta ton per tahun, menjadikannya salah satu komoditas hortikultura dengan nilai ekonomi tinggi. Permintaan apel terus meningkat, termasuk di negara berkembang seperti Indonesia, seiring dengan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya konsumsi buah untuk menunjang kesehatan. Meskipun memiliki nilai ekonomi dan gizi yang tinggi, apel termasuk produk hortikultura yang sangat rentan terhadap kerusakan pascapanen. Infeksi mikroorganisme patogen, terutama jamur, merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan kualitas buah, kehilangan hasil, dan bahkan kerugian ekonomi signifikan. Di antara patogen tersebut, *Fusarium oxysporum* dikenal sebagai penyebab penyakit pascapanen penting pada berbagai buah, termasuk apel (Khatri *et al.*, 2022). Infeksi *Fusarium oxysporum* dapat menyebabkan pembusukan jaringan buah, menurunkan mutu organoleptik, serta mengurangi daya simpan apel. Kondisi iklim tropis Indonesia dengan suhu tinggi dan kelembapan relatif yang tinggi semakin memperparah risiko pertumbuhan jamur selama penyimpanan dan distribusi (Hasan *et al.*, 2021). Upaya pengendalian jamur pascapanen secara konvensional umumnya mengandalkan penggunaan fungisida kimia. Walaupun efektif, metode ini memiliki sejumlah kelemahan, seperti adanya residu kimia pada buah, risiko toksik bagi konsumen, pencemaran lingkungan, serta potensi timbulnya resistensi patogen terhadap senyawa aktif (Darré *et al.*, 2022).

Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengendalian yang ramah lingkungan, aman, dan tetap efektif menekan pertumbuhan jamur. Salah satu metode non-kimia yang mulai banyak diteliti adalah penggunaan sinar *Ultraviolet*, khususnya UV-C dengan panjang gelombang 200-280 nm. Sinar UV-C memiliki sifat germisidal karena mampu merusak DNA mikroorganisme melalui pembentukan *thymine dimer* sehingga menghambat replikasi sel dan pertumbuhan patogen (Dai *et al.*, 2012). Berbeda dengan fungisida kimia, UV-C tidak meninggalkan residu berbahaya sehingga lebih aman untuk konsumen. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa perlakuan UV-C pada buah apel dapat menekan pertumbuhan mikroba hingga lebih dari 90% tanpa mengurangi kualitas fisik dan nutrisi buah (Onik *et al.*, 2019). Efektivitas sinar UV-C sangat bergantung pada kombinasi parameter utama, yaitu panjang gelombang dan intensitas cahaya (Belloli *et al.*, 2022). Apabila intensitas paparan terlalu tinggi, kualitas fisik buah dapat terganggu, misalnya perubahan warna, tekstur, atau penurunan nutrisi (Zhou *et al.*, 2014). Sebaliknya, apabila dosis terlalu rendah, kemampuan UV-C dalam menekan pertumbuhan mikroorganisme menjadi tidak optimal. Oleh sebab itu, diperlukan sistem pengendalian yang presisi agar dapat menemukan parameter terbaik tanpa merusak kualitas buah. Dari perspektif instrumentasi, mikrokontroler seperti *Arduino Uno R3* dapat digunakan untuk mengatur variasi panjang gelombang dan intensitas UV-C secara otomatis. *Arduino Uno R3* memungkinkan integrasi dengan sensor dan rangkaian kendali, sehingga parameter penyinaran dapat dikontrol secara real-time. Teknologi ini telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian untuk mengendalikan sistem optik dan elektronik dengan presisi tinggi (Chen *et al.*, 2021). Penerapan mikrokontroler dalam sistem sterilisasi pascapanen berpotensi menghasilkan protokol penyinaran yang konsisten, akurat, dan efisien. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada rancang bangun dan optimasi alat sterilisasi otomatis apel pascapanen menggunakan sinar UV-C berbasis *Arduino Uno R3* melalui kontrol panjang gelombang dan intensitas cahaya terhadap jamur *Fusarium oxysporum*. Dengan penelitian ini diharapkan dapat diperoleh parameter optimal untuk menekan pertumbuhan jamur sekaligus mempertahankan kualitas buah apel, serta memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi pascapanen yang ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana parameter panjang gelombang dan intensitas cahaya dapat dikendalikan menggunakan *Arduino Uno R3* dalam sistem sterilisasi apel pascapanen?
2. Bagaimana efektivitas sinar UV-C pada panjang gelombang 200 nm, 220 nm, dan 280 nm dalam menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel pascapanen?
3. Bagaimana pengaruh variasi intensitas cahaya UV-C terhadap pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel pascapanen?
4. Bagaimana hasil pengendalian jamur *Fusarium oxysporum* pada kelompok perlakuan (disinari UV-C) dibandingkan dengan kelompok kontrol (tidak disinari)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem sterilisasi apel pascapanen berbasis *Arduino Uno R3* yang dapat mengendalikan panjang gelombang dan intensitas cahaya sinar UV-C.
2. Menentukan efektivitas panjang gelombang 200 nm, 220 nm, dan 280 nm dalam menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel pascapanen.
3. Menentukan pengaruh variasi intensitas cahaya UV-C terhadap pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel pascapanen.
4. Membandingkan hasil pengendalian jamur *Fusarium oxysporum* pada apel antara kelompok perlakuan (disinari UV-C) dan kelompok kontrol (tidak disinari).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan alternatif pengendalian jamur pascapanen yang ramah lingkungan dan bebas residu kimia melalui penerapan teknologi sinar UV-C berbasis *Arduino Uno R3*.

2. Memberikan pemahaman ilmiah mengenai pengaruh panjang gelombang dan intensitas cahaya UV-C terhadap pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel.
3. Menjadi referensi tambahan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, khususnya dalam Kelompok Bidang Keahlian (KBK) Fisika Instrumentasi, terkait penerapan teknologi optik dan mikrokontroler pada bidang pangan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Panjang gelombang sinar UV-C yang digunakan adalah 200 nm, 220 nm, dan 280 nm.
2. Waktu paparan cahaya UV-C ditetapkan konstan selama 3 jam untuk setiap perlakuan.
3. Intensitas cahaya UV-C yang diuji adalah 10 lux, 20 lux, 30 lux, 40 lux, 50 lux, 60 lux, 70 lux, 80 lux, dan 90 lux.
4. Setiap perlakuan panjang gelombang dan kelompok kontrol dilakukan sebanyak empat kali pengulangan.
5. Objek penelitian adalah buah apel varietas *Fuji* yang diinokulasi dengan jamur *Fusarium oxysporum*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian yang dilakukan oleh Mohsin *et al.* (2024) merancang dan memvalidasi sebuah *chamber* iluminasi UV-C yang dibangun menggunakan lampu germisida komersial dan komponen lokal berbiaya rendah untuk tujuan dekontaminasi biologis. Alat ini mampu menghasilkan iluminasi merata sekitar 1 J/cm² dalam waktu kurang dari 5 menit, dengan sistem kontrol otomatis yang dirancang untuk meningkatkan keamanan kesehatan dan kelistrikan. Efektivitas dekontaminasi diuji menggunakan uji kultur spora *Geobacillus* serta pengukuran *viral load* melalui identifikasi gen spesifik COVID-19 (*N-gene* dan *ORF1 gene*) pada masker bedah, dengan metode *RT-qPCR* sebagai standar emas. Selain itu, uji biokimia juga dilakukan untuk mendeteksi keberadaan bakteri dan jamur pada kelompok kontrol dan perlakuan sebelum serta sesudah paparan UV-C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *chamber* ini memiliki kemampuan dekontaminasi yang memuaskan terhadap berbagai mikroorganisme, termasuk virus SARS-CoV-2, bakteri, dan jamur. Oleh karena itu, perangkat ini dinilai potensial untuk diterapkan dalam fasilitas kesehatan sebagai alat disinfeksi yang efektif dan praktis, khususnya dalam dekontaminasi peralatan pelindung diri (*PPE*) seperti masker N95, KN95, maupun masker bedah, serta perlindungan terhadap patogen umum lainnya. Tampilan prototipe ruang desinfeksi UV-C ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.

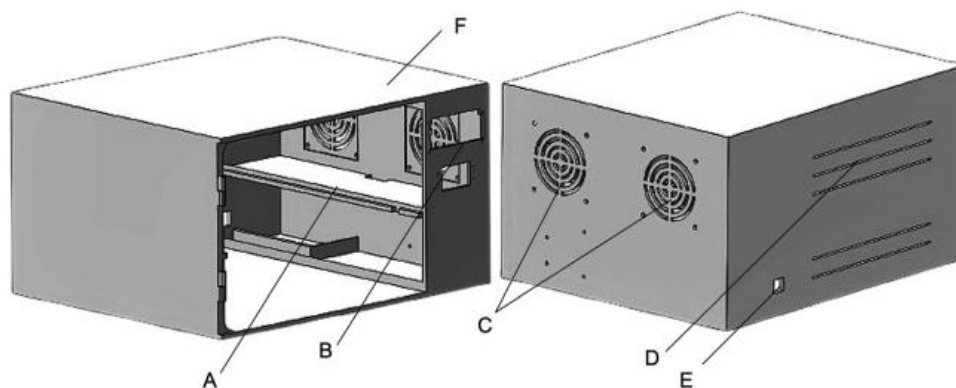


Gambar 2.1 Prototipe ruang desinfeksi UV-C. Tampilan (a) tanpa pencahayaan dan (b) setelah pencahayaan (Mohsin *et al.*, 2024).

Pada **Gambar 2.1** memperlihatkan prototipe final ruang desinfeksi berbasis sinar UV-C yang digunakan untuk mendukung proses sterilisasi pada objek atau permukaan tertentu. Pada bagian kiri (a) ditunjukkan kondisi ruang tanpa pencahayaan, sehingga detail struktur fisik, dimensi, dan tata letak ruang dapat diamati dengan jelas. Sedangkan pada bagian kanan (b) diperlihatkan kondisi ruang setelah pencahayaan, di mana lampu UV-C menyala dan memancarkan radiasi yang memenuhi area bagian dalam ruang, menandakan aktifnya proses disinfeksi. Perbedaan visual antara kedua kondisi tersebut tidak hanya menunjukkan fungsi dasar dari ruang UV-C, tetapi juga memberikan gambaran nyata mengenai efektivitas rancangan dalam menciptakan lingkungan tertutup yang optimal untuk proses sterilisasi modern dengan tingkat keamanan dan efisiensi yang lebih baik.

Penelitian yang dilakukan oleh Mohsin *et al.* (2024) mengembangkan *chamber* disinfeksi berbasis *Ultraviolet-C Light Emitting Diode (UV-C LED)* sebagai alternatif terhadap lampu merkuri konvensional yang memiliki berbagai keterbatasan, seperti dampak lingkungan dan umur pakai yang terbatas. Dalam studi tersebut, sistem *chamber* dirancang menggunakan *LED 275 nm Surface Mount Device (SMD)* yang dikontrol dengan variasi modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation/PWM*) untuk menghasilkan intensitas radiasi yang berbeda, lalu diuji efektivitasnya terhadap bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi PWM berpengaruh signifikan terhadap tingkat inaktivasi mikroorganisme, dengan reduksi $2,05\text{-log}_{10}$ untuk *E.*

coli dan $1,54\text{-log}_{10}$ untuk *S. aureus* pada dosis paparan $51,24\text{ mJ/cm}^2$. Analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) juga memperlihatkan kerusakan sel berupa *bleb protrusion* dan kebocoran membran, yang mengindikasikan kerusakan DNA bakteri. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan UV-C LED dengan kontrol intensitas berbasis PWM memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi sterilisasi, sehingga dapat diadaptasi pada sistem otomatis termasuk dalam pengendalian jamur patogen pascapanen seperti *Fusarium oxysporum*. Desain ruang sterilisasi UV-C beserta komponen penyusunnya ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



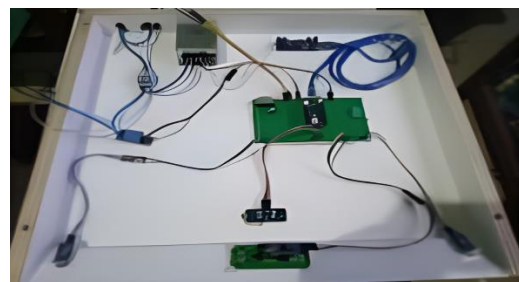
Gambar 2.2 Desain ruang sterilisasi UV-C yang terdiri dari: (A) penahan baki, (B) panel depan, (C-D, F) kipas pendingin, dan (E) saluran kabel (Mohsin *et al.*, 2024).

Pada **Gambar 2.2** menunjukkan pertimbangan desain utama dari ruang (*chamber*) desinfeksi yang dirancang untuk mengoptimalkan kinerja perangkat berbasis sinar UV-C. Bagian (A) merupakan penahan baki (*tray holder*) yang berfungsi untuk menempatkan objek secara stabil di dalam *chamber*, sedangkan bagian (B) adalah panel depan yang berperan sebagai akses utama dalam proses memasukkan dan mengeluarkan sampel. Bagian (C, D, dan F) adalah kipas pendingin yang ditempatkan di sisi belakang dan samping untuk menjaga sirkulasi udara serta mengontrol suhu ruang agar tetap stabil ketika lampu UV-C menyala. Adapun bagian (E) berfungsi sebagai saluran keluar kabel (*wiring outlet*) yang dirancang secara rapi untuk menjamin keamanan serta meminimalkan gangguan pada sistem elektronik. Secara keseluruhan, komponen tersebut menegaskan bahwa rancangan *chamber* tidak hanya mempertimbangkan aspek fungsional, tetapi juga memperhatikan keamanan, efisiensi, dan keandalan sistem sterilisasi. Penelitian

yang dilakukan oleh Yusro *et al.* (2022) berfokus pada perancangan dan pembangunan alat sterilisasi berbasis sinar UV-C dengan sistem kendali menggunakan *Arduino MKR WiFi 1010*. Alat tersebut dirancang agar dapat beroperasi secara otomatis tanpa sentuhan langsung dengan memanfaatkan sensor inframerah *proximity* dan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk meminimalkan penyebaran mikroorganisme melalui kontak fisik. Komponen utama yang digunakan meliputi lampu UVGI, LCD 16×2, serta motor stepper yang dikendalikan *driver* A4988 sebagai aktuator mekanik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan waktu sterilisasi berbanding lurus dengan penurunan jumlah koloni bakteri yang tumbuh, sehingga membuktikan efektivitas sinar UV-C sebagai agen sterilisasi. Selain itu, teknologi ini relevan dalam konteks pandemi Covid-19 karena mampu mengurangi risiko penyebaran virus melalui benda sehari-hari. Konsep perancangan alat sterilisasi otomatis tersebut dapat dijadikan rujukan dalam pengembangan sistem berbasis *Arduino* untuk aplikasi pascapanen, khususnya dalam menghambat pertumbuhan jamur patogen seperti *Fusarium oxysporum* pada produk hortikultura. Alat sterilisasi UV-C berbasis *Arduino* ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



(a)

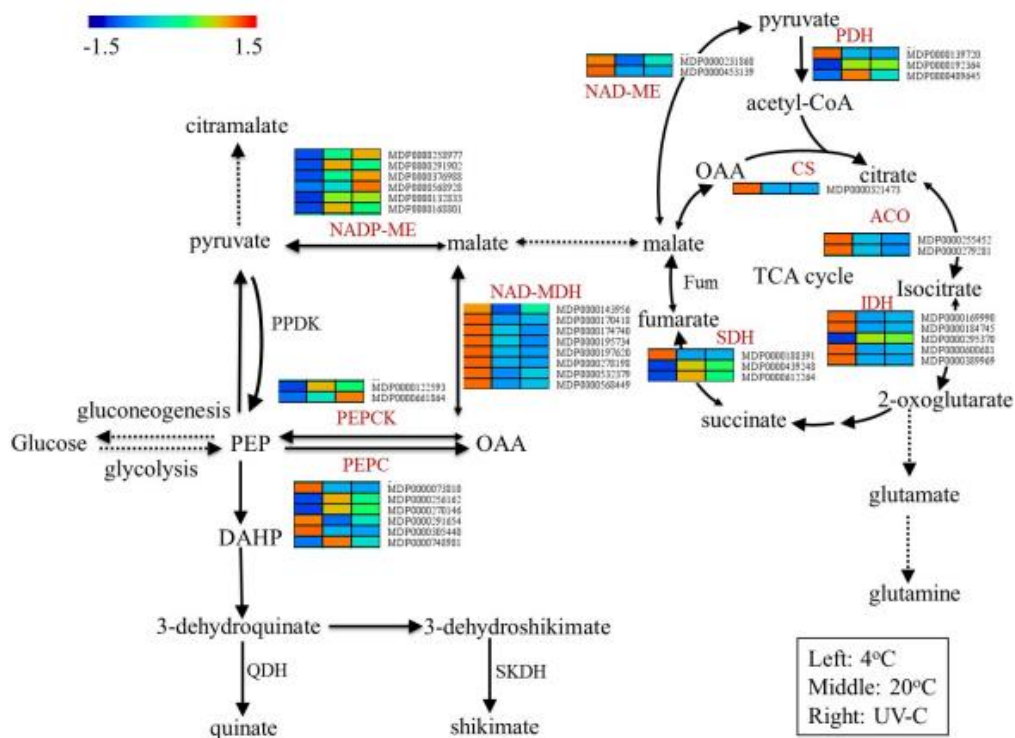


(b)

Gambar 2.3 (a) Alat sterilisasi UV-C berbasis *Arduino* dan (b) rangkaian elektronik penyusunnya (Yusro *et al.*, 2022).

Pada **Gambar 2.3** memperlihatkan sebuah rancangan alat sterilisasi berbasis sinar UV-C dengan sistem kendali menggunakan mikrokontroler *Arduino*. Bagian (a) menampilkan bentuk fisik alat sterilisasi yang dirancang untuk mensterilkan objek melalui paparan sinar UV-C, sedangkan bagian (b) menunjukkan rangkaian

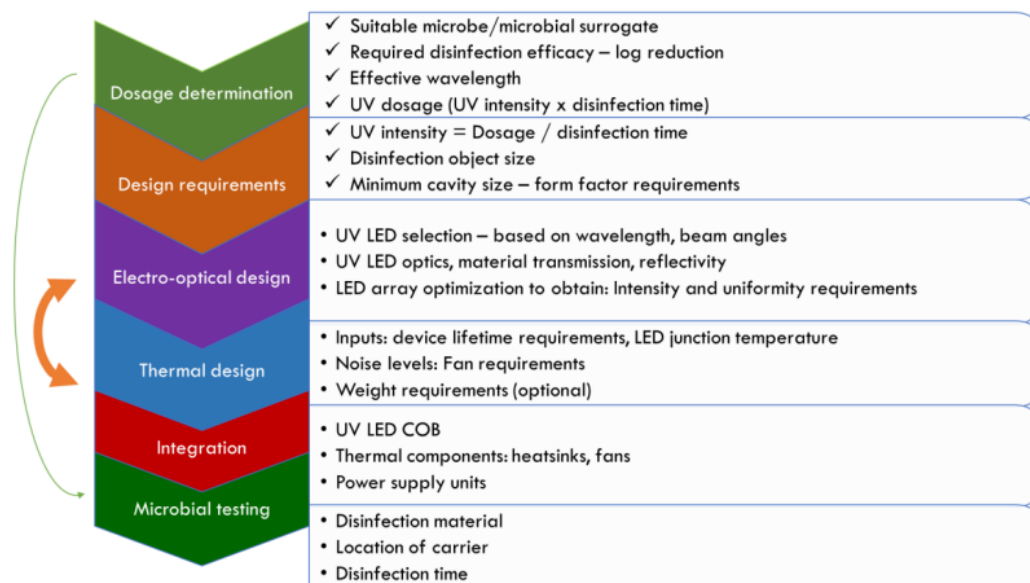
elektronik yang berfungsi mengatur kerja lampu UV-C secara otomatis melalui kendali mikrokontroler. Desain ini menekankan integrasi antara aspek mekanik dan elektronik guna menghasilkan sistem sterilisasi otomatis yang efektif dan dapat diimplementasikan dalam berbagai aplikasi desinfeksi. Penelitian yang dilakukan oleh Onik *et al.* (2019) mengkaji pengaruh perlakuan sinar UV-C terhadap kualitas buah apel varietas Hongyu yang termasuk dalam kategori apel matang awal dengan umur simpan relatif singkat. Dalam penelitian tersebut, apel dipanen pada umur 120 hari setelah *full bloom* kemudian diberi perlakuan penyimpanan pada suhu 4°C, 20°C, serta perlakuan UV-C yang dilanjutkan dengan penyimpanan pada suhu 20°C. Selanjutnya, dilakukan pengukuran kandungan gula sederhana (glukosa, sukrosa, dan fruktosa) serta asam organik (malat dan oksalat) setelah 14 hari penyimpanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan malat meningkat signifikan pada penyimpanan suhu rendah (4°C), tetapi menurun signifikan pada perlakuan UV-C, sementara kandungan gula relatif stabil pada semua kondisi perlakuan. Penurunan kandungan malat tersebut berdampak pada peningkatan rasio gula terhadap asam sehingga memperbaiki cita rasa buah dengan rasa lebih manis dan tingkat keasaman yang lebih rendah, tanpa mengurangi kandungan kualitas lainnya. Analisis transkriptom lebih lanjut mengungkap bahwa perlakuan UV-C mengatur ekspresi gen terkait metabolisme malat, khususnya *NADP malic enzyme* (NADP-ME) dan *phosphoenolpyruvate carboxylase kinase* (PEPCK), yang berperan penting dalam proses degradasi malat selama penyimpanan. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa perlakuan UV-C memiliki potensi besar sebagai teknologi pascapanen untuk memperbaiki mutu organoleptik apel matang awal melalui mekanisme regulasi biokimia dan molekuler, serta dapat diterapkan sebagai strategi peningkatan kualitas dan nilai konsumsi buah dengan daya simpan terbatas. Regulasi jalur metabolisme malat pada apel selama penyimpanan ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Regulasi jalur metabolisme malat pada apel selama penyimpanan pada suhu 4 °C, 20 °C, dan perlakuan UV-C (Onik *et al.*, 2019).

Pada **Gambar 2.4** memperlihatkan regulasi jalur metabolisme malat pada apel yang disimpan dengan variasi suhu dan perlakuan paparan sinar UV-C selama masa penyimpanan pascapanen. Tiga kotak yang ditampilkan secara berurutan dari kiri ke kanan merepresentasikan kondisi penyimpanan pada suhu rendah 4 °C, suhu ruang 20 °C, serta perlakuan sinar UV-C. Jalur metabolisme tersebut melibatkan sejumlah enzim penting, di antaranya *Aconitase* (ACO), *Citrate Synthase* (CS), *Isocitrate Dehydrogenase* (IDH), *Phosphoenolpyruvate Carboxylase* (PEPC), *Phosphoenolpyruvate Carboxylase Kinase* (PEPCK), *Pyruvate Dehydrogenase* (PDH), *NAD-Malate Dehydrogenase* (NAD-MDH), *NADP-Malic Enzyme* (NADP-ME), *Pyruvate Orthophosphate Dikinase* (PPDK), *Succinate Dehydrogenase* (SDH), serta *Shikimate Dehydrogenase* (SKDH). Variasi suhu dan paparan UV-C pada jalur metabolisme tersebut berperan dalam mengatur aktivitas enzim-enzim kunci, sehingga menentukan dinamika degradasi maupun akumulasi malat yang secara langsung berkaitan dengan kualitas organoleptik serta ketahanan buah apel selama penyimpanan. Penelitian yang dilakukan oleh Sharma *et al.* (2022) membahas pertimbangan desain dalam pengembangan perangkat desinfeksi

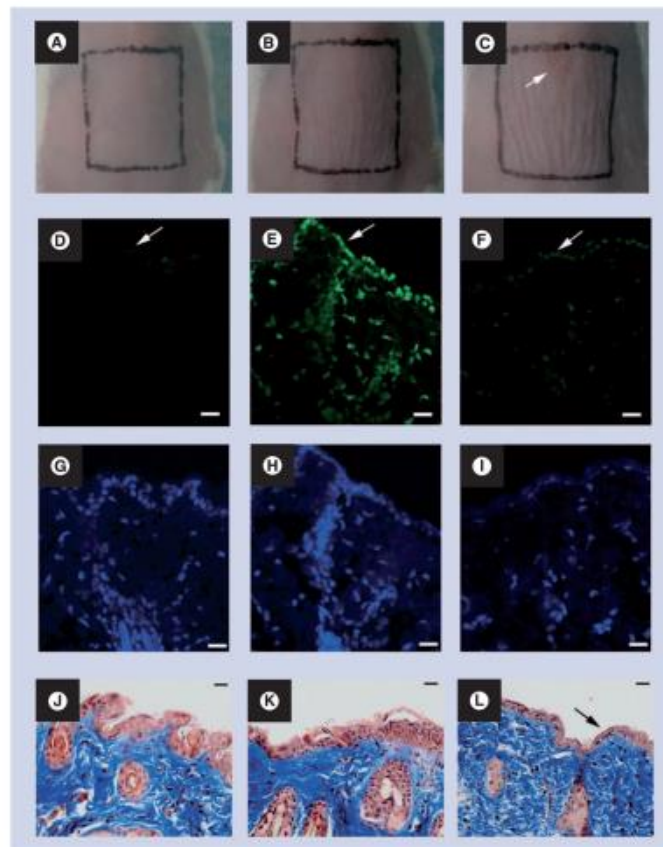
permukaan berbasis *Ultraviolet-C Light Emitting Diodes* (UV-C LED) sebagai alternatif dari lampu merkuri konvensional. Studi ini menekankan pentingnya pemilihan parameter desain yang tepat, meliputi aspek optik, termal, serta validasi mikroba, agar perangkat yang dihasilkan mampu mencapai efisiensi sterilisasi yang optimal. Melalui simulasi optik dan termal, peneliti mengidentifikasi tantangan teknis utama yang perlu diatasi, seperti distribusi cahaya yang merata pada permukaan target dan pengelolaan panas untuk menjaga stabilitas sistem. Hasil validasi prototipe memperlihatkan bahwa UV-C LED mampu menonaktifkan berbagai mikroorganisme penyebab penyakit dengan efektivitas yang sebanding, bahkan lebih fleksibel dibandingkan dengan lampu merkuri. Penelitian ini menegaskan bahwa UV-C LED tidak hanya menghadirkan desain yang lebih ringkas dan ramah lingkungan, tetapi juga relevan dalam mendukung teknologi sterilisasi otomatis, yang berpotensi besar untuk diadaptasi pada aplikasi pascapanen dalam menghambat pertumbuhan jamur patogen seperti *Fusarium oxysporum* pada produk hortikultura. Tahapan perancangan perangkat disinfeksi permukaan ditunjukkan pada **Gambar 2.5**



Gambar 2.5 Ringkasan tahapan perancangan perangkat disinfeksi permukaan (Sharma *et al.*, 2022).

Pada **Gambar 2.5** menampilkan alur ringkas proses perancangan perangkat disinfeksi permukaan yang disusun secara sistematis mulai dari tahap identifikasi kebutuhan hingga implementasi akhir. Proses perancangan mencakup pemetaan masalah, perumusan spesifikasi desain, pemilihan sumber cahaya *Ultraviolet* yang

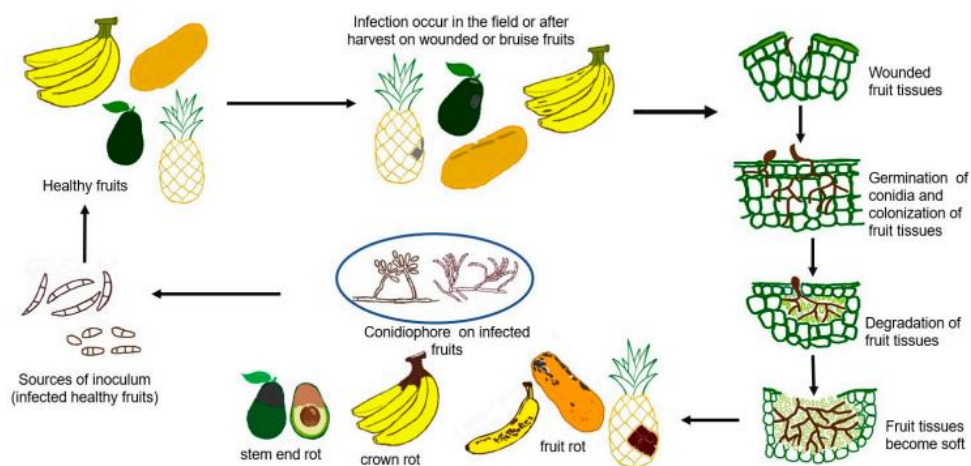
sesuai, serta integrasi dengan sistem pengendalian elektronik. Selain itu, alur perancangan juga mempertimbangkan aspek keamanan, efisiensi energi, dan efektivitas dalam menonaktifkan mikroorganisme pada permukaan target. Dengan pendekatan yang bertahap dan terukur, rancangan perangkat disinfeksi diharapkan mampu menghadirkan solusi praktis dan andal untuk mendukung kebutuhan sterilisasi modern pada berbagai aplikasi, termasuk di bidang pascapanen. Penelitian yang dilakukan oleh Dai *et al.* (2012) dalam tinjauan literturnya membahas potensi radiasi *Ultraviolet C* (UV-C) sebagai pendekatan alternatif dalam terapi infeksi lokal, khususnya yang disebabkan oleh mikroorganisme multiresisten. Studi tersebut mengungkapkan bahwa baik bakteri resisten maupun non-resisten memiliki tingkat sensitivitas yang setara terhadap paparan UV-C, sehingga teknologi ini menjanjikan sebagai strategi non-antibiotik untuk mengatasi infeksi. Dengan pengaturan dosis yang tepat, paparan UV-C terbukti mampu menonaktifkan mikroorganisme tanpa mengganggu viabilitas sel mamalia, bahkan dapat mendukung percepatan proses penyembuhan luka. Dibandingkan dengan UV-B, radiasi UV-C pada jaringan hewan menimbulkan kerusakan relatif lebih rendah, sementara potensi kerusakan DNA pada sel mamalia dapat segera diperbaiki melalui mekanisme enzim perbaikan DNA. Meski demikian, penggunaan berlebihan tetap berisiko memunculkan resistensi mikroba terhadap inaktivasi UV-C. Oleh karena itu, para penulis menekankan pentingnya pengembangan lebih lanjut teknologi UV-C sebagai metode antimikroba inovatif yang efektif, aman, serta disertai strategi penggunaan untuk meminimalkan efek samping dan mencegah terbentuknya resistensi baru. Efek paparan UV-C dosis 6,48 J/cm² terhadap kulit tikus setelah 24 jam ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Efek paparan UV-C dosis $6,48 \text{ J/cm}^2$ terhadap kulit tikus setelah 24 jam (Dai *et al.*, 2012).

Pada **Gambar 2.6** tersebut memperlihatkan efek paparan UV-C pada dosis $6,48 \text{ J/cm}^2$ terhadap kulit tikus dengan membandingkan kondisi sebelum, sesaat setelah, dan 24 jam pascaperlakuan. Pada panel morfologi terlihat terbentuknya lesi pada kulit, sementara hasil imunofluoresensi menunjukkan keberadaan *cyclobutane pyrimidine dimers* pada inti sel sebagai indikator kerusakan DNA. Pewarnaan *counterstain* DAPI mengonfirmasi struktur inti sel, sedangkan pewarnaan *Masson's trichrome* mengungkap adanya perubahan jaringan berupa penyusutan epidermis. Secara keseluruhan, gambar ini mengilustrasikan dampak langsung sekaligus progresif dari radiasi UV-C terhadap integritas seluler dan jaringan kulit tikus. Penelitian yang dilakukan oleh Zakaria (2023) meninjau berbagai spesies *Fusarium* yang berasosiasi dengan penyakit pada komoditas buah tropis utama seperti mangga, pisang, pepaya, nanas, dan alpukat, baik pada fase budidaya maupun pascapanen. Patogen ini diketahui menyebabkan beragam penyakit serius, antara lain busuk akar, layu vaskular, busuk batang, hingga busuk buah, yang

berdampak langsung terhadap hasil produksi dan kualitas komoditas. Di antara spesies yang paling umum serta memiliki signifikansi ekonomi tinggi adalah *Fusarium oxysporum* dan *Fusarium solani*, disusul spesies lain seperti *F. incarnatum*, *F. proliferatum*, dan *F. verticillioides* yang juga banyak ditemukan di wilayah tropis. Karakteristik penting kelompok jamur ini adalah kemampuan berinangnya yang luas serta kecenderungannya menginfeksi berbagai bagian tanaman, sehingga menyulitkan penerapan strategi pengendalian yang efektif. Kajian ini menekankan pentingnya pembaruan informasi mengenai spesies *Fusarium* pada tanaman buah tropis, mengingat pengelolaan penyakit di lapangan maupun pascapanen sangat bergantung pada pemahaman mengenai patogen penyebab. Selain itu, perdagangan internasional buah tropis meningkatkan urgensi pemantauan serta identifikasi spesies baru terkait *Fusarium* sebagai bagian dari upaya menjaga biosekuriti. Dengan demikian, informasi yang akurat mengenai penyakit dan patogen penyebabnya diharapkan dapat membantu diagnosis rutin sekaligus mendukung perencanaan metode pengendalian penyakit tanaman yang lebih tepat dan berkelanjutan. Siklus penyakit *Fusarium* pascapanen pada buah tropis ditunjukkan pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Siklus penyakit *Fusarium* pascapanen pada buah tropis (Zakaria, 2023).

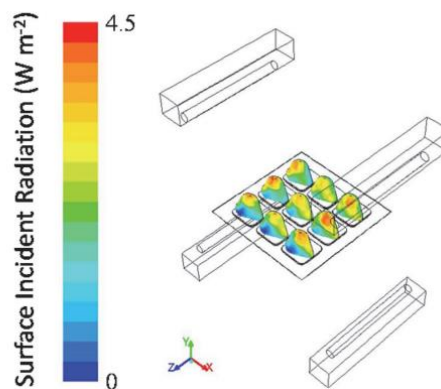
Pada **Gambar 2.7** menggambarkan siklus penyakit *Fusarium* pascapanen pada tanaman buah tropis utama menurut Zakaria (2023). Siklus diawali dengan tahap infeksi ketika spora jamur menempel pada permukaan buah dan menembus jaringan inang melalui luka atau celah alami. Setelah itu, jamur melakukan kolonisasi di

dalam jaringan yang memicu kerusakan fisiologis, ditandai dengan munculnya gejala khas berupa bercak, busuk, atau pelunakan jaringan yang menurunkan mutu buah. Pada tahap selanjutnya, jamur menghasilkan spora baru yang kemudian menyebar melalui udara, air, maupun kontak langsung antarbuah selama penyimpanan dan distribusi. Spora tersebut kemudian menginfeksi inang baru, sehingga siklus penyakit berulang dan menyebabkan kerugian signifikan pada hasil pascapanen, baik dari segi kualitas maupun kuantitas buah tropis. Dengan demikian, pemahaman mengenai siklus infeksi *Fusarium* ini menjadi dasar penting dalam merancang strategi pengendalian yang lebih efektif, termasuk melalui pendekatan teknologi sterilisasi berbasis sinar UV-C untuk menghambat pertumbuhan patogen pada komoditas hortikultura.

2.2 Apel

Apel (*Malus domestica*) merupakan salah satu buah hortikultura yang memiliki peranan penting baik dalam aspek pangan maupun ekonomi global. Buah ini dikenal sebagai sumber nutrisi yang kaya akan serat pangan, vitamin C, serta berbagai senyawa bioaktif dan antioksidan, seperti *flavonoid* dan *polifenol*, yang berkontribusi terhadap peningkatan kesehatan manusia serta pencegahan penyakit degeneratif (Boyer & Liu, 2004). Namun demikian, apel sebagai komoditas hortikultura juga menghadapi tantangan besar dalam pengendalian kualitas pascapanen, karena setelah dipanen proses fisiologis seperti respirasi, produksi etilen, transpirasi, dan degradasi jaringan masih berlangsung. Aktivitas fisiologis tersebut memengaruhi daya simpan, tekstur, serta kerentanan buah terhadap patogen penyebab penyakit pascapanen, termasuk jamur *Fusarium oxysporum* yang menjadi fokus penelitian ini. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sifat fisiologis apel sangat diperlukan sebagai dasar pengembangan teknologi penyimpanan dan perlakuan pascapanen untuk mempertahankan kualitasnya. Dari sudut pandang fisika dan optik, permukaan apel memiliki karakteristik khusus yang memengaruhi efektivitas perlakuan sterilisasi berbasis sinar UV-C. Kulit apel dilapisi oleh lapisan kutikula dan lilin *epicuticular* yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung alami terhadap kehilangan air, tetapi juga berperan dalam interaksi optik dengan radiasi elektromagnetik. Struktur permukaan tersebut menyebabkan sebagian energi foton

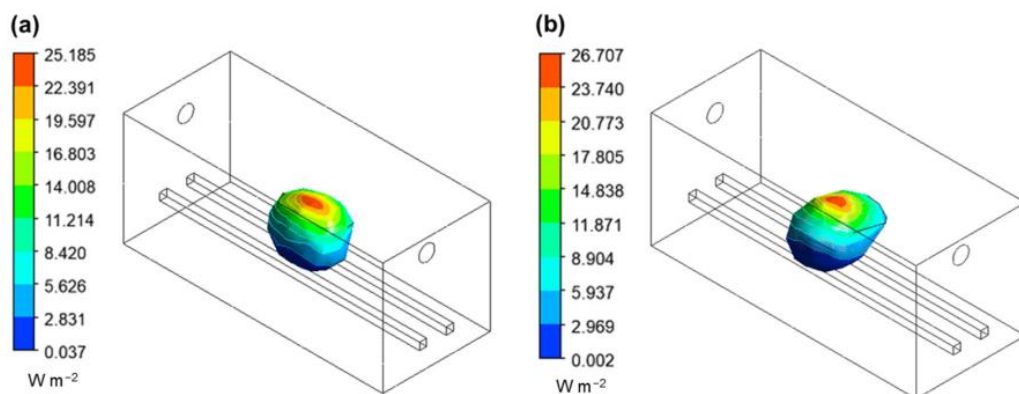
UV-C mengalami refleksi dan hamburan sebelum mencapai jaringan di bawahnya, sehingga memengaruhi penetrasi dan distribusi dosis radiasi pada seluruh permukaan buah. Penelitian simulasi distribusi *irradiance* pada objek berbentuk bulat yang dilakukan oleh Trivittayasil *et al.* (2016) menunjukkan bahwa variasi daya transmisi dan reflektansi permukaan buah berpengaruh signifikan terhadap sebaran dosis UV. Distribusi cahaya yang tidak merata pada geometri permukaan melengkung dapat menyebabkan adanya area dengan intensitas lebih rendah yang berpotensi menjadi titik rawan bagi kolonisasi mikroorganisme. Hal ini menegaskan pentingnya rancangan alat sterilisasi yang mampu mengatasi keterbatasan tersebut, misalnya dengan penambahan reflektor, pengaturan sudut lampu, atau rotasi otomatis buah di dalam *chamber*, sehingga seluruh permukaan apel dapat memperoleh paparan UV-C secara optimal. Dengan demikian, pemahaman mengenai sifat fisiologis dan optik apel menjadi landasan penting dalam mendukung pengembangan alat sterilisasi otomatis berbasis UV-C yang dirancang dalam penelitian ini. Untuk intensitas radiasi permukaan pada model empat lampu ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Kontur intensitas radiasi permukaan pada model empat lampu dengan jarak horizontal 300 mm (Trivittayasil *et al.*, 2016).

Masalah “*shadowing*” sangat krusial. Permukaan sisi apel yang tidak langsung terkena sinar UV-C akan menerima dosis lebih rendah, sehingga potensi mikroba di area tersebut bisa bertahan. Trivittayasil *et al.* (2016) menampilkan hasil bahwa konfigurasi empat lampu lebih efektif dalam mencapai distribusi dosis yang lebih seragam dibanding hanya satu arah sumber sinar. Ini menjadi pelajaran penting bahwa desain box sterilisasi harus memperhitungkan geometri sumber dan posisi buah. Selain aspek optik dan geometri, aspek fisiologi buah juga memengaruhi

kerentanan terhadap infeksi jamur. Setelah panen, apel tetap mengalami respirasi dan fluks gas (termasuk kehilangan air) yang dapat mengubah kondisi kelembapan permukaan dan mikroklimat sekitar kulit buah. Keadaan ini berdampak pada bagaimana jamur seperti *Fusarium oxysporum* bisa menempel dan berkembang. Penelitian umum tentang aplikasi UV-C pada buah mengidentifikasi bahwa perlakuan UV-C yang terlalu kuat dapat memicu stres pada jaringan buah seperti perubahan warna atau tekstur yang harus dihindari (Mansur *et al.*, 2023). Mansur *et al.* (2023) dalam tinjauan efektivitas UV-C menyebut bahwa penggunaan sinar UV-C di permukaan buah sangat dipengaruhi oleh sifat optik bahan, fluktuasi dosis (*non-homogeneity*), hingga kondisi permukaan buah (retakan, permukaan kasar) yang menyebabkan variasi dosis efektif. Mukhtasari *et al.* (2024) dalam studi *CFD Analysis of UV-C Intensity Radiation Distribution and Inactivation of Foodborne Pathogens on Whole and Minimally Processed Mango* (Garzón-García *et al.*, 2024) juga memberikan pendekatan teknis berguna: menggunakan simulasi *CFD* (model radiasi *discrete ordinate*) untuk memetakan distribusi intensitas UV-C pada permukaan buah mangga dan memprediksi dosis yang dibutuhkan untuk inaktivasi. Meskipun objeknya mangga, metode simulasi seperti ini dapat diterapkan ke buah apel, termasuk varietas *Fuji*, untuk memperkirakan distribusi cahaya dalam box sterilisasi. Kontur intensitas radiasi pada permukaan mangga ditunjukkan pada **Gambar 2.9**.



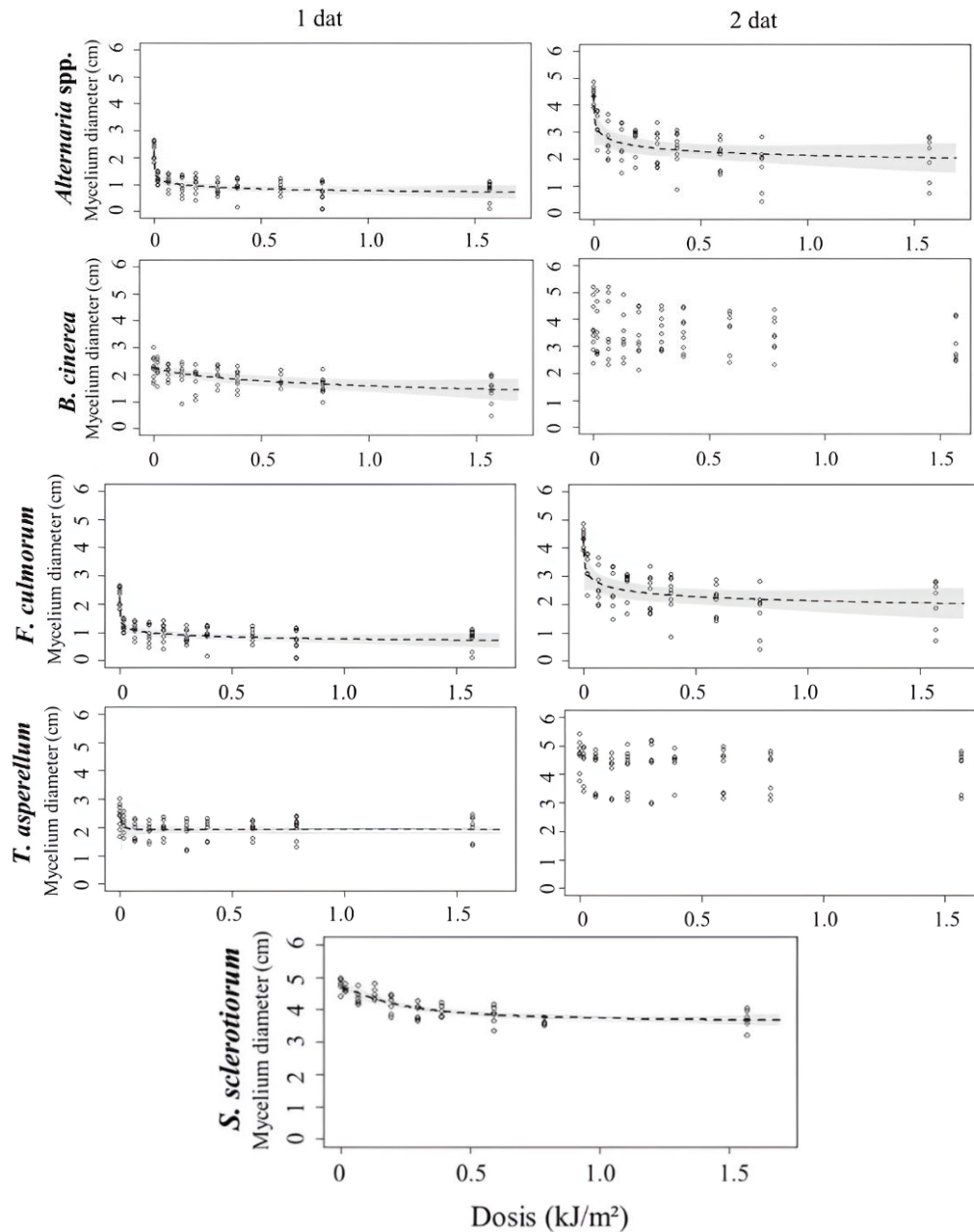
Gambar 2.9 Kontur intensitas radiasi pada permukaan mangga yang diposisikan sejajar (a) dan tegak lurus (b) terhadap lampu (Garzón-García *et al.*, 2024).

Dalam penelitian ini, digunakan apel *Fuji* (*Malus domestica* var. *Fuji*) sebagai objek uji. Varietas *Fuji* dipilih karena daya simpan relatif baik namun tetap rentan terhadap infeksi jamur, terutama jika perlakuan penyimpanan dan sanitasi tidak

optimal. Karakteristik optik permukaan dan tekstur varietas *Fuji* harus diperhitungkan dalam desain sistem sterilisasi UV-C agar distribusi cahaya merata dan dosis efektif tercapai. Konsep rancang bangun alat sterilisasi otomatis berbasis *Arduino Uno R3* sangat relevan di sini. Karena variasi optik permukaan, bayangan, dan heterogenitas permukaan buah, alat harus menyertakan kontrol parameter seperti variasi panjang gelombang dan intensitas. Selain itu, sensor *irradiance* internal (misalnya sensor UV atau fotodioda) harus digunakan untuk kalibrasi *real-time* agar kualitas penyinaran tidak bergantung hanya pada *setting* perangkat. Dengan demikian, alat tidak hanya sekedar memancarkan UV, tetapi juga dapat mengadaptasi dosis berdasarkan respons permukaan buah agar mencapai efektivitas maksimal tanpa merusak buah.

2.3 *Fusarium oxysporum* sebagai Patogen Pascapanen

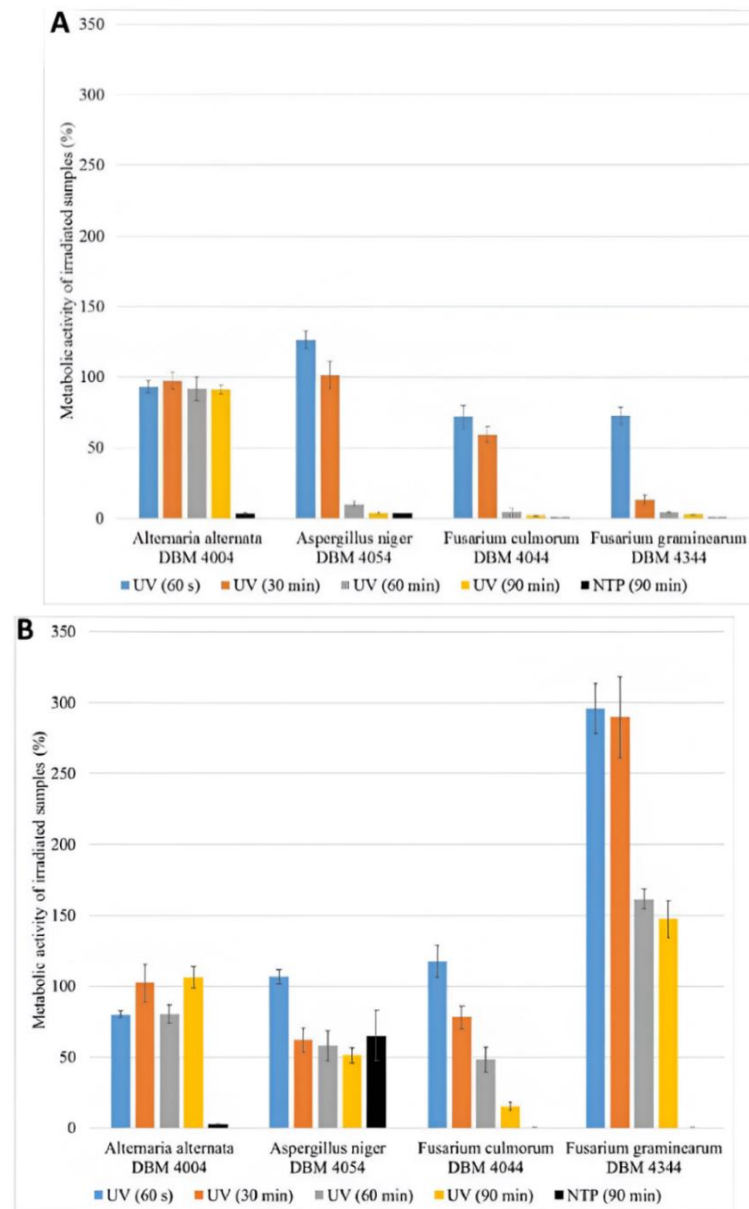
Jamur *Fusarium oxysporum* adalah salah satu agen patogen penting yang menyebabkan kerusakan buah baik selama fase pertumbuhan maupun pascapanen. Dalam iklim tropis, berbagai spesies *Fusarium* seperti *Fusarium oxysporum*, *F. solani*, *F. incarnatum*, dan *F. proliferatum* sering ditemukan menyebabkan penyakit buah (*fruit rot*) pada buah tropis (Zakaria, 2023). Infeksi pascapanen biasanya terjadi ketika buah mengalami luka atau kerusakan mekanik, sehingga spora jamur dapat masuk dan membentuk area lesi atau pembusukan yang menyebar ke jaringan dalam (Collum *et al.*, 2023). Dalam penelitian laboratorium, beberapa studi telah menguji sensitivitas *Fusarium oxysporum* terhadap radiasi UV-C. Sebagai contoh, Hahlbohm *et al.* (2025) menguji pengaruh UV-C terhadap pertumbuhan vegetatif dan sporulasi *Fusarium culmorum* serta jamur lain seperti *Alternaria spp.* dan *Botrytis cinerea*. Mereka menemukan bahwa dosis UV-C dalam rentang 0,015-1,57 kJ/m² dapat memengaruhi germinasi spora dan mengurangi viabilitas spora, meskipun pertumbuhan miselium kadang-kadang dapat pulih pada hari berikutnya setelah paparan awal. Pengaruh dosis UV-C terhadap diameter miselium jamur patogen pascapanen ditunjukkan pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10 Pengaruh dosis UV-C terhadap diameter miselium lima jenis jamur patogen pascapanen (Hahlbohm *et al.*, 2025).

Studi kompilasi lain, *Fungal photoinactivation doses for UV radiation and visible light*, menyajikan data dosis rata-rata (*log-reduction*) terhadap jamur (termasuk *Fusarium*) untuk radiasi UV dan cahaya tampak (200-480 nm). Mereka mencatat bahwa berbagai spesies jamur memiliki ambang dosis inaktivasi yang berbeda, dan bahwa faktor seperti struktur spora, pigmentasi, dan keadaan fisiologis memengaruhi sensitivitasnya terhadap UV. Selain sensitivitas terhadap radiasi, produksi metabolit toksik oleh *Fusarium* juga relevan dari sisi keamanan pangan.

Conti Taguali *et al.* (2024) menerangkan bahwa beberapa spesies *Fusarium* menghasilkan mikotoksin seperti *fumonisin* dan *deoksinivalen* (DON) sebagai respons stres lingkungan atau kondisi infeksi, yang dapat memengaruhi kualitas buah dan keamanan konsumen. Studi ini penting karena pengendalian jamur bukan hanya soal mencegah kelangsungan hidupnya, tetapi juga mengurangi potensi akumulasi toksin dalam buah yang masih dapat dikonsumsi. Dari sudut fisika instrumentasi, tantangan mendasar adalah bagaimana memastikan bahwa dosis UV-C yang diberikan ke permukaan buah cukup tinggi untuk menonaktifkan *Fusarium oxysporum*, namun tidak merusak jaringan buah. Berdasarkan data Hahlbohm *et al.* (2025) dosis yang terlalu rendah mungkin hanya menghambat germinasi sementara, sementara dosis tinggi mungkin menyebabkan pemulihan jamur atau kerusakan buah. Selain itu, karena *Fusarium oxysporum* memiliki tahapan biologis (spora, miselium), respons terhadap UV dapat berbeda antar tahap tersebut; misalnya spora bisa lebih resisten dibanding miselium. Oleh karena itu, alat yang dirancang harus memungkinkan variasi panjang gelombang dan intensitas (fleksibilitas parameter) agar optimasi dosis bisa dilakukan secara sistematis. Permasalahan lain adalah distribusi dosis UV melalui permukaan buah yang kompleks. Permukaan kulit buah bisa memiliki retakan, lipatan, atau variasi permukaan yang menyebabkan variasi dosis efektif yang diterima spora. Desain box sterilisasi harus mempertimbangkan geometri buah dan kemungkinan area bayangan untuk jamur. Dalam rancang bangun alat sterilisasi otomatis berbasis *Arduino Uno R3*, diperlukan integrasi sensor *irradiance*, sistem rotasi atau reflektor, serta kontrol parameter secara presisi untuk memastikan bahwa spora *Fusarium oxysporum* di permukaan buah mendapatkan dosis yang memadai untuk inaktivasi. Sebagai tambahan, penelitian *Comparative assessment of UV-C radiation and non-thermal plasma on fungal contaminants* (Kulišová *et al.*, 2024) membandingkan efektivitas UV-C dan plasma pada jamur pangan, termasuk jamur kontaminan umum, dan menunjukkan bahwa UV-C bisa efektif bila dosis dan paparan dikontrol dengan baik. Meskipun tidak spesifik pada *Fusarium* pada apel, penelitian ini menegaskan bahwa desain alat yang memungkinkan kontrol parameter variatif dapat memperbesar peluang keberhasilan pengendalian jamur. Aktivitas metabolik relatif beberapa jenis jamur setelah perlakuan UV dan NTP ditunjukkan pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2.11 Aktivitas metabolik relatif beberapa jenis jamur setelah perlakuan UV dan NTP pada 24 jam (A) dan 48 jam (B) setelah perlakuan (Kulišová *et al.*, 2024).

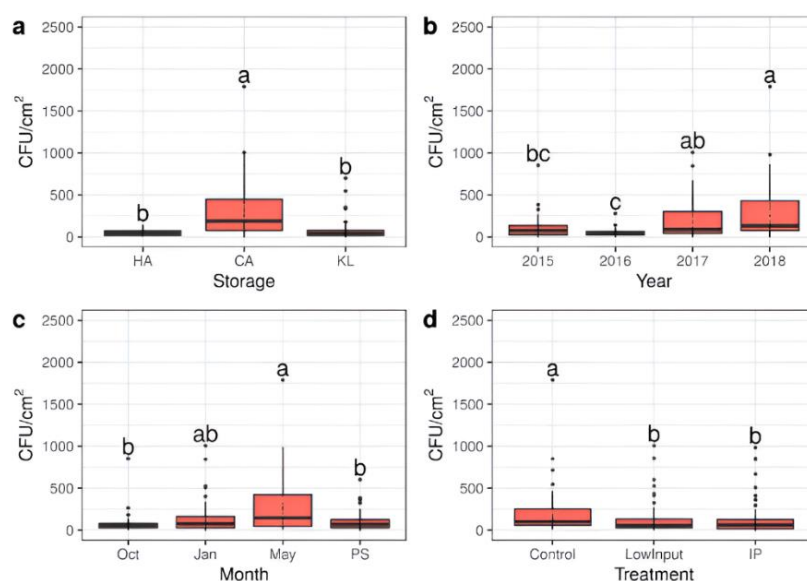
Dengan demikian, subbab ini menguraikan bahwa *Fusarium oxysporum* merupakan patogen yang tangguh dan memerlukan dosis UV-C yang cukup tinggi serta alat dengan fleksibilitas *control parameter*. Dalam penelitian ini, rancang bangun alat sterilisasi otomatis apel *Fuji* berbasis *Arduino Uno R3* ditujukan untuk menguji dan mengoptimasi kombinasi panjang gelombang dan intensitas terhadap *Fusarium oxysporum*, agar diperoleh parameter optimal yang efektif dan aman bagi buah.

2.4 Mikroorganisme pada Apel

Permukaan buah apel tidak steril; buah yang baru dipanen sudah mengandung berbagai jenis mikroorganisme baik jamur maupun bakteri yang menempel dari lingkungan, tanah, serangga, udara, dan proses panen. Sebelum intervensi UV-C, penting untuk memahami keragaman mikroba ini agar sistem sterilisasi alat yang dirancang dapat mempertimbangkan “beban awal” yang harus diatasi.

2.4.1 Komposisi Mikroflora Permukaan Apel

Studi *Metagenomic insights into fruit surface microbiota* oleh Bai *et al.* (2022) menunjukkan bahwa komunitas mikroba permukaan apel dapat berubah secara dinamis selama penyimpanan: pada awal penyimpanan dominan bakteri seperti *Pseudomonas*, *Methylobacterium*, kemudian meningkat ke proporsi jamur seperti *Alternaria*, *Penicillium*, dan *Cladosporium*. Komposisi mikroba pada permukaan apel selama penyimpanan ditunjukkan pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2.12 Komposisi mikroba pada permukaan apel selama penyimpanan (Bai *et al.*, 2022).

Selain itu, studi oleh Nguyen *et al.* (2023) pada apel menunjukkan bahwa luka mikro atau goresan pada permukaan buah menjadi titik masuk bagi mikroba patogen; pada kondisi kelembapan tinggi, spora jamur seperti *Alternaria* atau *Cladosporium* dapat bermetastasis ke area sehat (Nguyen *et al.*, 2023). Di sisi lain, bakteri epifitik seperti *Erwinia amylovora* (patogen *fire blight*) dapat berada sebagai

flora laten pada permukaan apel tanpa gejala, namun dapat berkembang bila kondisi resisten terhadap pengendalian (Vanneste, 2017).

2.4.2 Kompetisi Mikroba dan Kondisi Lingkungan

Komunitas mikroba tidak tumbuh sendiri-sendiri; ada interaksi kompetitif, antagonisme, dan sinergi yang memengaruhi pertumbuhan mikroorganisme. Misalnya, beberapa spesies *Bacillus* menghasilkan antibakteri atau antijamur yang dapat menekan pertumbuhan jamur patogen pada permukaan buah. Dalam konteks penyinaran, apabila dosis UV-C tidak mematikan semua mikroba, mikroba residual mungkin mendapatkan keunggulan kompetitif dan mendominasi kembali. Lingkungan tempat penyimpanan setelah perlakuan UV juga kritis. Kelembapan tinggi atau kondensasi pada permukaan apel dapat memfasilitasi rekolonisasi mikroba (fungi atau bakteri). Sebagai contoh, penelitian *Effect of UV-C LED on strawberry spoilage organisms* oleh Kim *et al.* (2023) menemukan bahwa meskipun *treatment* menekan mikroba sampai titik tertentu, jika kelembapan relatif lokal tinggi (>90%), sisa mikroba memanfaatkan kondisi tersebut untuk tumbuh kembali pascaperlakuan. Dalam sistem alat, aspek ventilasi internal atau penataan udara dalam box sterilisasi menjadi bagian yang harus diperhitungkan agar permukaan buah tetap kering selama maupun setelah penyinaran.

2.4.3 Implikasi untuk Rancang Bangun Instrumentasi UV-C

Karena keberadaan mikroorganisme lain di permukaan, desain alat UV-C yang dirancang perlu mempertimbangkan kondisi berikut:

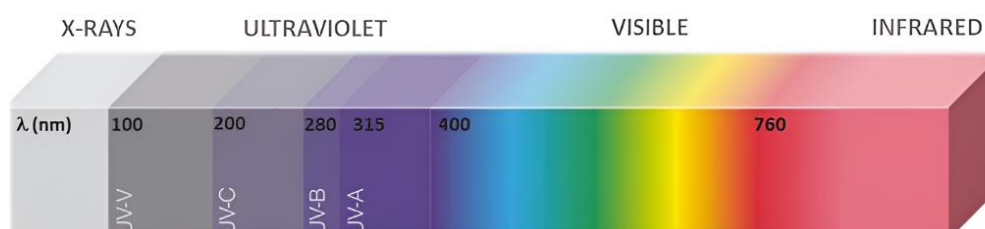
1. Dosis *margin (safety buffer)*: agar *treatment* mencakup variasi sensitivitas mikroba. Dosis yang cukup untuk *Fusarium sp.* mungkin tidak cukup untuk mikroba yang lebih resisten atau memiliki pigmen pelindung.
2. *Sensor & monitoring*: dalam box sterilisasi harus ada sensor cahaya UV (*radiometer* atau *photodiode*) yang memantau intensitas aktual di lokasi-lokasi kritis (dekat permukaan buah). Monitoring ini penting agar variasi cahaya akibat posisi buah atau degradasi lampu dapat dikompensasi secara otomatis.
3. Uniformitas penyinaran: penggunaan reflektor internal, permukaan reflektif, *multiple sources*, atau rotasi buah sangat dianjurkan agar permukaan buah

mendapat eksposur merata, terutama untuk area yang sebelumnya mungkin memiliki beban mikroba lebih tinggi.

4. Pengaturan lingkungan box sterilisasi: fitur ventilasi atau sistem pemanasan ringan mungkin diperlukan untuk menjaga buah tetap kering (menghindari kondensasi) serta menjaga kelembapan internal agar tidak memfasilitasi rekolonisasi mikroba.
5. Desain protokol paparan: protokol eksperimen sebaiknya mencakup kontrol negatif (tidak disinari) dan pengukuran mikroba residual (koloni yang tumbuh setelah paparan) pada interval tertentu. Hal ini untuk menangkap fenomena rekolonisasi mikroba yang mungkin timbul jika *treatment* tidak cukup kuat.

2.4.4 Tantangan dan Studi Bandingan

Dalam studi *Surface decontamination by UV-C for fruits and vegetables: challenges and innovations* (Darré *et al.*, 2022), peneliti menyoroti bahwa variasi permukaan buah (lubang, tekstur kasar, pori) dan faktor bayangan menjadikan aplikasi UV-C pada buah lebih sulit dibanding permukaan datar steril. Mereka menyarankan agar alat sterilisasi buah memperhitungkan permukaan topografi dan integrasi sensor posisi untuk meminimalkan area yang tidak terpapar. Rentang subwilayah spektrum UV yang digunakan dalam aplikasi teknologi dan fotoresepsi tumbuhan ditunjukkan pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2.13 Rentang subwilayah spektrum UV yang digunakan dalam aplikasi teknologi dan fotoresepsi tumbuhan (Darré *et al.*, 2022).

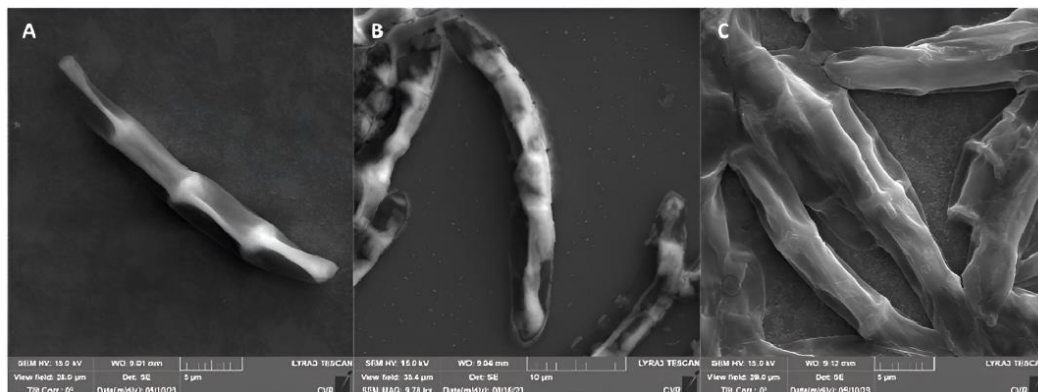
Studi bandingan lain oleh Belloli *et al.* (2022) pada *Effectiveness of two UV-C LED in inactivating fungal conidia* menunjukkan bahwa penggunaan UV-C LED dengan panjang gelombang berbeda di satu box sterilisasi dapat meningkatkan jangkauan dosis terhadap mikroba yang kurang sensitif. Strategi ini bisa dipertimbangkan dalam rancang bangun alat agar fleksibilitas panjang gelombang tersedia jika mikroba lain muncul.

2.5 Sinar *Ultraviolet* (UV)

Sinar *Ultraviolet* (UV) merupakan radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang antara 100 nm sampai 400 nm, berada di bawah spektrum cahaya tampak dan di atas sinar-X. Berdasarkan panjang gelombangnya, UV dikategorikan menjadi UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm), dan UV-C (100-280 nm). Di antara ketiganya, UV-C adalah kategori yang paling efektif sebagai agen germisida, karena foton dengan energi tinggi pada rentang ini dapat merusak struktur DNA mikroorganisme melalui pembentukan dimer pirimidin (contoh: *thymine dimer*), sehingga menghambat replikasi sel dan mengakibatkan kematian sel mikroba (Darré *et al.*, 2022).

2.5.1 Mekanisme Fisika & Biologi

Secara fisika, semakin pendek panjang gelombang, semakin tinggi energi foton, artinya kemampuan radiasi untuk menyebabkan kerusakan molekul lebih besar. Dalam konteks mikroorganisme, radiasi ini dapat menyebabkan pecahnya ikatan kimia dalam DNA atau RNA, menghasilkan mutasi atau kerusakan irreversibel yang menghambat aktivitas sel (Darré *et al.*, 2022). Mikroorganisme (termasuk jamur) memiliki mekanisme perbaikan DNA (*DNA repair mechanisms*) dan daya tahan yang berbeda terhadap radiasi. Spora jamur umumnya lebih resisten dibanding sel vegetatif karena dinding selnya lebih tebal dan adanya pigmen pelindung seperti melanin yang bisa menyerap sebagian radiasi. Dalam penelitian *Comparative assessment of UV-C radiation and non-thermal plasma* (Kulišová *et al.*, 2024), efek UV-C terhadap spora berbagai jamur (termasuk *Fusarium culmorum*) dibandingkan dengan *non-thermal plasma* menunjukkan bahwa meskipun UV-C dapat mengurangi viabilitas spora, untuk beberapa jenis diperlukan dosis tinggi atau suplementasi metode lain. Spora *Fusarium culmorum* sebelum dan setelah perlakuan radiasi ditunjukkan pada **Gambar 2.14**.



Gambar 2.14 Spora *Fusarium culmorum* tanpa perlakuan (A), setelah radiasi UV (B), dan setelah perlakuan NTP (C) (Kulišová *et al.*, 2024).

2.5.2 Aplikasi Pascapanen terhadap Buah

Dalam aplikasi pascapanen, UV-C telah digunakan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen pada permukaan buah. Darré *et al.* (2022) meninjau banyak studi aplikasi UV-C pada buah dan sayur, termasuk efek terhadap mikroba dan dampaknya terhadap senyawa bioaktif buah. Salah satu bagian penting adalah bahwa kelemahan penggunaan UV adalah bahwa radiasi harus mencapai permukaan mikroorganisme tanpa mengalami hambatan besar oleh permukaan kulit buah atau bayangan. Masalah besar dalam aplikasi UV-C pada buah adalah area bayangan atau *shadow effect* pada bagian permukaan buah yang tidak langsung terkena sinar UV sehingga menerima dosis jauh lebih rendah, membuat mikroba di area tersebut mungkin bertahan. Darré *et al.* (2022) menyarankan penggunaan reflektor internal atau orientasi sumber sinar yang *multiple* untuk mengurangi bayangan. Selain itu, penelitian *Effect of Postharvest UV-C Radiation on Nutritional Quality, Oxidation and Enzymatic Browning of Stored Mature Date* menyajikan bagaimana dosis UV-C dapat memengaruhi kualitas buah. Dosis tinggi bisa memicu perubahan warna atau sifat fisik buah (pencokelatan kulit) jika tidak diatur dengan baik. Faktor lingkungan juga memengaruhi efektivitas UV. Misalnya, kelembapan tinggi atau kondisi permukaan yang lembap dapat mengurangi penetrasi radiasi dan memfasilitasi rekolonisasi mikroba setelah paparan. Untuk itu, box sterilisasi UV dalam alat harus dikondisikan agar permukaan buah relatif kering selama penyinaran, mungkin dengan ventilasi atau dehumidifikasi ringan.

2.5.3 Implikasi untuk Rancang Bangun Alat

Untuk rancang bangun alat UV-C otomatis berbasis *Arduino Uno R3*, beberapa aspek teknis berikut harus diperhatikan:

1. Pemilihan Sumber UV-C

Pilihan antara lampu merkuri tekanan rendah (typical 254 nm) dan *UV-C LED* (misalnya 265-280 nm) menjadi pertimbangan. *UV-C LED* lebih hemat energi, mudah dikendalikan dengan *PWM*, dan dapat digabungkan modul, sedangkan lampu merkuri sering memiliki *output* stabil dan intensitas lebih tinggi.

2. Kontrol Intensitas & Durasi

Arduino dapat mengatur durasi paparan dan intensitas melalui modul *PWM* atau *driver LED*. Misalnya, sistem bisa diprogram untuk memberikan kombinasi variasi intensitas yang berbeda dalam eksperimen optimalisasi.

3. Sensor Intensitas UV (*Feedback Loop*)

Agar dosis aktual yang diterima buah sesuai target, perlu sensor UV (*photodiode* atau sensor UV-C khusus) untuk memantau irradiance di posisi-posisi kritis. Sistem dapat menyesuaikan waktu tambahan jika sensor membaca nilai di bawah target.

4. Desain Box Sterilisasi & Distribusi Radiasi

Box sterilisasi perlu dirancang untuk menghindari bayangan, misalnya dengan reflektor internal, sumber cahaya *multiple* dengan sudut berbeda, atau sistem rotasi buah agar setiap sisi permukaan terkena paparan. Simulasi distribusi radiasi (*ray tracing* atau model radiasi) bisa dilakukan untuk memprediksi sebaran cahaya.

5. Proteksi & Matching Spektrum

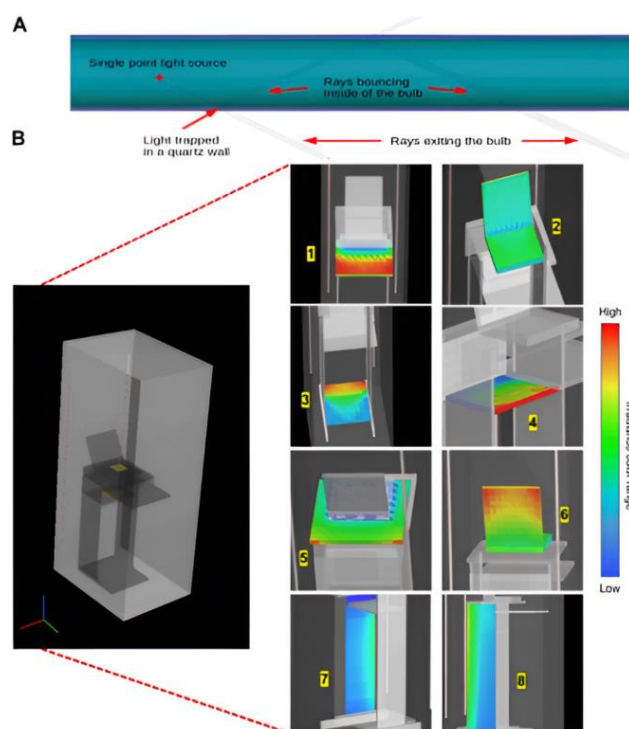
Panjang gelombang yang digunakan harus cocok dengan mikroorganisme target (misalnya 200, 220, 280 nm) dan operator terlindungi dari UV dengan penutup akrilik yang menahan radiasi UV atau *interlock* keselamatan.

Dengan konsep ini, alat yang dirancang tidak hanya sekadar perangkat biologis untuk sterilisasi, tetapi juga aplikasi nyata prinsip fisika radiasi, kontrol instrumentasi, integrasi sensor, dan optimasi distribusi cahaya.

2.6 Dimmer dalam Sistem Kendali Cahaya Ultraviolet

Pengendalian intensitas cahaya *Ultraviolet* (UV-C) merupakan aspek fundamental dalam rancang bangun sistem sterilisasi buah, terutama apel pascapanen, karena

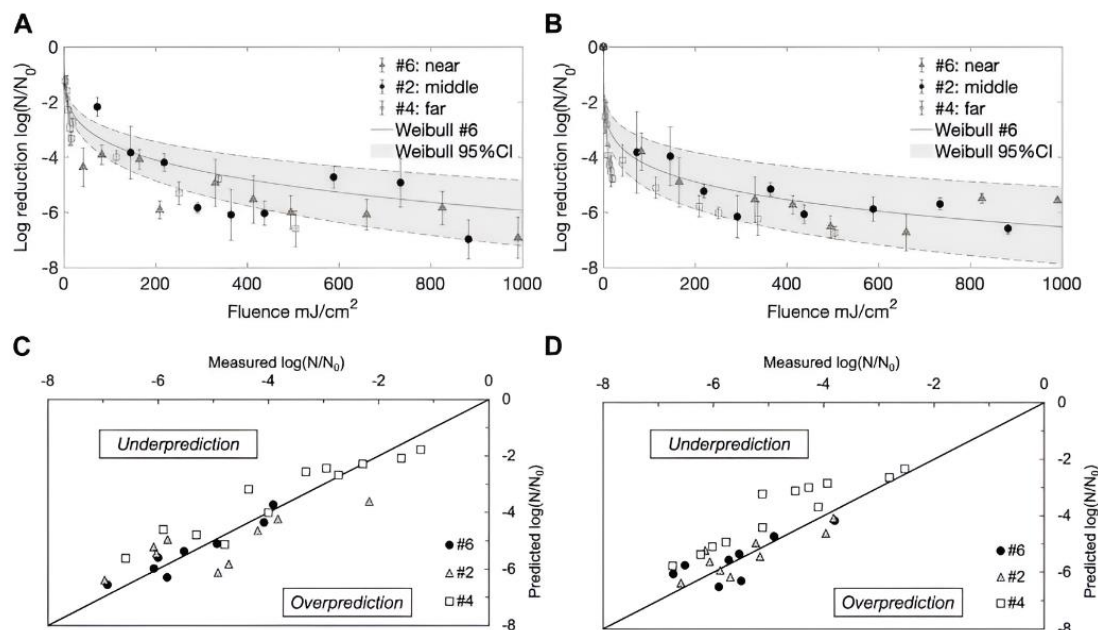
dosis cahaya yang diterima objek menentukan efektivitas inaktivasi mikroorganisme. Intensitas yang terlalu rendah akan menyebabkan jamur *Fusarium oxysporum* tidak sepenuhnya terhambat pertumbuhannya, sementara intensitas yang terlalu tinggi berpotensi merusak jaringan kulit dan menurunkan mutu organoleptik buah. Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali yang fleksibel, presisi, dan adaptif dalam mengatur keluaran UV-C. Salah satu perangkat yang umum digunakan adalah *dimmer*, yang dapat mengatur daya lampu UV-C secara bertahap sehingga intensitas cahaya yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan eksperimen maupun skenario aplikasi (Chen & Moraru, 2023). Jalur propagasi cahaya dan distribusi iradiasi pada unit UV-C ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15 (A) Jalur propagasi cahaya pada lampu merkuri tekanan rendah. (B) Simulasi *ray tracing* distribusi iradiasi pada unit UV-C, dengan gradasi warna menunjukkan tingkat fluensi (Chen & Moraru, 2023).

Secara teknis, *dimmer* bekerja dengan prinsip pengaturan daya yang dialirkan ke lampu. Pada sistem berbasis mikrokontroler seperti *Arduino Uno R3*, *dimmer* dioperasikan melalui teknik *Pulse Width Modulation (PWM)*, yaitu modulasi sinyal *digital on-off* dengan frekuensi tertentu yang menghasilkan daya rata-rata sesuai *duty cycle*. Teknik ini menjaga agar spektrum emisi lampu tetap berada pada panjang gelombang *germicidal* yang diinginkan, sementara intensitas dapat

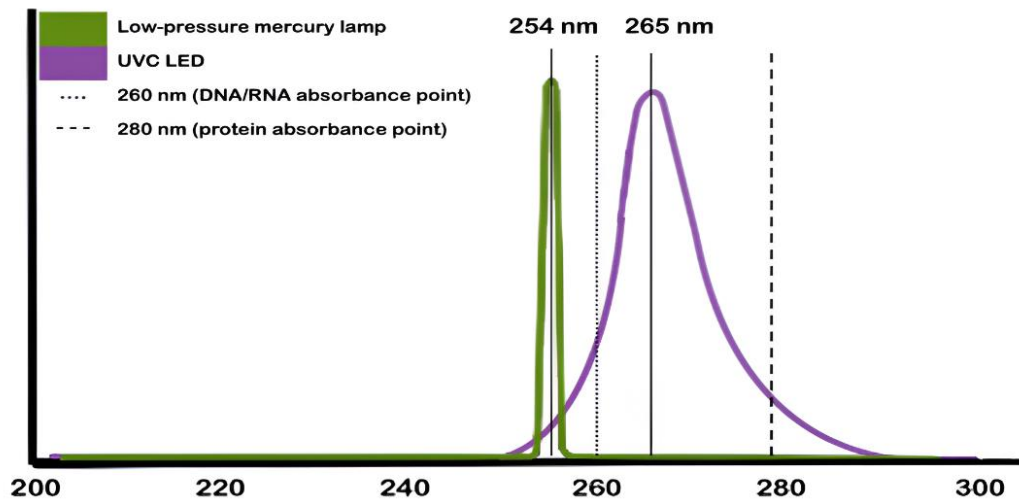
dinaikkan atau diturunkan secara presisi. Dalam konteks penelitian sterilisasi buah, *PWM* memberikan keunggulan dalam mempertahankan kestabilan radiasi UV-C, sekaligus memastikan bahwa perlakuan yang diberikan pada setiap sampel apel konsisten (Chen & Moraru, 2023). Kinetika inaktivasi UV-C terhadap *E. coli* dan *L. innocua* ditunjukkan pada **Gambar 2.16**.



Gambar 2.16 Kinetika inaktivasi UV-C 254 nm terhadap *E. coli* dan *L. innocua* pada tiga jarak sumber cahaya, serta perbandingan hasil pemodelan Weibull dengan data eksperimen (Chen & Moraru, 2023).

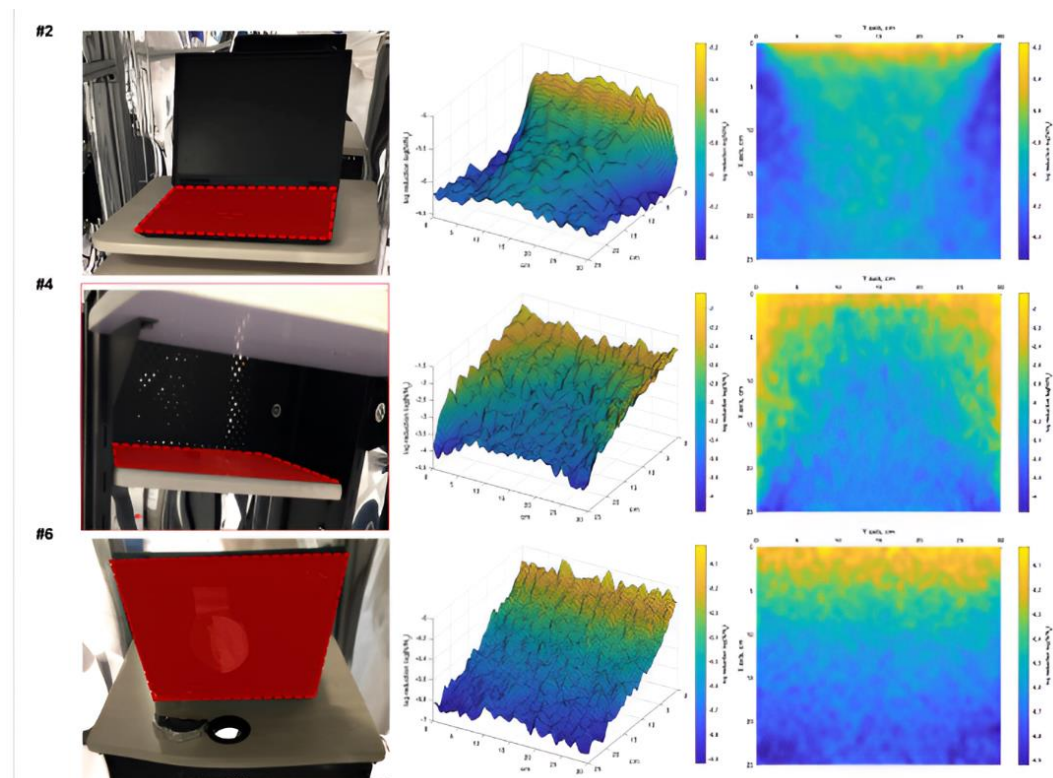
Integrasi *dimmer* dengan *Arduino Uno R3* (*chip ATmega328P*) memungkinkan otomatisasi yang cerdas, di mana sistem dapat menyesuaikan *output* cahaya secara *real-time* berdasarkan data sensor. Sensor intensitas cahaya (*lux meter/UV sensor*) dapat memberikan umpan balik ke mikrokontroler, sehingga jika terdeteksi penurunan *output* akibat degradasi lampu, *Arduino* akan menyesuaikan *duty cycle PWM* untuk menjaga intensitas sesuai *setpoint*. Sistem *loop tertutup* seperti ini menjamin konsistensi dosis yang diterima permukaan apel selama perlakuan, sekaligus memperkecil variabilitas data eksperimen. Hal ini penting bagi penelitian berbasis fisika instrumentasi karena menekankan akurasi, reproduktibilitas, dan efisiensi sistem yang dibangun. Dari perspektif keberlanjutan, penggunaan *dimmer* juga berdampak pada efisiensi energi. Studi oleh Nicolau *et al.* (2022) menegaskan bahwa integrasi *LED UV-C* dengan sistem pengendalian intensitas mampu menurunkan konsumsi daya hingga 30% dibandingkan sistem konvensional.

Dengan pengaturan *duty cycle* yang dinamis, lampu hanya bekerja sesuai dosis yang diperlukan, mengurangi panas berlebih, serta memperpanjang umur pakai lampu. Dalam skala industri hortikultura, penghematan energi ini dapat mengurangi biaya operasional secara signifikan, sekaligus meningkatkan daya saing produk apel bebas residu kimia di pasar global. Spektrum puncak panjang gelombang UV-C dari lampu merkuri tekanan rendah dan UV-C LED ditunjukkan pada **Gambar 2.17**.



Gambar 2.17 Spektrum puncak panjang gelombang UV-C dari lampu merkuri tekanan rendah dan UV-C LED (Nicolau *et al.*, 2022).

Tantangan lain dalam aplikasi UV-C adalah adanya efek bayangan (*shadow effect*) akibat bentuk buah yang bulat, yang menyebabkan sebagian permukaan tidak mendapatkan paparan merata. Sistem *dimmer* yang terintegrasi dengan mekanisme reflektor atau rotasi dapat mengatasi hal ini, karena intensitas dapat disesuaikan secara dinamis untuk memastikan seluruh permukaan apel menerima dosis minimum yang memadai. Hasil simulasi radiasi berbasis *ray tracing* yang dilakukan oleh Chen & Moraru (2023) menunjukkan bahwa penggunaan reflektor internal dengan distribusi intensitas adaptif mampu meningkatkan keseragaman *irradiance* hingga 25%, sehingga mengurangi area permukaan yang lolos dari paparan. Simulasi distribusi inaktivasi *E. coli* akibat paparan UV-C ditunjukkan pada **Gambar 2.18**.



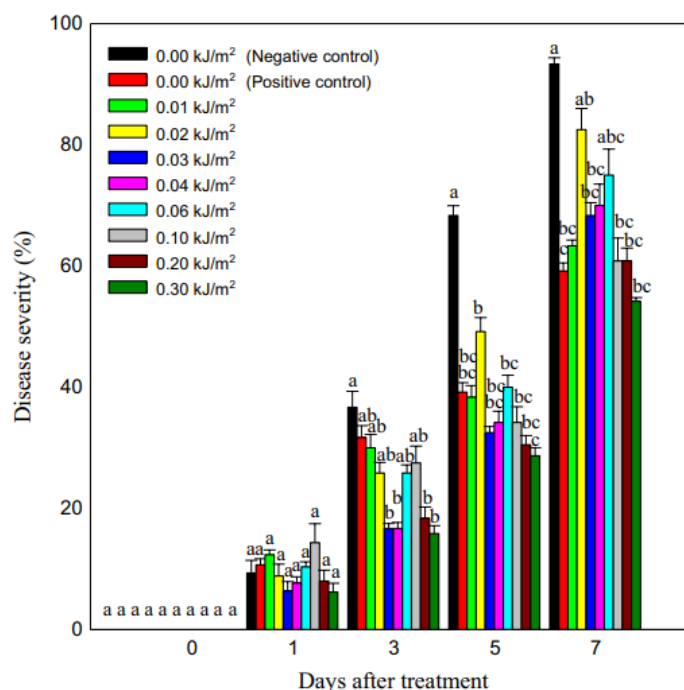
Gambar 2.18 Simulasi *ray tracing* distribusi inaktivasi *E. coli* pada tiga posisi uji dengan paparan UV-C selama 120 detik (Chen & Moraru, 2023).

Selain itu, sistem *dimmer* dapat dipadukan dengan sensor keamanan, seperti sensor pintu magnetik, sehingga lampu otomatis mati ketika box terbuka. Hal ini penting untuk melindungi operator dari paparan UV-C yang berbahaya. Dengan kombinasi kontrol intensitas, *feedback sensor*, dan fitur keselamatan, rancangan ini tidak hanya menekankan efektivitas biologis, tetapi juga aspek keamanan dan ergonomi penggunaan. Dari sudut pandang fisika instrumentasi, sistem ini merepresentasikan integrasi antara optik, elektronik, dan kontrol otomatis yang menjadi ciri khas penelitian berbasis instrumentasi.

2.7 Penggunaan UV-C untuk Pengendalian Jamur pada Apel

Jamur merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pascapanen pada buah apel. Dalam kondisi lingkungan tropis dengan kelembapan tinggi dan suhu yang hangat, spora jamur dapat dengan cepat berkecambah, membentuk hifa, dan menyebar ke jaringan buah. Hal ini menimbulkan pembusukan yang signifikan dan berdampak pada penurunan mutu komersial serta keamanan pangan. Salah satu metode yang banyak diteliti untuk mengendalikan pertumbuhan jamur adalah

paparan sinar *Ultraviolet-C* (UV-C). Mekanisme germisidal UV-C didasarkan pada interaksi radiasi 200-280 nm dengan DNA dan RNA mikroorganisme, yang memicu terbentuknya dimer pirimidin (terutama dimer timin). Struktur abnormal ini menghambat replikasi sel dan pada akhirnya menyebabkan inaktivasi patogen (Gierke *et al.*, 2024). Dengan demikian, UV-C menawarkan pendekatan non-kimiawi yang efektif, aman, dan ramah lingkungan bagi pengendalian jamur pascapanen apel. Penelitian oleh Mohamed *et al.* (2017) dalam artikel *Potential of UVC germicidal irradiation in suppressing postharvest fungal disease* menunjukkan bahwa radiasi UV-C dengan dosis 0,01 hingga 0,30 kJ/m² efektif mengurangi aktivitas patogen jamur pada buah. Mereka mendemonstrasikan penurunan luas area infeksi hingga lebih dari 70% setelah perlakuan singkat. Temuan ini menegaskan bahwa UV-C dapat berfungsi sebagai metode fisik yang andal dalam mengendalikan patogen tanpa meninggalkan residu berbahaya. Pengaruh variasi dosis UV-C terhadap tingkat keparahan *crown rot* pada apel ditunjukkan pada **Gambar 2.19**.



Gambar 2.19 Pengaruh variasi dosis UV-C terhadap tingkat keparahan *crown rot* pada apel selama penyimpanan (Mohamed *et al.*, 2017).

Selanjutnya, Darré *et al.* (2022) dalam ulasannya *Postharvest Ultraviolet Radiation in Fruit and Vegetables* menekankan pentingnya pengaturan dosis UV-C yang moderat. Dosis yang terlalu tinggi dapat menimbulkan efek samping berupa

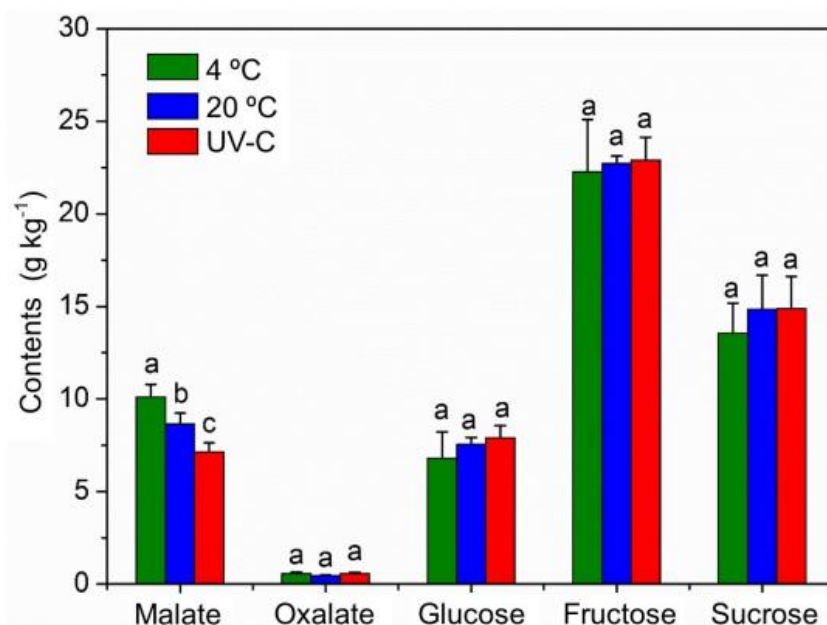
perubahan warna kulit dan tekstur buah, sementara dosis yang moderat terbukti menekan pertumbuhan mikroba sekaligus mempertahankan kualitas fisik buah seperti kekerasan, warna, dan kandungan antioksidan. Lebih jauh lagi, Darré *et al.* menjelaskan bahwa perlakuan UV-C dapat memicu aktivasi sistem pertahanan alami buah, termasuk *enzim fenilalanin amonia liase (PAL)* yang berperan dalam produksi senyawa fenolik antijamur. Ringkasan penelitian penggunaan UV-C pada buah dan sayuran pascapanen ditunjukkan pada **Gambar 2.20**.

UV Region	Product	Treatment Conditions	Main Results Found
UVC	Fresh-cut watermelon	Dose: 1.6–7.2 kJ m ⁻²	Increase in antioxidant capacity (7%), maintenance of lycopene and ascorbic acid. Microbial growth retardation. Only the lowest doses (1.6 and 2.8 kJ m ⁻²) preserved sensory attributes.
	Fresh-cut Bimi [®] Broccoli	Dose: 1.5–15 kJ m ⁻²	Increased total phenolics (25%). Hydroxycinnamoyl acid derivatives were immediately increased after the treatments. The higher the UVC doses, the higher total antioxidant capacity values. UVC delayed chlorophyll degradation.
	Fresh-cut tatsoi baby leaves	Dose: 4.54 kJ m ⁻² with hyperoxia (100 kPa O ₂)	Improved phenolic content and total antioxidant capacity retention throughout storage. UVC and the combined UVC + O ₂ -controlled the epiphytic microbes.
	Fresh-cut pomegranate arils	Dose: 4.54 kJ m ⁻²	Combination of UVC and high O ₂ preserved SOD and CAT and decreased POD and PPO. UVC combined with high O ₂ maintained the level of anthocyanins and phenolics. Combining UVC to high O ₂ enhanced the benefits of applying each treatment alone. All treatments involving high O ₂ and/or UVC kept anthocyanins high, especially phenolic content.
		Dose: 4.54 kJ m ⁻²	The lowest antioxidant activity was found in hot water + UVC + superatmospheric O ₂ packaging (HO) and the highest in UVC + HO and HO treatments. Hot water alone or in combination with UVC and HO inhibited mesophile, mold and yeast growth, while UVC + HO was most effective for controlling yeast and mold growth.

Gambar 2.20 Ringkasan penelitian penggunaan UV-C pada buah dan sayuran pascapanen, termasuk apel (Darré *et al.*, 2022).

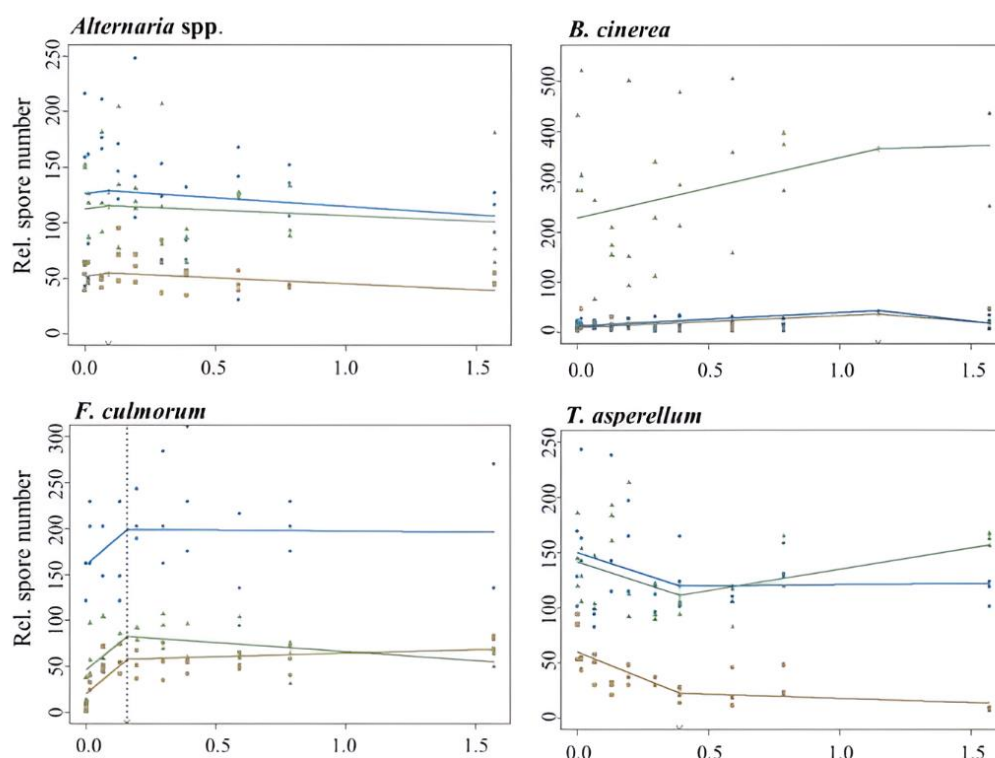
Onik *et al.* (2019) melakukan penelitian spesifik pada apel *Fuji* dalam artikel *UV-C treatment promotes quality of early ripening apple fruit by regulating malate metabolizing genes during postharvest storage*. Mereka menemukan bahwa selain menekan pertumbuhan mikroba, perlakuan UV-C juga berperan dalam menjaga kualitas metabolik buah. Paparan UV-C terbukti memengaruhi ekspresi gen yang mengatur metabolisme malat, sehingga kandungan gula, asam organik, dan keseimbangan rasa apel dapat dipertahankan lebih lama. Temuan ini menunjukkan bahwa perlakuan UV-C tidak hanya bersifat antimikroba, tetapi juga berkontribusi

pada kualitas organoleptik apel. Perbandingan kandungan gula dan asam organik pada apel ditunjukkan pada **Gambar 2.21**.



Gambar 2.21 Perbandingan kandungan gula dan asam organik pada apel di bawah penyimpanan suhu berbeda dan perlakuan UV-C (Onik *et al.*, 2019).

Penelitian terbaru oleh Hahlbohm *et al.* (2025) dalam artikel *UV-C treatment has a higher efficacy on reducing germination of spores rather than mycelium growth* juga relevan, khususnya terkait jamur *Fusarium oxysporum*. Mereka membandingkan efektivitas UV-C pada spora dan miselium, dan hasilnya menunjukkan bahwa spora lebih rentan terhadap paparan UV-C dibandingkan miselium. Efek inaktivasi meningkat pada dosis menengah tinggi, sedangkan miselium membutuhkan paparan lebih lama untuk menunjukkan penurunan pertumbuhan yang signifikan. Hal ini menguatkan pentingnya penyesuaian parameter paparan UV-C berdasarkan fase pertumbuhan jamur yang ditargetkan. Pengaruh dosis UV-C terhadap produksi spora relatif jamur patogen pascapanen ditunjukkan pada **Gambar 2.22**.



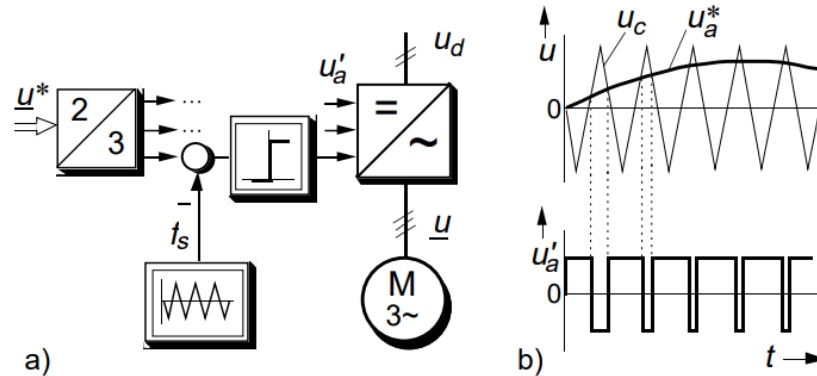
Gambar 2.22 Pengaruh dosis UV-C terhadap produksi spora relatif beberapa jenis jamur patogen pascapanen (Hahlbohm *et al.*, 2025).

Meskipun banyak bukti mendukung efektivitas UV-C, tantangan praktis tetap ada, terutama distribusi cahaya yang tidak merata akibat bentuk buah apel yang bulat. Area bayangan dapat menjadi titik rawan tempat spora bertahan hidup. Oleh karena itu, dari perspektif rancang bangun alat, dibutuhkan solusi berbasis fisika instrumentasi seperti penggunaan reflektor alumunium, sistem rotasi *tray*, dan integrasi sensor intensitas cahaya. Dengan kontrol berbasis *Arduino Uno R3* (chip ATmega328P) dan modul PWM, dosis paparan dapat diatur secara *real-time* sehingga konsistensi penyinaran terjaga. Hal ini memastikan bahwa perlakuan UV-C tidak hanya efektif melawan *Fusarium oxysporum*, tetapi juga reproduibel untuk aplikasi penelitian maupun industri hortikultura.

2.8 Pulse Width Modulation (PWM)

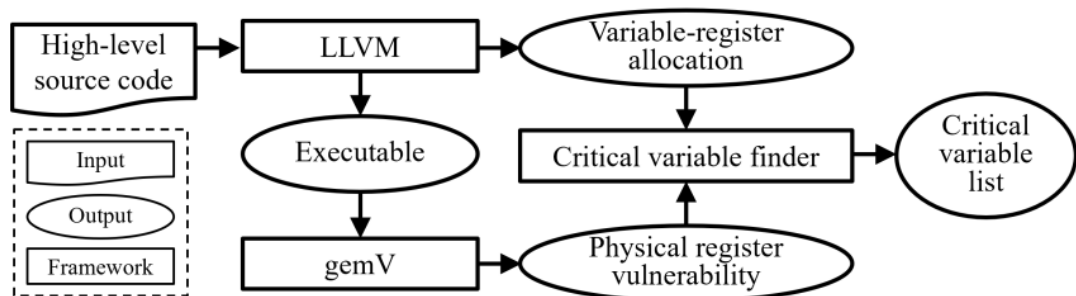
Pulse Width Modulation (PWM) merupakan metode kontrol elektronika yang digunakan untuk menghasilkan sinyal analog semu dengan cara memodulasi lebar pulsa dari sinyal digital. Melalui perubahan durasi aktif (*duty cycle*) terhadap periode sinyal tetap, PWM memungkinkan pengaturan daya rata-rata yang

dikirimkan ke suatu perangkat elektronik tanpa memerlukan konversi digital-ke-analog secara langsung. Teknik ini umum diterapkan dalam berbagai sistem seperti kontrol motor, pengendalian sumber daya, serta sistem pencahayaan berbasis LED. Dalam konteks penelitian ini, PWM memiliki peran krusial dalam mengatur intensitas cahaya UV-C pada box sterilisasi apel pascapanen berbasis *Arduino Uno R3*. Pengaturan nilai *duty cycle* menentukan besarnya energi cahaya yang dipancarkan oleh lampu UV-C, sehingga sistem dapat meningkatkan atau menurunkan intensitas radiasi sesuai kebutuhan perlakuan. Dengan demikian, penggunaan PWM memungkinkan optimasi parameter penyinaran dalam menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* tanpa menyebabkan degradasi mutu pada buah apel (*Malus domestica*). Penelitian oleh Saponara dan Bacchillone (2020) menegaskan bahwa PWM merupakan metode paling efisien untuk mengendalikan *output* cahaya dari sistem berbasis LED maupun sumber optik modern, karena memiliki keunggulan dalam efisiensi energi, stabilitas daya keluaran, serta respons dinamis yang tinggi. Selain itu, studi oleh Yilmaz *et al.* (2022) menunjukkan bahwa penerapan PWM dalam sistem iluminasi UV-C dapat meningkatkan efisiensi desinfeksi dengan konsumsi daya minimal, menjadikannya solusi unggul untuk aplikasi sterilisasi berbasis mikrokontroler seperti *Arduino Uno R3*. Penerapan PWM pada *Arduino Uno R3* dimungkinkan karena *chip ATmega328P* memiliki *hardware timers* yang mampu menghasilkan sinyal PWM dengan frekuensi stabil. Sinyal PWM tersebut dapat digunakan untuk mengatur *driver* lampu UV-C melalui transistor atau modul *dimmer* elektronik, sehingga intensitas cahaya bisa dikontrol secara presisi. Studi oleh Holtz & Choi (2021) dalam *MDPI Energies* menegaskan bahwa variasi *duty cycle* mampu memberikan fleksibilitas kontrol daya yang lebih besar dibanding metode analog konvensional, dengan keunggulan berupa respons cepat dan efisiensi tinggi. Dengan demikian, PWM menjadi pendekatan instrumentasi yang mendukung penelitian berbasis cahaya UV-C, karena menjaga presisi dosis radiasi yang diberikan ke permukaan apel selama proses perlakuan. Diagram alir sinyal dan bentuk gelombang fasa a ditunjukkan pada **Gambar 2.23**.



Gambar 2.23 (a) Diagram alir sinyal dan (b) bentuk gelombang fasa a (Holtz & Choi, 2021).

Selain itu, PWM dapat dikombinasikan dengan sistem kendali tertutup (*closed-loop control*) untuk menjaga kestabilan intensitas sinar UV-C. Integrasi sensor intensitas (*lux meter* atau sensor UV) dengan *Arduino* memungkinkan sistem membaca *output* cahaya secara *real-time*. Jika intensitas terdeteksi menurun akibat degradasi lampu, mikrokontroler dapat menyesuaikan *duty cycle* agar tetap berada pada *setpoint* yang diinginkan. Chen *et al.* (2021) dalam *MDPI Electronics* membuktikan bahwa pengaturan cahaya berbasis PWM dengan umpan balik sensor meningkatkan konsistensi dosis optik, sehingga hasil perlakuan lebih stabil dan reproduibel. Dalam penelitian ini, pendekatan tersebut penting untuk memastikan semua sampel apel mendapat perlakuan UV-C dengan dosis yang seragam, sehingga hasil perbandingan dengan kontrol menjadi valid secara ilmiah. Diagram kerangka estimasi kerentanan variabel tingkat tinggi ditunjukkan pada **Gambar 2.24**.



Gambar 2.24 Diagram kerangka estimasi kerentanan variabel tingkat tinggi (Chen *et al.*, 2021).

Dengan demikian, penggunaan PWM pada penelitian ini tidak hanya menegaskan kontribusi aspek fisika instrumentasi, tetapi juga memberikan keunggulan praktis

berupa fleksibilitas pengaturan, efisiensi energi, dan kestabilan *output* cahaya. Kombinasi *Arduino Uno R3*, teknik PWM, serta sensor optik menjadikan sistem sterilisasi apel pascapanen ini sebagai contoh nyata bagaimana konsep elektronika terapan dapat menjawab tantangan pascapanen yang sebelumnya hanya ditangani melalui pendekatan kimiawi.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu sejak bulan September 2025 hingga November 2025. Kegiatan perancangan, perakitan, serta pengujian awal alat sterilisasi berbasis sinar *Ultraviolet-C* (UV-C) dilakukan di Laboratorium Elektronika Dasar dan Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Sementara itu, proses kultur jamur *Fusarium oxysporum*, persiapan media *Potato Dextrose Agar* (PDA), serta perlakuan penyinaran dan pengamatan pertumbuhan miselia dilaksanakan di Laboratorium Mikrobiologi, Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Pemilihan kedua laboratorium tersebut didasarkan pada kebutuhan penelitian yang bersifat multidisiplin, yaitu integrasi antara fisika instrumentasi dalam perancangan alat dan mikrobiologi dalam pengujian efektivitas alat terhadap penghambatan jamur patogen pascapanen.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 3.1** sebagai berikut.

Tabel 3.1 Alat yang digunakan dalam penelitian

No.	Alat	Fungsi
1	Lampu UV-C	Sumber radiasi UV-C dengan variasi panjang gelombang (200, 220, 280 nm) untuk perlakuan terhadap kultur jamur.
2	<i>Arduino Uno R3</i>	Mikrokontroler sebagai pusat pengendali sistem, mengatur waktu, intensitas, dan lama penyinaran lampu UV-C.

No.	Alat	Fungsi
3	Keypad 4×4	Input manual untuk memasukkan parameter (waktu paparan, pilihan panjang gelombang).
4	Lux meter Digital LX1010B	Mengukur intensitas cahaya UV-C dalam satuan lux sebagai bagian dari kalibrasi dan validasi alat.
5	Modul AC Light Dimmer	Mengatur intensitas cahaya lampu UV-C melalui kontrol berbasis PWM.
6	LCD 16×4	Menampilkan informasi parameter alat (durasi penyinaran, panjang gelombang, intensitas cahaya) dengan tampilan lebih luas.
7	PC atau Laptop	Digunakan untuk pemrograman <i>Arduino</i> , pengolahan data, serta analisis hasil penelitian.
8	Solder	Merangkai dan menyambungkan komponen elektronik pada rangkaian alat.
9	Bor	Membuat lubang pada box atau tempat pemasangan komponen alat.
10	Obeng	Peralatan mekanik untuk merakit atau melepas komponen alat.
11	Tang	Digunakan untuk menjepit atau memotong kabel saat perakitan alat.
12	Penggaris	Mengukur diameter pertumbuhan miselia jamur pada media PDA.
13	Cawan Petri	Wadah kultur jamur <i>Fusarium oxysporum</i> dalam media PDA.
14	Erlenmeyer	Wadah untuk menyiapkan dan mensterilisasi media PDA.
15	Bunsen	Sumber api untuk sterilisasi alat kecil (ose, pinset) secara aseptis.
16	Ose	Alat inokulasi untuk memindahkan isolat jamur ke media PDA.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 3.2** sebagai berikut.

Tabel 3.2 Bahan yang digunakan dalam penelitian

No.	Bahan	Fungsi
1	Isolat <i>Fusarium oxysporum</i>	Jamur patogen yang digunakan sebagai organisme uji.
2	Media PDA (<i>Potato Dextrose Agar</i>)	Media pertumbuhan miselia jamur.
3	Akuades	Pelarut untuk pembuatan media dan proses sterilisasi.
4	<i>Chloramphenicol</i>	Antibiotik tambahan pada media PDA untuk mencegah pertumbuhan bakteri kontaminan.
5	Alkohol 70%	Bahan sterilisasi untuk alat kecil dan permukaan kerja agar tetap aseptis.

Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini disajikan dalam **Tabel 3.3** sebagai berikut.

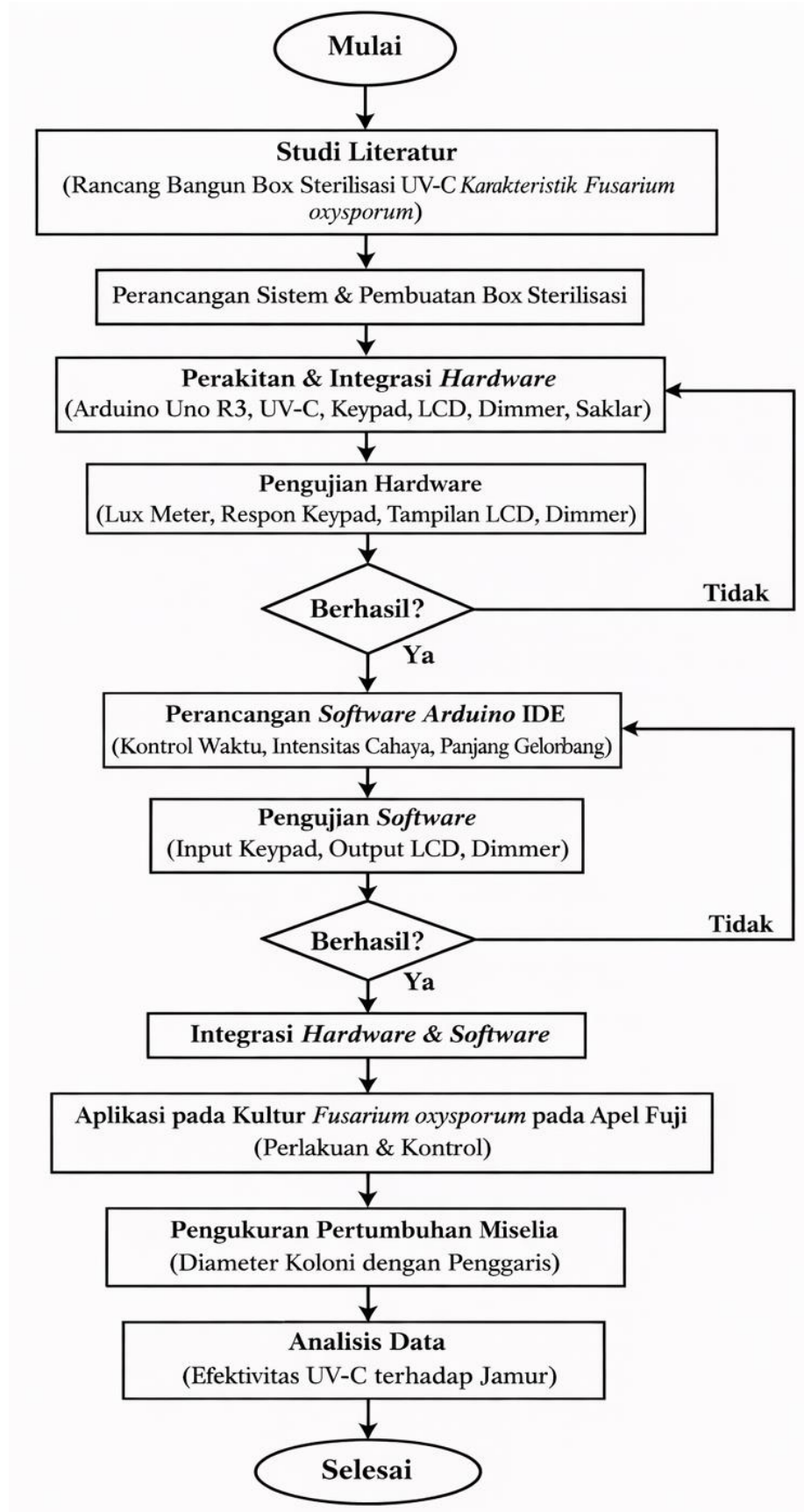
Tabel 3.3 Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian

No.	Nama	Fungsi
1	<i>Fritzing</i>	Digunakan untuk membuat rancangan skematik rangkaian serta melakukan simulasi elektronika.
2	<i>Arduino IDE</i>	Digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler <i>Arduino</i> .
3	<i>Microsoft Office Word 2021</i>	Digunakan untuk menyusun, mengetik, dan menyunting laporan penelitian.
4	<i>Microsoft Office Visio 2021</i>	Digunakan untuk membuat diagram blok, flowchart, serta ilustrasi alur sistem penelitian.
5	<i>OriginLab 8</i>	Digunakan untuk mengolah data eksperimen dan menampilkan hasil dalam bentuk grafik ilmiah.
6	<i>SketchUp</i>	Digunakan untuk membuat rancangan tiga dimensi (3D) dari prototipe alat sterilisasi UV-C.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis agar penelitian dapat berjalan terarah dan sesuai dengan tujuan yang ditetapkan. Tahap awal dimulai dengan studi literatur melalui penelusuran buku, jurnal, artikel ilmiah, dan sumber terpercaya lainnya yang berkaitan dengan rancang bangun alat sterilisasi menggunakan sinar UV-C, sistem kendali berbasis mikrokontroler *Arduino Uno R3*, serta karakteristik pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum*. Studi literatur ini bertujuan untuk memperoleh dasar teori, konsep kerja, serta kajian penelitian terdahulu yang relevan sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam perancangan alat dan pelaksanaan penelitian. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem dan pembuatan box sterilisasi yang digunakan sebagai wadah perlakuan penyinaran. Pada tahap ini dilakukan penentuan dimensi box, perancangan tata letak lampu UV-C, serta penempatan komponen elektronik seperti *keypad* 4×4 dan LCD 16×4 pada bagian depan box agar mudah dioperasikan. Perancangan box ini juga memperhatikan faktor keamanan, seperti penggunaan saklar *on/off* serta pemisahan jalur tegangan AC untuk lampu dengan tegangan DC yang digunakan oleh *Arduino* dan komponen kontrol lainnya. Tahap selanjutnya adalah perakitan dan integrasi perangkat keras (*hardware*) yang meliputi pemasangan *Arduino Uno R3* sebagai pusat kendali,

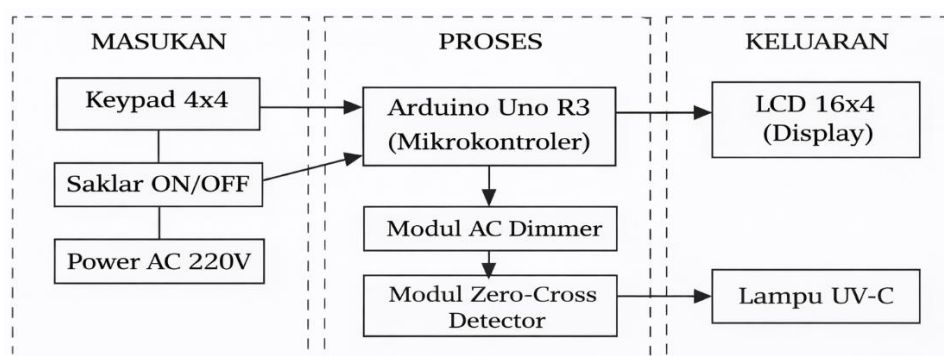
penyambungan *keypad* 4×4 sebagai *input*, LCD 16×4 sebagai penampil informasi, serta modul *dimmer* dan *zero-cross detector* yang berfungsi mengendalikan intensitas cahaya lampu UV-C. Lampu UV-C dengan variasi panjang gelombang yang digunakan kemudian dipasang di dalam box sterilisasi sesuai dengan rancangan. Setelah perangkat keras selesai dirakit, dilakukan pengujian awal untuk memastikan rangkaian berfungsi dengan baik. Pengujian *hardware* dilakukan dengan mengukur intensitas penyinaran menggunakan *lux meter*, memastikan tampilan pada LCD terbaca dengan jelas, serta memeriksa respon *keypad* dan fungsi pengaturan *dimmer*. Apabila pengujian menunjukkan hasil yang belum sesuai, maka dilakukan perbaikan rangkaian atau penyesuaian konfigurasi. Setelah perangkat keras dapat bekerja dengan baik, dilakukan perancangan perangkat lunak (*software*) menggunakan *Arduino IDE*. Pemrograman ini difokuskan pada pengaturan parameter penyinaran, meliputi waktu paparan, pilihan panjang gelombang, serta kontrol intensitas lampu. *Software* yang telah dirancang kemudian diuji melalui proses simulasi dan pengujian langsung dengan perangkat keras untuk memastikan logika kontrol berjalan dengan benar. Pengujian *software* mencakup respon *input* dari *keypad*, kesesuaian informasi pada LCD, serta kemampuan *dimmer* dalam mengatur intensitas cahaya lampu UV-C sesuai dengan program. Jika program belum berjalan dengan baik, dilakukan debugging hingga sistem berfungsi sesuai rancangan. Tahap berikutnya adalah integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak untuk membentuk sebuah sistem box sterilisasi UV-C yang utuh. Setelah sistem terintegrasi dengan baik, penelitian dilanjutkan pada tahap aplikasi biologis. Kultur jamur *Fusarium oxysporum* yang telah diinokulasikan pada apel varietas *Fuji* diberikan perlakuan berupa penyinaran dengan variasi panjang gelombang dan lama paparan sesuai rancangan penelitian. Sebagai pembanding, disiapkan pula kontrol berupa kultur jamur yang tidak disinari UV-C. Pengamatan pertumbuhan jamur dilakukan dengan mengukur diameter koloni miselia pada media PDA menggunakan penggaris. Data hasil pengukuran dari perlakuan dan kontrol selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh penyinaran UV-C dalam menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum*. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian ini digambarkan dalam diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.

3.4 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Perancangan perangkat keras pada penelitian ini difokuskan pada pembuatan box sterilisasi yang dilengkapi dengan sistem kendali berbasis mikrokontroler *Arduino Uno R3*. Box ini berfungsi sebagai wadah penyinaran yang dilengkapi dengan lampu UV-C sebagai sumber radiasi untuk menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* pada apel varietas *Fuji*. Desain box dibuat dengan mempertimbangkan tata letak lampu, posisi *input-output*, serta aspek keamanan melalui penggunaan saklar utama. Perangkat keras yang digunakan terdiri dari beberapa komponen utama. *Arduino Uno R3* berperan sebagai pusat pengendali sistem yang mengatur jalannya proses sterilisasi. *Input* diperoleh melalui *keypad* 4×4 yang digunakan untuk memasukkan parameter seperti waktu paparan dan pilihan panjang gelombang. *Output* sistem berupa tampilan LCD 16×4 yang menampilkan informasi status alat serta modul *dimmer* yang mengatur intensitas penyinaran lampu UV-C. Modul *zero-cross detector* digunakan untuk mendukung pengendalian tegangan AC pada *dimmer*, sehingga penyinaran dapat berlangsung stabil. Lampu UV-C dengan variasi panjang gelombang dipasang pada bagian atas box sterilisasi untuk memastikan distribusi radiasi yang merata ke seluruh sampel. Selain itu, saklar *on/off* dipasang sebagai pengaman utama untuk memutus atau menghubungkan aliran listrik. Rangkaian perangkat keras ini dirancang agar *input*, proses, dan *output* dapat saling terintegrasi, sehingga sistem bekerja secara otomatis sesuai parameter yang dimasukkan. Perancangan perangkat keras pada sistem box sterilisasi UV-C ditunjukkan melalui diagram blok pada **Gambar 3.2**.



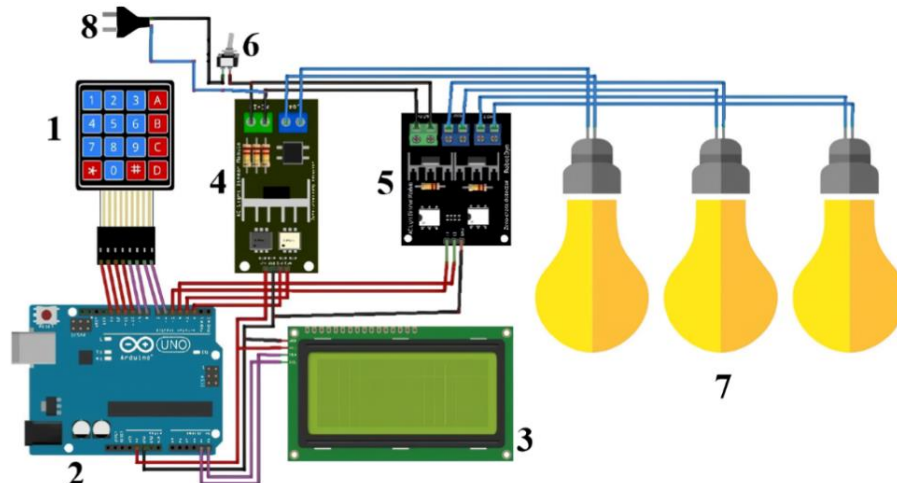
Gambar 3.2 Diagram blok sistem box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3*.

Diagram blok pada **Gambar 3.2** memperlihatkan alur kerja sistem box sterilisasi UV-C yang dirancang pada penelitian ini. Bagian masukan (*input*) terdiri atas

keypad 4×4 yang berfungsi untuk memasukkan parameter kontrol seperti waktu paparan dan pilihan panjang gelombang, serta saklar *on/off* sebagai pengaman utama untuk memutus dan menghubungkan arus listrik. Bagian proses dikendalikan oleh mikrokontroler *Arduino Uno R3* yang berperan sebagai pusat pengendali sistem. *Arduino* mengolah *input* dari *keypad* dan saklar, kemudian menghasilkan sinyal keluaran sesuai dengan program yang telah ditanamkan. Bagian keluaran (*output*) terdiri dari LCD 16×4 yang digunakan untuk menampilkan informasi status alat, serta modul *dimmer* yang menerima sinyal kendali dari *Arduino* untuk mengatur intensitas penyinaran lampu UV-C. Modul *dimmer* terhubung langsung dengan lampu UV-C yang berfungsi sebagai sumber radiasi pada box sterilisasi. Dengan rancangan ini, sistem dapat bekerja secara otomatis dan terintegrasi untuk mendukung proses sterilisasi apel pascapanen terhadap jamur *Fusarium oxysporum*.

3.4.1 Rangkaian Keseluruhan Sistem

Rangkaian keseluruhan sistem pada penelitian ini dirancang untuk mengintegrasikan seluruh komponen perangkat keras agar dapat bekerja sesuai fungsi yang diharapkan. Rangkaian terdiri atas mikrokontroler *Arduino Uno R3* sebagai pusat kendali, *keypad* 4×4 sebagai masukan (*input*) untuk mengatur parameter penyinaran, LCD 16×4 sebagai penampil informasi sistem, serta modul *input dimmer* yang digunakan untuk mengendalikan intensitas penyinaran lampu UV-C. Selain itu, rangkaian juga dilengkapi dengan modul *zero-cross detector* yang berfungsi sebagai pendeteksi titik nol sinyal AC sehingga *dimmer* dapat mengatur tegangan secara stabil. Pada rangkaian ini, *keypad* 4×4 dihubungkan ke port digital *Arduino Uno R3* untuk memasukkan perintah berupa waktu paparan dan pilihan panjang gelombang. *Arduino* kemudian mengolah data *input* tersebut dan menampilkan status pada LCD 16×4. Sinyal kendali dari *Arduino* dikirimkan ke modul *dimmer* yang selanjutnya mengatur intensitas cahaya lampu UV-C sesuai dengan program yang ditanamkan. Lampu UV-C dipasang pada bagian box sterilisasi dan menjadi sumber radiasi utama dalam proses perlakuan terhadap kultur jamur *Fusarium oxysporum*. Rangkaian keseluruhan sistem box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3* ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Rangkaian keseluruhan sistem box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3*.

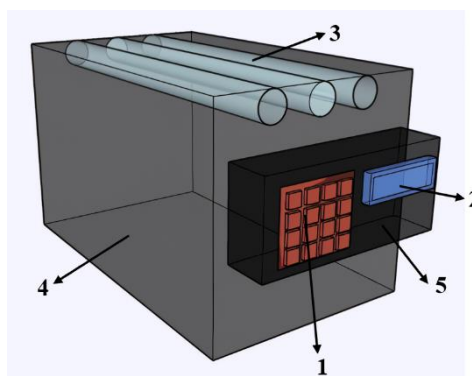
Keterangan nomor gambar dalam kompoen rangkaian keseluruhan sistem ini disajikan dalam **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Komponen rangkaian keseluruhan sistem

No.	Nama Komponen	Fungsi
1	Keypad 4×4	<i>Input</i> manual untuk memasukkan parameter penyinaran (waktu, panjang gelombang).
2	Arduino Uno R3	Mikrokontroler sebagai pusat kendali sistem, mengolah <i>input</i> dan mengatur <i>output</i> .
3	LCD 16×4	Menampilkan status alat, parameter waktu, intensitas, serta informasi penyinaran.
4	Modul AC <i>Light Dimmer</i>	Mengatur intensitas lampu UV-C berdasarkan sinyal kendali dari <i>Arduino</i> .
5	Modul Zero-Cross Detector	Mendeteksi titik nol sinyal AC untuk kestabilan pengaturan tegangan pada <i>dimmer</i> .
6	Saklar <i>ON/OFF</i>	Pengaman utama untuk memutus dan menghubungkan arus listrik sistem.
7	Lampu UV-C	Sumber radiasi utama dengan variasi panjang gelombang (200, 220, 280 nm) untuk perlakuan pada kultur jamur <i>Fusarium oxysporum</i> .
8	Power AC 220V	Catu daya utama untuk menyalakan seluruh rangkaian dan komponen elektronik.

3.4.2 Desain Alat Keseluruhan

Desain alat keseluruhan pada penelitian ini berupa box sterilisasi berbasis radiasi sinar UV-C yang digunakan untuk memberikan perlakuan terhadap kultur jamur *Fusarium oxysporum* pada buah apel varietas *Fuji*. Box ini berfungsi sebagai ruang perlakuan yang terisolasi sehingga paparan radiasi UV-C hanya terkonsentrasi di dalam ruangan sterilisasi dan tidak menyebar ke lingkungan luar. Box dibuat dari bahan akrilik hitam berbentuk persegi panjang dengan dimensi panjang 65 cm, tinggi 30 cm, dan lebar 30 cm. Pemilihan material akrilik hitam bertujuan untuk mencegah kebocoran sinar UV-C ke lingkungan serta memberikan perlindungan tambahan bagi pengguna. Pada bagian atas box terpasang tiga buah lampu UV-C yang berfungsi sebagai sumber radiasi dengan variasi panjang gelombang 200 nm, 220 nm, dan 280 nm. Panel depan box dilengkapi dengan *keypad* 4×4 sebagai *input* parameter (durasi waktu dan pengaturan penyinaran), serta LCD 16×4 untuk menampilkan informasi status alat, parameter waktu, dan intensitas penyinaran. Sistem pengendali alat ditempatkan pada panel kontrol yang terintegrasi di dalam box, berisi rangkaian elektronik berupa *Arduino Uno R3*, modul *dimmer*, dan modul *zero-cross detector*. *Arduino Uno R3* berperan sebagai pusat pengendali yang mengolah *input* dari *keypad* dan saklar *on/off*, lalu mengatur keluaran ke modul *dimmer* serta menampilkan informasi pada LCD. Modul *dimmer* bekerja mengatur intensitas cahaya lampu UV-C dengan bantuan *zero-cross detector* agar penyinaran lebih stabil. Dengan desain ini, alat dapat bekerja secara terintegrasi mulai dari *input* pengguna, pemrosesan oleh mikrokontroler, hingga keluaran berupa tampilan informasi dan penyinaran UV-C yang terkendali. Desain keseluruhan alat box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3* ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Desain alat keseluruhan box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3*.

Keterangan nomor gambar dalam spesifikasi box sterilisasi ini disajikan dalam **Tabel 3.5** sebagai berikut.

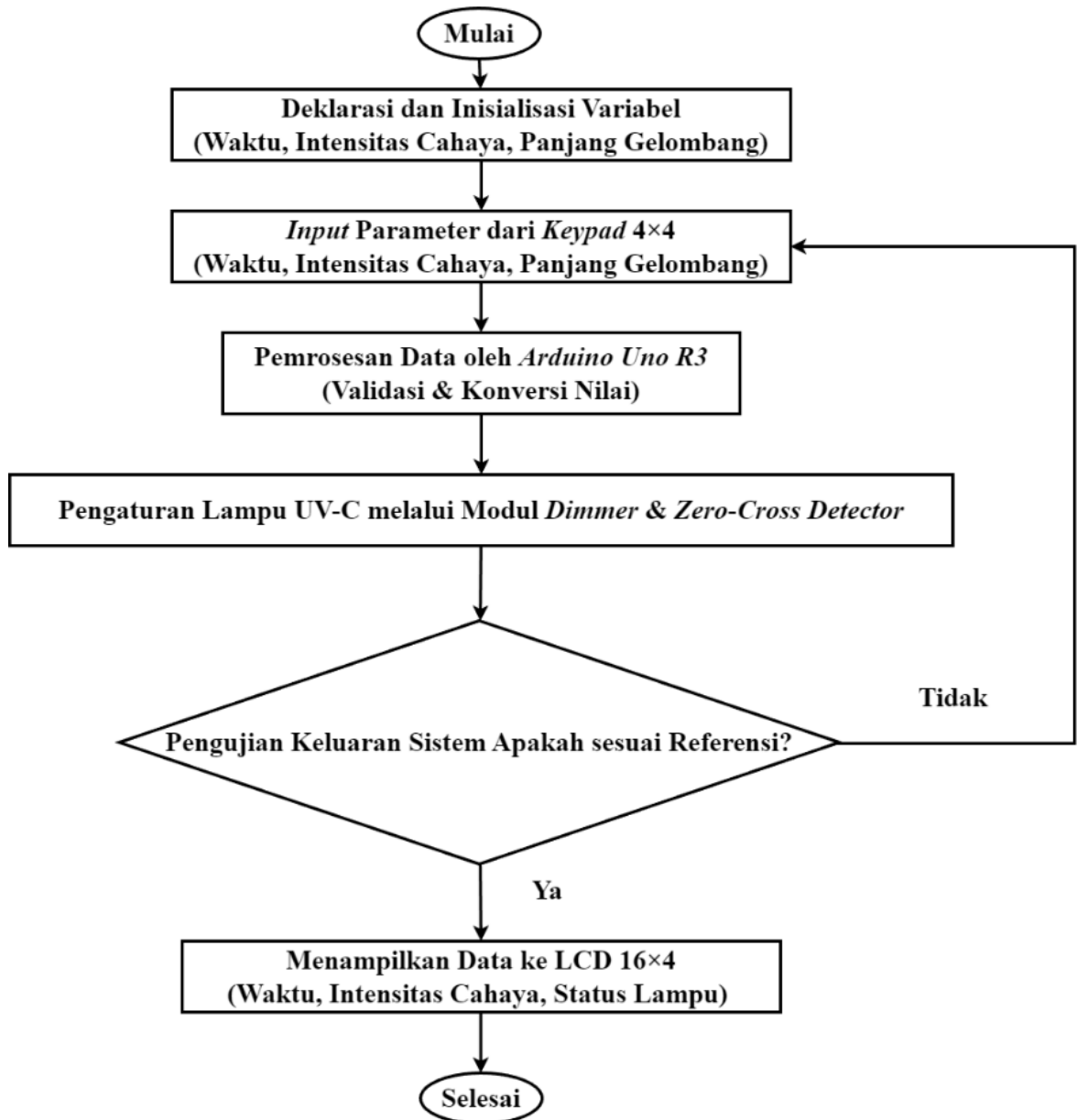
Tabel 3.5 Spesifikasi box sterilisasi

No.	Komponen	Keterangan
1	Keypad 4×4	Digunakan sebagai <i>input</i> untuk memasukkan parameter penyinaran (waktu dan intensitas).
2	LCD 16×4	Menampilkan informasi status alat, parameter penyinaran, dan waktu proses.
3	Lampu UV-C	Sumber radiasi utama (3 buah) dengan variasi panjang gelombang 200 nm, 220 nm, 280 nm.
4	Box Akrilik Hitam	Ruang sterilisasi berukuran 65 cm × 30 cm × 30 cm untuk mencegah kebocoran radiasi.
5	Panel Kontrol (Box Plastik Hitam)	Berisi rangkaian sistem (<i>Arduino Uno R3</i> , modul <i>dimmer</i> , <i>zero-cross detector</i> , <i>wiring</i>) sebagai pusat kendali alat.

3.5 Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Perancangan perangkat lunak pada penelitian ini menggunakan *Arduino IDE* sebagai media pemrograman mikrokontroler *Arduino Uno R3*. Perangkat lunak dirancang untuk mengolah masukan dari keypad 4×4, melakukan validasi parameter penyinaran, serta mengendalikan kerja lampu UV-C melalui modul *dimmer* dan *zero-cross detector*. Selain itu, perangkat lunak menampilkan informasi penyinaran sebagai keluaran pada LCD 16×4. Proses kerja diawali dengan inisialisasi variabel sistem yang meliputi waktu paparan, intensitas cahaya, dan panjang gelombang radiasi. Selanjutnya, pengguna memasukkan parameter penyinaran melalui keypad 4×4 berupa lama penyinaran dan intensitas radiasi sesuai panjang gelombang yang dipilih, yaitu 200 nm, 220 nm, dan 280 nm. Data masukan tersebut diproses oleh mikrokontroler untuk dilakukan validasi dan konversi menjadi sinyal kendali, yang kemudian dikirim ke modul *dimmer* melalui *zero-cross detector* agar intensitas lampu UV-C dapat diatur secara stabil sesuai parameter yang ditetapkan. Setelah itu, sistem melakukan pengujian keluaran dengan membandingkan parameter aktual terhadap nilai referensi. Apabila hasil pengujian belum sesuai, sistem akan kembali meminta masukan parameter hingga

diperoleh nilai yang valid. Jika hasil telah sesuai, data keluaran berupa waktu, intensitas, panjang gelombang, serta status lampu ditampilkan pada LCD 16×4. Alur kerja perangkat lunak sistem box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3* ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Perancangan perangkat lunak (*software*) box sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3*.

3.6 Persiapan Kultur *Fusarium oxysporum*

3.6.1 Pembuatan Media Tumbuh *Fusarium oxysporum*

Media tumbuh *Fusarium oxysporum* (Fox) berupa media *Potato Dextrose Agar* (PDA), yang umum digunakan dalam kultivasi kapang secara *in vitro*. Media PDA (Merck; komposisi (g L⁻¹): *potato infusion* 4 (*from 200 g potatoes*); *dextrose* 20; *agar* 15) ditimbang sebanyak 39 g dan dilarutkan dengan 1000 mL akuades (d disesuaikan dengan kebutuhan) di dalam gelas Beaker. Campuran dihomogenkan dengan batang pengaduk, diukur pH-nya hingga mencapai kisaran 5-6, dan dipanaskan hingga mendidih. Media yang telah matang dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer steril dan disterilisasi di dalam autoklaf pada suhu 121 °C, tekanan 0,1 MPa, selama 15-20 menit. Media hasil sterilisasi didinginkan hingga suhu 40-50 °C, ditambahkan antibakteri berupa *Chloramphenicol* sebanyak 200 mg L⁻¹ (Heroine *et al.*, 2020), kemudian dituang pada cawan Petri steril (diameter 100 mm) secara aseptis. Media didiamkan hingga memadat dan siap digunakan.

3.6.2 Subkultur Isolat *Fusarium oxysporum*

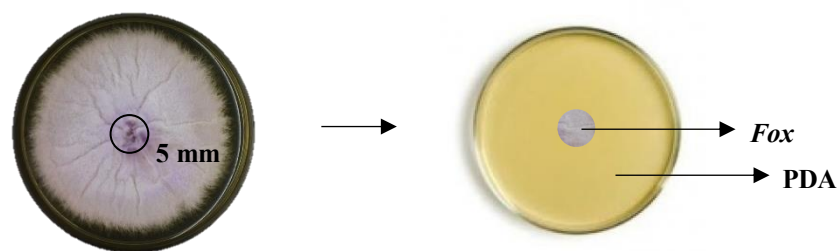
Isolat *Fusarium oxysporum* (Fox) yang disubkultur berasal dari koleksi Laboratorium Mikrobiologi, Jurusan Biologi, FMIPA, UNILA. Isolat tersebut telah diketahui sebagai kapang patogen terhadap buah apel, berdasarkan hasil uji *in vivo* yang telah dilakukan sebelumnya. Subkultur dilakukan dengan metode inokulasi titik, dimana kultur (media PDA) sebelumnya dipotong seukuran 5 x 5 mm dengan jarum ose runcing dan potongan agar tersebut diletakkan pada permukaan media PDA dalam cawan Petri (Chakrapani *et al.*, 2023). Kultur hasil inokulasi dalam cawan Petri disegel dengan *plastic wrap*, ditutup dengan kertas, dan diinkubasi pada kondisi suhu ruang (± 28 °C) selama 7 hari, hingga akhirnya diperoleh kultur dalam kondisi optimum.

3.7 Uji Pengaruh Sinar UV-C terhadap Pertumbuhan *Fusarium oxysporum*

3.7.1 Kultivasi *Fusarium oxysporum* untuk Radiasi Sinar UV-C

Kultivasi *Fusarium oxysporum* (Fox) untuk radiasi sinar UV dilakukan dengan metode inokulasi titik, dimana kultur (media PDA) usia 7 hari dipotong berbentuk

lingkaran (diameter 5 mm) dengan sedotan kertas steril dan potongan agar tersebut diletakkan dengan jarum ose atau pinset steril tepat di titik tengah permukaan media PDA dalam cawan Petri (diameter 90 mm). Kultivasi dilakukan sebanyak 3 ulangan untuk setiap variasi perlakuan dan kontrol. Kultur hasil inokulasi dalam cawan Petri disegel dengan *plastic wrap*, ditutup dengan kertas, dan diinkubasi pada kondisi suhu ruang ($\pm 28^\circ\text{C}$) selama 1 hari. Inkubasi awal tersebut memungkinkan pertumbuhan hifa hingga ± 3 mm dan kultur siap untuk radiasi sinar UV-C (Torres *et al.*, 2019). Skema proses kultivasi untuk perlakuan radiasi sinar UV ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Kultivasi untuk radiasi sinar UV: = potongan agar dari kultur usia 7 hari; PDA = media *Potato Dextrose Agar* dalam cawan Petri.

3.7.2 Radiasi Sinar UV-C terhadap Kultur *Fusarium oxysporum*

Kultur *Fusarium oxysporum* (*Fox*) dalam cawan Petri diradiasikan dengan sinar UV-C dari instrumen yang telah dirancang sebelumnya. Radiasi sinar UV-C terhadap kultur *Fox* dilakukan dengan 3 panjang gelombang cahaya yaitu 200, 220, dan 280 nm selama t 3 jam. Setiap variasi perlakuan diberikan 4 ulangan kultur *Fox*. Pada kultur *Fox* tanpa radiasi sinar UV-C dianggap sebagai kontrol dalam uji. Setelah radiasi selesai, cawan Petri berisi kultur *Fox* diinkubasi kembali.

3.8 Evaluasi Pengaruh Radiasi Sinar UV-C terhadap Pertumbuhan Miselia dan Tingkat Penghambatan *Fusarium oxysporum*

Pengaruh sinar UV terhadap pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum* (*Fox*) ditentukan melalui pengukuran diameter miselia pada kultur dalam cawan Petri. Diameter miselia diukur dari 2 arah dengan penggaris, masing-masing dikurangi dengan diameter potongan agar kultur yang ditanam di awal, dan dirata-ratakan.

Pengukuran diameter miselia dilakukan terhadap 3 ulangan kultur, setiap hari, selama 7-14 hari atau hingga miselia pada kultur kontrol memenuhi seluruh cawan Petri (Saleh *et al.*, 2021). Data hasil pengukuran (satuan mm) dianalisis melalui regresi linear, sehingga diperoleh laju pertumbuhan miselia (mm hari⁻¹) dari setiap variasi perlakuan dan kontrol (Torres *et al.*, 2019). Skema pengukuran diameter miselia ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Pengukuran diameter miselia (Saleh *et al.*, 2021).

Pengaruh sinar UV terhadap tingkat penghambatan *Fusarium oxysporum* (Fox) ditentukan melalui data laju pertumbuhan miselia, baik pada kultur uji maupun kontrol. Data tersebut digunakan untuk penentuan persentase penghambatan (%), yang dihitung melalui rumus yang dinyatakan oleh Abdelrhim *et al.* (2023), sebagai berikut:

$$\text{Persentase Penghambatan Fox (\%)} = \frac{\text{LPM K} - \text{LPM U}}{\text{LPM K}} \times 100$$

dengan,

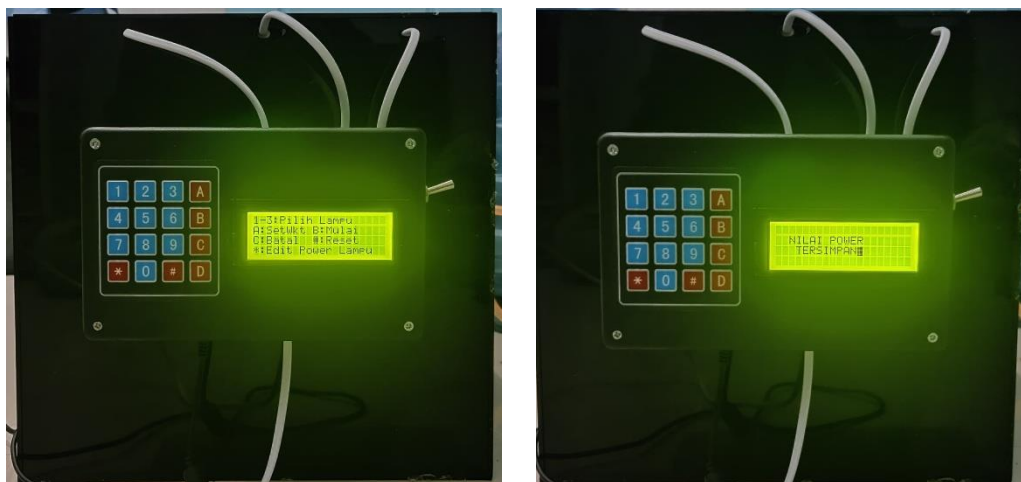
LPM K = laju pertumbuhan miselia pada kultur kontrol (mm hari⁻¹);

LPM U = laju pertumbuhan miselia pada kultur uji (mm hari⁻¹).

3.9 Sistem Kontrol Intensitas Cahaya

Pengaturan intensitas cahaya sinar UV-C pada alat sterilisasi dilakukan melalui panel kontrol berbasis *Arduino Uno R3* yang terintegrasi dengan keypad 4×4 dan LCD 16×2. Sistem ini memungkinkan pengguna memilih lampu UV-C (Lampu 1-3) sekaligus mengatur level intensitas penyinaran antara 10-90 lux sesuai kebutuhan pengujian. Nilai intensitas yang dipilih akan diproses oleh *Arduino* untuk

menyesuaikan keluaran daya lampu sehingga cahaya yang dihasilkan stabil dan terukur. Skema tampilan antarmuka sistem kontrol ditunjukkan pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.8 (a) Tampilan menu utama panel kontrol intensitas cahaya, dan (b) Tampilan konfirmasi penyimpanan nilai intensitas cahaya.

Pada **Gambar 3.8** menampilkan menu utama, pengguna memilih opsi *Edit Power Lampu* untuk melakukan pengaturan intensitas. Selanjutnya, nilai intensitas cahaya dimasukkan melalui *keypad*, seperti 10, 20, 30, hingga 90 lux. Setelah nilai dimasukkan, sistem menyimpan setpoint tersebut dan menampilkan pesan “Nilai Power Tersimpan” sebagai tanda bahwa pengaturan berhasil dilakukan. Nilai yang tersimpan akan digunakan *Arduino* untuk mengatur daya lampu UV-C sehingga intensitas cahaya yang dihasilkan sesuai dengan nilai yang diinput. Dengan mekanisme ini, setiap perlakuan penyinaran berlangsung pada intensitas cahaya yang seragam dan sesuai standar pengujian, sehingga memastikan hasil pengamatan pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* dapat diperbandingkan secara akurat antarperlakuan.

3.10 Pengambilan dan Pengujian Data Alat Sterilisasi

Tahap pengambilan dan pengujian data merupakan bagian penting dalam penelitian ini untuk memastikan bahwa alat sterilisasi otomatis berbasis *Arduino Uno R3* bekerja dengan baik sesuai rancangan dan dapat menghasilkan proses sterilisasi yang efektif terhadap jamur *Fusarium oxysporum*. Pengujian ini dilakukan setelah tahap perancangan perangkat keras dan perangkat lunak selesai, dengan tujuan untuk memperoleh data empiris yang menjadi dasar dalam analisis efektivitas sinar

UV-C terhadap pertumbuhan jamur uji pada apel pascapanen. Pengambilan dan pengujian data dilakukan dalam dua kategori utama, yaitu pengujian fungsional alat dan pengujian eksperimental terhadap jamur uji. Pengujian fungsional bertujuan untuk memastikan seluruh komponen elektronika seperti *keypad*, LCD, *dimmer*, dan sistem kontrol waktu bekerja secara sinkron dan stabil sesuai program. Sementara itu, pengujian eksperimental dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi panjang gelombang dan intensitas sinar UV-C terhadap laju pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* yang diinokulasikan pada media PDA (*Potato Dextrose Agar*). Seluruh proses pengujian dilakukan di dua lokasi, yaitu:

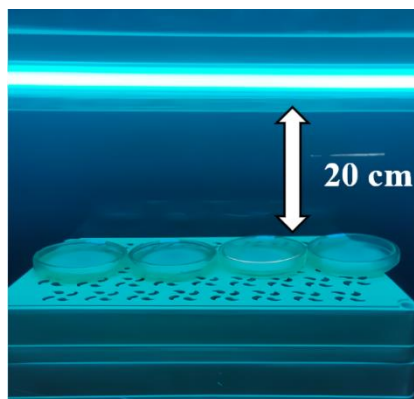
1. Laboratorium Elektronika Dasar dan Instrumentasi, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung sebagai tempat perakitan, kalibrasi, dan pengujian sistem alat.
2. Laboratorium Mikrobiologi, Jurusan Biologi FMIPA Universitas Lampung sebagai tempat pengujian biologis terhadap pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* yang telah diinokulasikan pada media PDA dan sampel apel varietas *Fuji*.

Pada tahap ini, posisi antara sumber cahaya UV-C dan cawan petri uji diatur secara konstan untuk menjamin keseragaman penyinaran yang diterima oleh sampel. Berdasarkan prinsip *inverse square law* dalam optika, intensitas cahaya menurun secara kuadrat terhadap jarak sumber. Oleh karena itu, jarak antara lampu UV-C dan media uji dijaga tetap sejauh 20 cm, yang ditetapkan berdasarkan hasil uji awal guna memperoleh intensitas penyinaran optimal tanpa menimbulkan kenaikan suhu signifikan di dalam box sterilisasi. Penjelasan tersebut akan diuraikan lebih lanjut pada subbab berikutnya yang membahas variasi panjang gelombang dan intensitas cahaya.

3.10.1 Pengujian Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Panjang Gelombang terhadap Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efektivitas sinar UV-C pada berbagai panjang gelombang dalam menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium oxysporum* yang diinokulasikan pada media PDA di dalam cawan petri. Variasi panjang gelombang yang digunakan adalah 200 nm, 220 nm, dan 280 nm dengan

waktu penyinaran konstan selama 3 jam. Setiap panjang gelombang memiliki empat ulangan perlakuan, sedangkan satu kelompok kontrol berisi empat cawan petri tanpa penyinaran UV-C sebagai pembanding. Selama tujuh hari pengamatan, dilakukan pengukuran diameter koloni jamur setiap hari setelah proses penyinaran, menggunakan penggaris berketelitian 1 mm untuk memastikan akurasi data. Penempatan cawan Petri dalam box sterilisasi UV-C ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



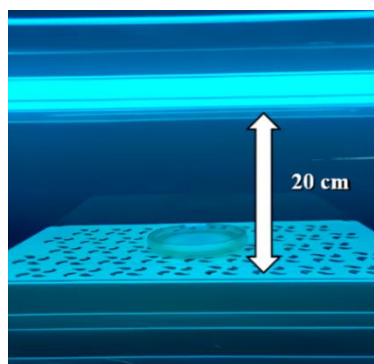
Gambar 3.9 Posisi empat cawan petri berisi jamur *Fusarium oxysporum* sejauh 20 cm dari sumber sinar UV-C di dalam box sterilisasi (Onik *et al.*, 2019).

Pada **Gambar 3.9** ditunjukkan posisi empat cawan petri di dalam box sterilisasi UV-C berbahan akrilik hitam. Setiap cawan berisi media PDA yang telah diinokulasikan jamur *Fusarium oxysporum* berumur tujuh hari. Keempat cawan diletakkan sejajar di atas rak akrilik berlubang dengan jarak konstan 20 cm dari sumber sinar UV-C agar penyinaran merata di seluruh permukaan koloni jamur. Box ini dirancang agar sinar UV-C tersebar secara difus tanpa menimbulkan pantulan berlebih yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Setelah seluruh sampel disinari, masing-masing cawan diinkubasi kembali dan diamati pertumbuhan miseliumnya setiap hari selama tujuh hari. Proses penyinaran ini dilakukan secara berulang dengan durasi tetap 3 jam per hari untuk setiap variasi panjang gelombang, sehingga pengaruh akumulatif radiasi UV-C terhadap laju pertumbuhan jamur dapat dianalisis secara kuantitatif.

3.10.2 Pengujian Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Intensitas Cahaya terhadap Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efektivitas sinar UV-C pada berbagai intensitas cahaya dalam menghambat pertumbuhan jamur *Fusarium*

oxysporum yang diinokulasikan pada media *Potato Dextrose Agar* (PDA) di dalam cawan petri. Variasi intensitas cahaya yang digunakan pada penelitian ini yaitu 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, dan 90 lux, dengan satu kelompok kontrol tanpa penyinaran UV-C sebagai pembanding. Setiap intensitas cahaya diwakili oleh satu cawan petri yang berisi koloni jamur *Fusarium oxysporum* berumur tujuh hari. Penyinaran dilakukan selama 3 jam per hari pada jarak tetap 20 cm dari sumber sinar UV-C, selama tujuh hari pengamatan berturut-turut. Setelah setiap sesi penyinaran, dilakukan pengukuran diameter koloni miselia menggunakan mistar dengan ketelitian 1 mm untuk memperoleh data pertumbuhan harian secara akurat. Penempatan cawan Petri untuk variasi intensitas UV-C ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Posisi cawan petri berisi jamur *Fusarium oxysporum* pada variasi intensitas cahaya sinar UV-C sejauh 20 cm dari sumber radiasi di dalam box sterilisasi (Onik *et al.*, 2019).

Pada **Gambar 3.10** diperlihatkan posisi cawan petri yang digunakan dalam uji variasi intensitas cahaya di dalam box sterilisasi UV-C berbahan akrilik hitam. Setiap cawan petri diletakkan sejajar di atas rak akrilik berlubang dengan jarak tetap 20 cm dari sumber sinar UV-C untuk memastikan distribusi radiasi yang merata pada seluruh permukaan koloni jamur. Pengaturan intensitas dilakukan menggunakan modul kontrol berbasis *Arduino Uno R3* yang mengatur *dimmer* lampu UV-C secara presisi, sementara nilai aktual intensitas cahaya diukur menggunakan *Lux Meter Digital LX1010B* yang ditempatkan sejajar dengan permukaan media PDA. Box sterilisasi ini dirancang agar sinar UV-C tersebar secara difus dan terkontrol, sehingga tidak menimbulkan pantulan berlebih yang dapat mengubah tingkat intensitas aktual pada area penyinaran. Setelah proses penyinaran selesai, masing-masing cawan diinkubasi kembali pada suhu ruang

laboratorium dan diamati pertumbuhan miseliumnya setiap hari selama tujuh hari berturut-turut. Prosedur ini diulangi untuk setiap variasi intensitas cahaya dengan durasi penyinaran tetap 3 jam per hari, sehingga efek radiasi UV-C terhadap laju pertumbuhan jamur dapat dianalisis secara kuantitatif dan terukur. Bagian berikutnya akan menyajikan hasil pengamatan pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum* pada setiap variasi intensitas cahaya (10-90 lux) serta kelompok kontrol tanpa penyinaran.

3.11 Uji Efektivitas Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Panjang Gelombang terhadap Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum*

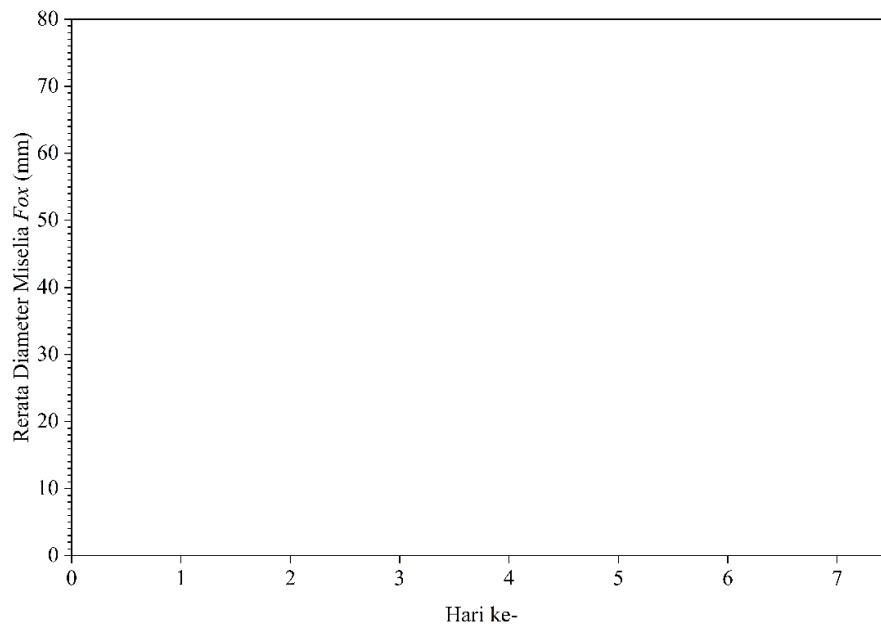
Uji efektivitas sinar UV-C berdasarkan variasi panjang gelombang bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan panjang gelombang terhadap laju pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum*. Pengamatan dilakukan selama tujuh hari berturut-turut, dengan perlakuan penyinaran menggunakan box sterilisasi UV-C selama 3 jam setiap hari. Perlakuan dilakukan pada tiga variasi panjang gelombang, yaitu 200 nm, 220 nm, dan 280 nm, serta satu kelompok kontrol tanpa penyinaran UV-C. Setiap sampel diamati dengan cara mengukur diameter koloni miselia menggunakan penggaris setiap 24 jam. Setelah dilakukan pengukuran, cawan kembali disinari UV-C sesuai perlakuan masing-masing. Hasil pengukuran pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum* pada variasi panjang gelombang sinar UV-C disajikan pada **Tabel 3.6**, masing-masing menunjukkan perkembangan pertumbuhan miselia dari hari ke-1 hingga hari ke-7.

Tabel 3.6 Data Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum* pada Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C (Hari ke-1 hingga Hari ke-7)

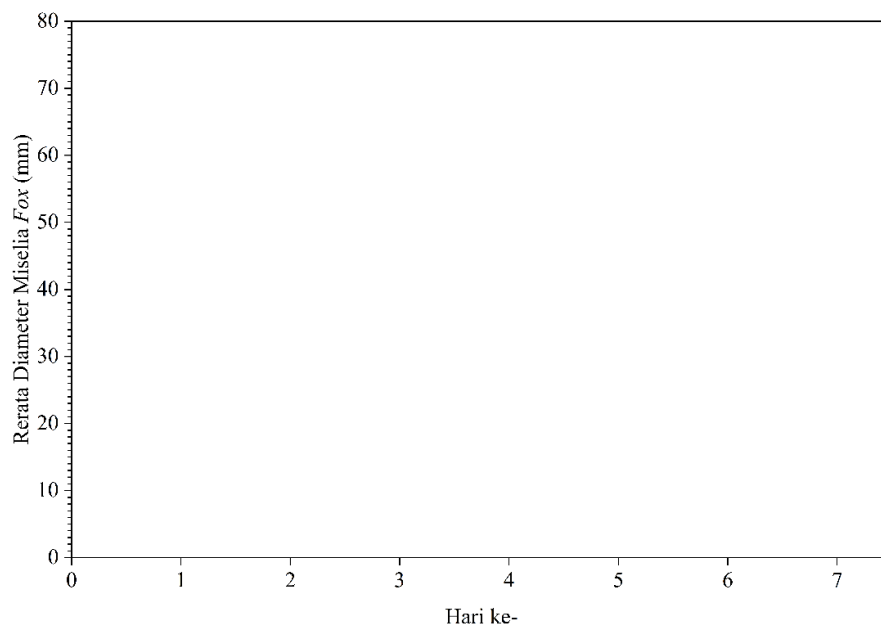
λ (nm)	Ulangan	AB (mm)	ab (mm)	CD (mm)	cd (mm)	(AB-ab) (mm)	(CD-cd) (mm)	Diameter Miselia (mm)	Rerata (mm)
200	1								
	2								
	3								
	4								
220	1								
	2								
	3								
	4								
280	1								
	2								
	3								
	4								
Kontrol	1								
	2								
	3								
	4								

Berdasarkan data pertumbuhan diameter miselia *Fusarium oxysporum* yang telah disajikan pada **Tabel 3.6**, maka data tersebut kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memperjelas kecenderungan pertumbuhan pada setiap variasi panjang gelombang sinar UV-C. Grafik ini menggambarkan hubungan antara lama pengamatan (hari ke-1 hingga hari ke-7) dengan rata-rata pertumbuhan miselia untuk masing-masing perlakuan, yaitu panjang gelombang 200 nm, 220 nm, 280 nm, serta kontrol tanpa penyinaran UV-C. Visualisasi ini bertujuan untuk memperlihatkan pola pertumbuhan miselia secara lebih komprehensif, sehingga perbedaan antarperlakuan dapat diamati dengan mudah. Melalui grafik tersebut, dapat dianalisis bagaimana variasi panjang gelombang sinar UV-C memengaruhi laju pertumbuhan jamur dibandingkan dengan kontrol. Perubahan diameter koloni dari hari ke hari menjadi indikator utama tingkat efektivitas penyinaran pada masing-masing panjang gelombang. Secara teoritis, semakin pendek panjang gelombang UV-C, maka energi foton yang dipancarkan semakin besar. Hal ini menyebabkan kerusakan DNA dan protein jamur lebih signifikan, sehingga pertumbuhan miselia akan lebih terhambat. Dengan demikian, hasil grafik diharapkan menunjukkan bahwa penyinaran pada panjang gelombang yang lebih pendek (200 nm) memiliki daya hambat paling tinggi terhadap pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum*. Untuk memperjelas fenomena tersebut, berikut

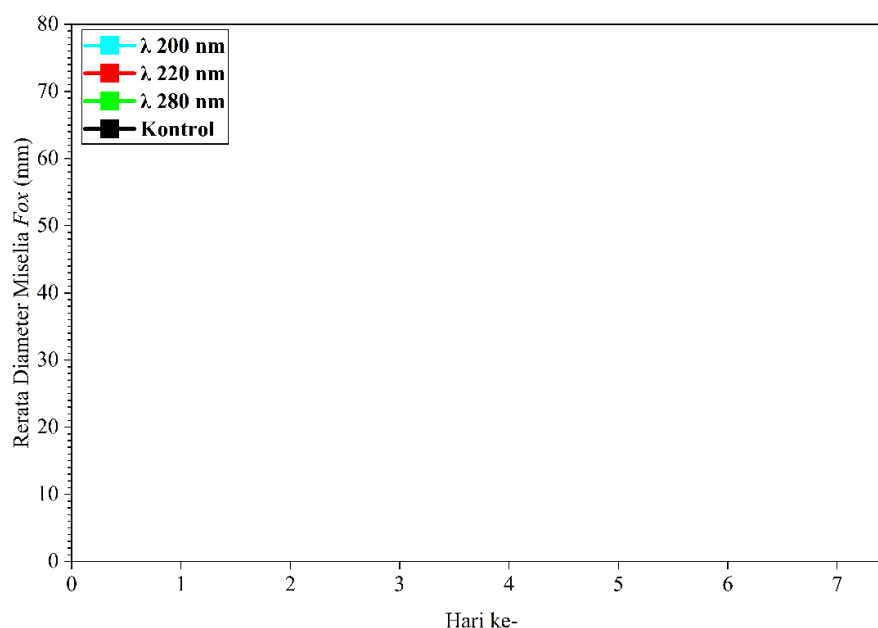
disajikan serangkaian grafik yang menampilkan pertumbuhan miselia pada setiap panjang gelombang, dimulai dari $\lambda = 200$ nm, $\lambda = 220$ nm, $\lambda = 280$ nm, serta kontrol tanpa penyinaran UV-C, diikuti oleh grafik gabungan seluruh panjang gelombang sebagai perbandingan visual keseluruhan antarperlakuan. Grafik pertumbuhan miselia pada berbagai perlakuan UV-C (200, 220, 280 nm) dan kontrol ditunjukkan pada **Gambar 3.11**, **Gambar 3.12**, dan **Gambar 3.13**.



Gambar 3.11 Grafik Pertumbuhan Miselia pada 200, 220, 280 nm



Gambar 3.12 Grafik Pertumbuhan Miselia pada Kontrol (Tanpa UV-C).



Gambar 3.13 Grafik Gabungan Panjang Gelombang + Kontrol.

Grafik pada **Gambar 3.11** hingga **Gambar 3.13** disusun untuk memvisualisasikan pola pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum* pada buah apel selama tujuh hari pengamatan berdasarkan variasi panjang gelombang sinar UV-C yang digunakan dalam proses penyinaran. Setiap grafik merepresentasikan satu perlakuan, yaitu panjang gelombang 200 nm, 220 nm, 280 nm, serta kondisi kontrol tanpa paparan sinar UV-C. Sumbu horizontal (x) pada grafik menunjukkan hari pengamatan mulai dari hari ke-0 hingga hari ke-7, sedangkan sumbu vertikal (y) menunjukkan rerata diameter miselia dalam satuan milimeter (mm) hasil pengukuran yang telah dirata-ratakan dari empat kali pengulangan pengamatan. Penyusunan grafik ini bertujuan agar perubahan diameter miselia dapat dianalisis secara visual sehingga kecenderungan pertumbuhan, perbedaan antarperlakuan, serta efek perlakuan radiasi UV-C dapat terlihat lebih jelas. Sementara itu, **Gambar 3.13** merupakan grafik gabungan dari keempat variasi perlakuan tersebut. Grafik gabungan ini berfungsi sebagai perbandingan langsung antar parameter sehingga pola pengaruh panjang gelombang UV-C terhadap laju pertumbuhan miselia dapat dibandingkan secara simultan. Melalui grafik gabungan ini diharapkan dapat terlihat perbedaan tren pertumbuhan yang signifikan antara sampel kontrol dan sampel yang mendapatkan paparan sinar UV-C, terutama terkait potensi penghambatan miselia seiring waktu paparan radiasi. Karena pada tahap ini grafik masih belum diisi oleh

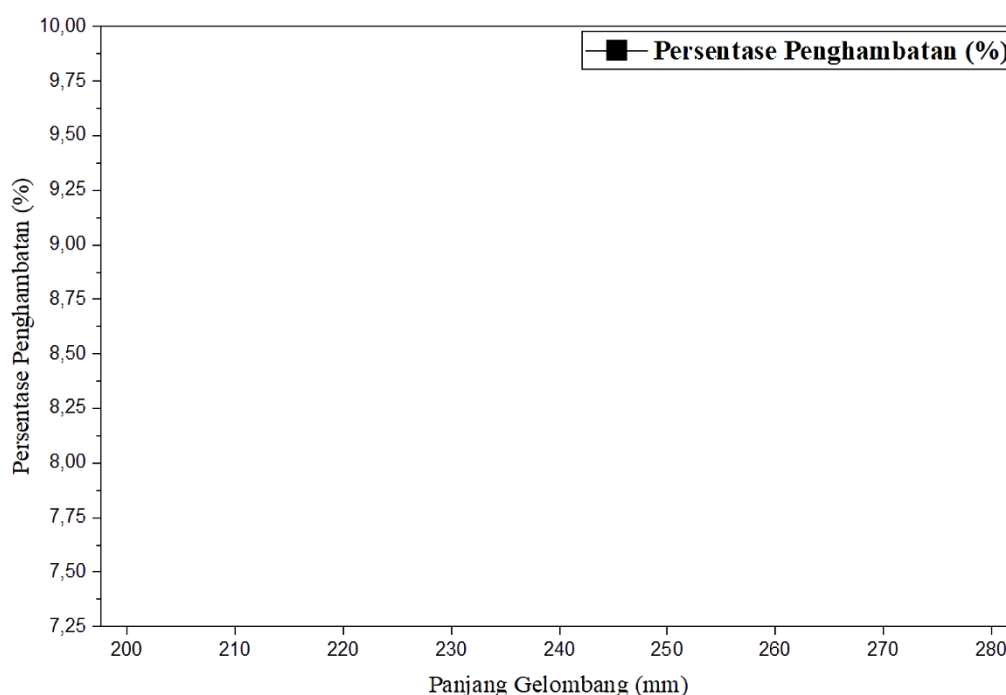
data pengamatan, maka grafik-grafik tersebut berperan sebagai media visual yang telah disiapkan untuk menampilkan hasil pengukuran pertumbuhan miselia setelah seluruh rangkaian pengujian selesai dilakukan. Setelah data pengamatan dimasukkan ke dalam grafik, perbandingan numerik antar perlakuan akan dianalisis lebih lanjut melalui perhitungan nilai Laju Pertumbuhan Miselia (LPM) dan persentase penghambatan pertumbuhan jamur. Hasil perhitungan tersebut kemudian akan digunakan untuk menentukan tingkat efektivitas masing-masing panjang gelombang sinar UV-C dalam menghambat pertumbuhan miselia dibandingkan kondisi kontrol. Selanjutnya disajikan pada **Tabel 3.7** untuk mendukung interpretasi dari grafik-grafik yang telah dibuat.

Tabel 3.7 Laju Pertumbuhan Miselia (LPM) dan Persentase Penghambatan Pertumbuhan pada Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C (lux)

Perlakuan	LPM (mm/hari)	Persentase Penghambatan (%)
λ 200 nm		
λ 220 nm		
λ 280 nm		
Kontrol		-

Berdasarkan **Tabel 3.7** dapat diketahui bahwa perhitungan laju pertumbuhan miselia (LPM) dan persentase penghambatan pertumbuhan pada setiap variasi panjang gelombang sinar UV-C masih dalam tahap analisis kuantitatif. Nilai-nilai yang akan diperoleh dari hasil pengukuran diameter miselia selama tujuh hari pengamatan akan menjadi dasar untuk menentukan tingkat efektivitas penyinaran dari masing-masing panjang gelombang. Pada tahap ini, data dalam tabel belum menampilkan angka hasil pengukuran, sehingga belum dapat disimpulkan secara pasti panjang gelombang mana yang memberikan efek penghambatan paling besar terhadap pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum*. Namun, melalui hasil pengamatan awal, terlihat adanya perbedaan pola pertumbuhan antarperlakuan yang mengindikasikan bahwa setiap panjang gelombang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap aktivitas fisiologis jamur. **Tabel 3.7** tersebut berfungsi sebagai wadah perbandingan antara perlakuan penyinaran sinar UV-C dan kontrol tanpa penyinaran, dengan parameter utama berupa LPM dan persentase

penghambatan. Setelah data numerik dimasukkan, analisis ini akan membantu menjelaskan kecenderungan hubungan antara panjang gelombang dengan kemampuan sinar UV-C dalam menghambat pertumbuhan miselia. Untuk mempermudah interpretasi hasil dan memperjelas pola hubungan antara variasi panjang gelombang sinar UV-C terhadap tingkat penghambatan pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum*, data dari **Tabel 3.7** akan divisualisasikan dalam bentuk grafik. Visualisasi grafik ini bertujuan untuk menunjukkan tren perubahan nilai persentase penghambatan seiring dengan variasi panjang gelombang penyinaran. Melalui grafik tersebut, nantinya dapat diamati secara lebih jelas panjang gelombang mana yang cenderung memberikan tingkat penghambatan tertinggi, serta bagaimana hubungan antara panjang gelombang sinar UV-C dengan efektivitas biologisnya terhadap jamur. Grafik penghambatan pertumbuhan miselia terhadap panjang gelombang UV-C ditunjukkan pada **Gambar 3.14**.



Gambar 3.14 Grafik Persentase Penghambatan Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum* terhadap Variasi Panjang Gelombang Sinar UV-C.

Pada **Gambar 3.14** disajikan grafik hubungan antara panjang gelombang sinar UV-C terhadap persentase penghambatan pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum*. Grafik ini berfungsi untuk memperlihatkan kecenderungan atau pola efektivitas sinar UV-C dalam menekan pertumbuhan jamur pada setiap panjang gelombang yang digunakan. Sumbu horizontal menunjukkan variasi panjang gelombang sinar

UV-C ($\lambda = 200 \text{ nm}$, 220 nm , dan 280 nm), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan besarnya nilai persentase penghambatan (%). Secara konseptual, grafik ini digunakan untuk menilai seberapa kuat kemampuan masing-masing panjang gelombang dalam menghambat pertumbuhan miselia dibandingkan kontrol. Nilai persentase penghambatan yang lebih tinggi menunjukkan bahwa penyinaran pada panjang gelombang tersebut memberikan pengaruh yang lebih efektif dalam mengganggu proses fisiologis jamur, terutama pada mekanisme pembelahan sel dan biosintesis protein yang sensitif terhadap paparan sinar UV-C. Walaupun grafik pada tahap ini belum menampilkan data numerik hasil perhitungan, pola umum yang diharapkan akan menunjukkan bahwa sinar UV-C dengan panjang gelombang lebih pendek memiliki efektivitas penghambatan yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan prinsip dasar radiasi UV-C, di mana semakin pendek panjang gelombang, semakin besar energi foton yang dihasilkan, sehingga semakin besar pula kemampuannya dalam menyebabkan kerusakan pada DNA dan dinding sel jamur. Dengan demikian, grafik ini akan menjadi dasar untuk menentukan perlakuan sinar UV-C paling optimal dalam penelitian ini. Setelah nilai persentase penghambatan diperoleh secara empiris, grafik tersebut akan menunjukkan tren nyata hubungan antara panjang gelombang sinar UV-C dan efektivitasnya dalam menghambat pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum* secara kuantitatif.

3.12 Uji Efektivitas Sinar UV-C Berdasarkan Variasi Intensitas Cahaya terhadap Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum*

Uji ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variasi intensitas cahaya sinar UV-C terhadap laju pertumbuhan miselia jamur *Fusarium oxysporum*. Intensitas cahaya yang digunakan dalam penelitian ini divariasikan dari 10 lux hingga 90 lux, dengan interval 10 lux, serta satu sampel kontrol tanpa penyinaran UV-C. Pengukuran intensitas dilakukan menggunakan *Lux meter Digital LX1010B*, sedangkan penyinaran dilakukan selama 3 jam per hari selama 7 hari berturut-turut. *Lux Meter Digital LX1010B* ditunjukkan pada **Gambar 3.15**.



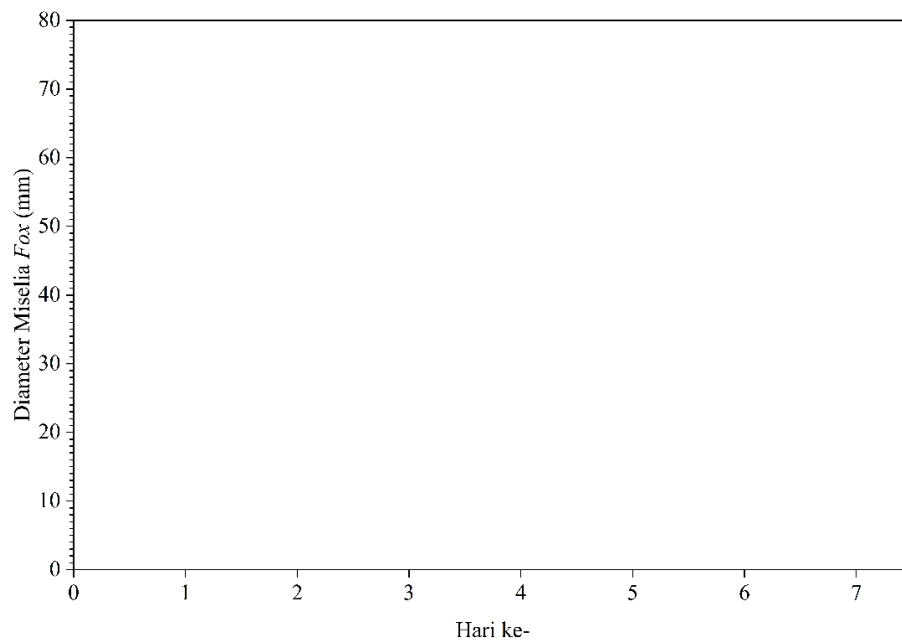
Gambar 3.15 *Lux Meter Digital LX1010B.*

Setiap hari pengamatan, koloni jamur diukur diameter pertumbuhannya pada dua sumbu tegak lurus (AB dan CD), lalu dikurangi diameter awal inokulum (ab dan cd), dan hasilnya dirata-ratakan untuk memperoleh diameter miselia efektif (mm). Data pertumbuhan harian tersebut menjadi dasar perhitungan laju pertumbuhan miselia (LPM) dan persentase penghambatan pertumbuhan. Data hasil pengamatan pertumbuhan miselia *Fusarium oxysporum* pada berbagai intensitas cahaya sinar UV-C selama tujuh hari disajikan pada **Tabel 3.8**.

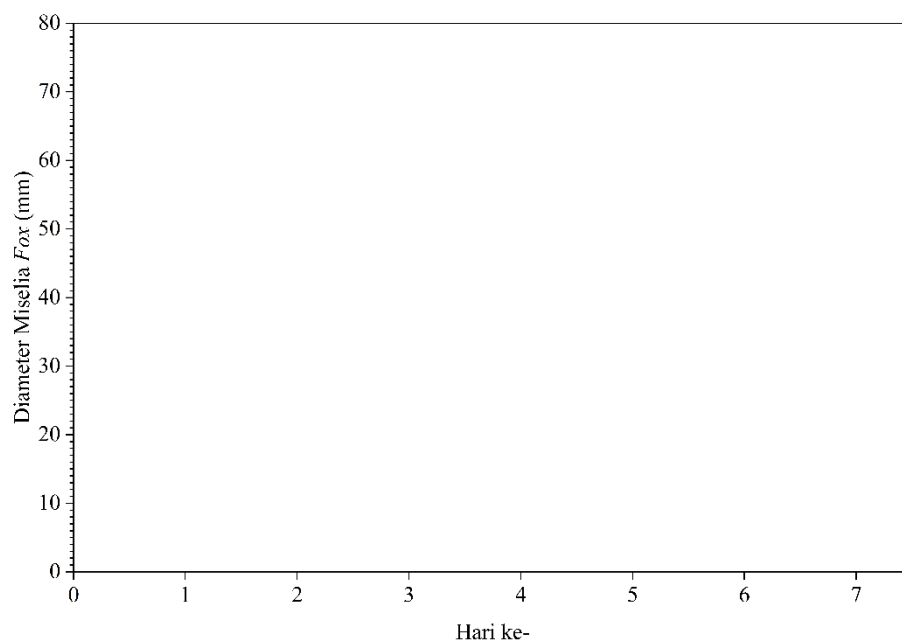
Tabel 3.8 Data Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum* pada Variasi Intensitas Cahaya UV-C (Hari ke-1 hingga Hari ke-7)

I (lux)	AB (mm)	ab (mm)	CD (mm)	cd (mm)	(AB-ab) (mm)	(CD-cd) (mm)	Diameter Miselia (mm)
10							
20							
30							
40							
50							
60							
70							
80							
90							
Kontrol							

Hasil observasi pada ketujuh tabel tersebut nantinya akan menunjukkan pola perubahan diameter koloni jamur seiring peningkatan intensitas penyinaran UV-C. Untuk memperjelas kecenderungan pertumbuhan tersebut, data dari **Tabel 3.8** kemudian divisualisasikan ke dalam bentuk grafik. Visualisasi ini membantu memperlihatkan perbandingan pertumbuhan pada masing-masing intensitas terhadap waktu pengamatan. Pertumbuhan miselia pada intensitas cahaya 10-90 lux dan kontrol ditunjukkan pada **Gambar 3.16** dan **Gambar 3.17**.

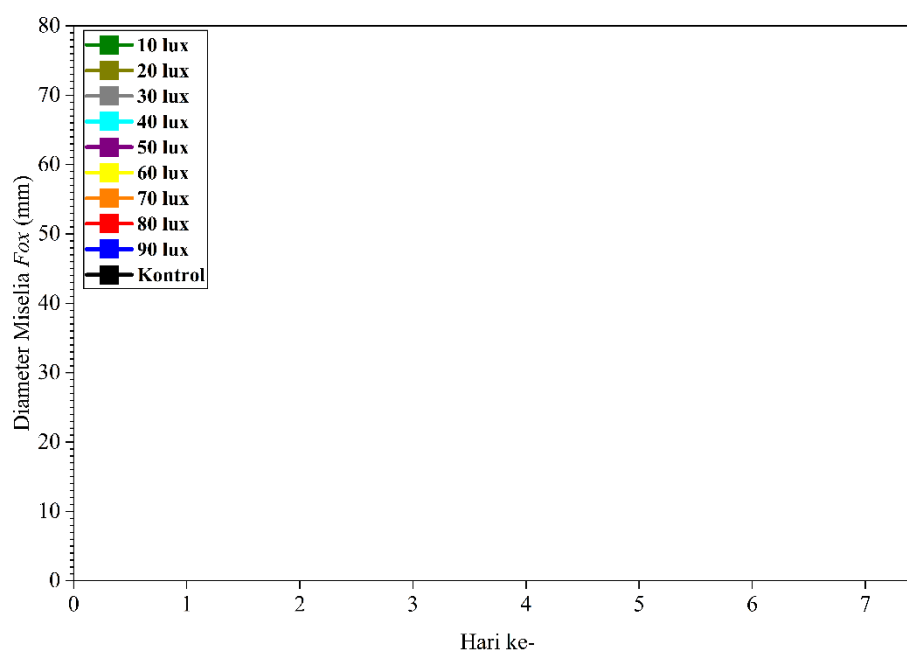


Gambar 3.16 Grafik Pertumbuhan Miselia pada Intensitas 10 lux hingga 90 lux.



Gambar 3.17 Grafik Pertumbuhan Miselia pada Kontrol.

Setiap grafik di atas akan menampilkan kurva pertumbuhan yang cenderung meningkat terhadap waktu, dengan tingkat pertambahan yang diharapkan semakin lambat pada intensitas tinggi. Gabungan grafik pertumbuhan miselia pada semua intensitas cahaya dan kontrol ditunjukkan pada **Gambar 3.18**.



Gambar 3.18 Grafik Gabungan Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum* pada Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C dan Kontrol.

Gambar 3.18 menampilkan grafik gabungan dari seluruh intensitas cahaya UV-C (10-90 lux) beserta kontrol tanpa penyinaran. Grafik ini bertujuan memperlihatkan secara langsung perbandingan laju pertumbuhan antarperlakuan pada rentang tujuh hari. Dari grafik gabungan ini nantinya dapat dianalisis intensitas cahaya mana yang menunjukkan pertumbuhan paling terhambat dibandingkan dengan kontrol. Berdasarkan data tersebut, dilakukan perhitungan Laju Pertumbuhan Miselia (LPM) serta Persentase Penghambatan Pertumbuhan, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 3.9** sebagai berikut.

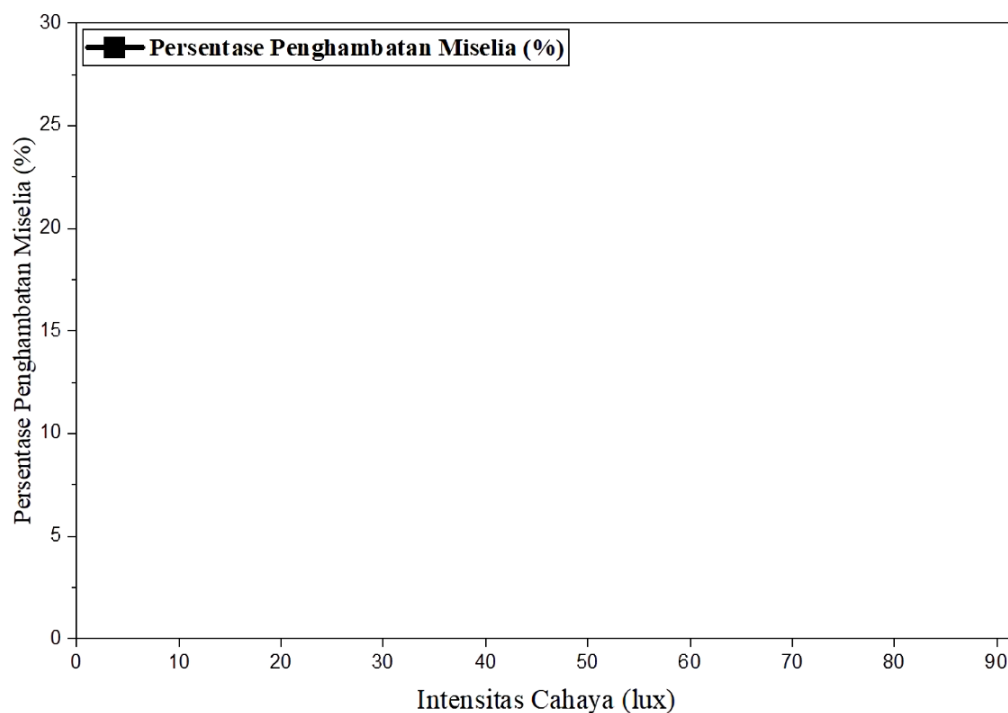
Tabel 3.9 Laju Pertumbuhan Miselia (LPM) dan Persentase Penghambatan Pertumbuhan *Fusarium oxysporum* pada Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C

Perlakuan	Pembacaan Lux (LX1010B)	LPM (mm/hari)	Persentase Penghambatan (%)
I 10 lux			
I 20 lux			
I 30 lux			
I 40 lux			
I 50 lux			
I 60 lux			
I 70 lux			
I 80 lux			
I 90 lux			
Kontrol			-

Tabel 3.9 ini akan menampilkan hasil akhir perhitungan efektivitas sinar UV-C terhadap pertumbuhan miselia jamur.

- LPM (mm/hari) dihitung berdasarkan rerata perubahan diameter setiap hari.
- Persentase Penghambatan (%) dihitung menggunakan persamaan perbandingan antara LPM perlakuan dan LPM kontrol

Untuk memperjelas hasil yang akan diperoleh dari **Tabel 3.9** ini, hubungan antara intensitas cahaya dan persentase penghambatan akan dikaitkan dengan grafik penghambatan pertumbuhan miselia terhadap variasi intensitas UV-C yang ditunjukkan pada **Gambar 3.19**.



Gambar 3.19 Grafik Persentase Penghambatan Pertumbuhan Miselia *Fusarium oxysporum* terhadap Variasi Intensitas Cahaya Sinar UV-C.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem sterilisasi mampu mengatur pemilihan panjang gelombang (200 nm, 220 nm, 280 nm) dan intensitas cahaya (10-90 lux) melalui dimmer PWM dan LCD, sehingga penyinaran UV-C berlangsung stabil, terukur, dan konsisten pada jarak 20 cm di dalam box sterilisasi akrilik hitam.
2. Daya hambat rata-rata penyinaran adalah 200 nm (9,73%), 220 nm (8,97%), dan 280 nm (7,62%), menunjukkan bahwa energi foton yang lebih tinggi pada 200 nm memberikan penghambatan paling besar terhadap pertumbuhan miselium.
3. Semakin tinggi intensitas, semakin besar daya hambatnya. Intensitas 90 lux menghasilkan penghambatan paling tinggi yaitu (27,19%), sedangkan 10 lux memberikan penghambatan terendah (8,69%), menunjukkan hubungan linear antara peningkatan intensitas radiasi dan perlambatan pertumbuhan miselium.
4. Koloni pada kontrol berkembang lebih cepat dan lebih luas, sedangkan koloni pada seluruh perlakuan UV-C menunjukkan diameter lebih kecil dan morfologi miselium lebih tipis. Kondisi paling optimal dalam menekan pertumbuhan terjadi pada kombinasi 200 nm dan 90 lux, yang memberikan efek penghambatan terbesar selama tujuh hari.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan simpulan yang telah diperoleh, maka dapat diberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil penelitian, alat sterilisasi UV-C berbasis *Arduino Uno R3* masih perlu dilengkapi sistem pendingin (*cooler/fan*) pada bagian panel

rangkaian untuk mencegah kenaikan suhu berlebih selama operasi, sekaligus ditambah sensor suhu-kelembapan agar kondisi internal box sterilisasi tetap stabil dan penyinaran UV-C berjalan optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelrhim, A. S., Abdellatif, Y. M., Hossain, M. A., Alamri, S., Pessarakli, M., Lessy, A. M., & Dawood, M. F. (2023). Comparative study of three biological control agents and two conventional fungicides against coriander damping-off and root rot caused by *Rhizoctonia solani*. *Plants*, 12(8), 169.
- Bai, Y., Liu, C., Zhang, H., Li, X., & Wang, Y. (2022). Metagenomic insights into fruit surface microbiota and their dynamic changes during storage. *Frontiers in Microbiology*, 13, 913421.
- Belloli, E., Tullio, V., Bonomi, M., & Cerutti, A. (2022). Effectiveness of two UV-C LEDs in inactivating fungal conidia. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 81, 103026.
- Boyer, J., & Liu, R. H. (2004). Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutrition Journal*, 3, 5.
- Chakrapani, K., Chanu, W. T., Sinha, B., Thangjam, B., Hasan, W., Devi, K. S., & Saini, R. (2023). Deciphering growth abilities of *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi* under variable temperature, pH and nitrogen. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1228442.
- Chen, H., Protasenko, V. V., & Moraru, C. I. (2023). Maximizing the disinfection effectiveness of 254-nm UV-C light with a special design unit: Simulation and experimental approaches. *Frontiers in Food Science and Technology*, 3, 1223829.
- Chen, X., & Moraru, C. I. (2023). Germicidal UV-C: Performance modeling, optical design and validation for surface decontamination. *Frontiers in Food Science and Technology*, 3, 1143170.
- Chen, Y., Wang, J., & Lee, S. (2021). Closed-loop PWM optical control for precision illumination systems. *Electronics*, 10(12), 1435.
- Collum, D., Rani, P., & Thomas, C. (2023). Postharvest fungal pathogens and control strategies in tropical fruits: Focus on *Fusarium oxysporum*. *Postharvest Biology and Technology*, 201, 112345.

- Conti Taguali, S., Riolo, M., Meca, G., & Cacciola, S. O. (2024). Characterization of mycotoxins produced by *Fusarium* spp. responsible for postharvest rot of banana fruit. *Journal of Plant Pathology*, 106, 1785-1800.
- Dai, T., Vrahas, M. S., Murray, C. K., & Hamblin, M. R. (2012). Ultraviolet C irradiation: An alternative antimicrobial approach to localized infections? *Photomedicine and Laser Surgery*, 30(11), 637-644.
- Darré, M., Valero, D., & Fernández-López, J. (2022). Postharvest ultraviolet radiation in fruit and vegetables. *Foods*, 11(5), 653.
- de Souza, V. R., Bogéa, J., Leão, P. E., & Aguiar, C. (2020). A comparative study on the inactivation of *Penicillium* strains on apples using UV-C LEDs at 277 nm. *International Journal of Food Microbiology*, 319, 108511.
- Dwiastuti, M. E., et al. (2021). Biological control strategy for postharvest diseases of citrus and other subtropical fruits. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(1), 47.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *FAOSTAT statistical database: Crops and livestock products*. FAO.
- Felek, T., Kocak, O., & Yildiz, M. (2025). Development of a UVC application machine for managing greenhouse-grown crop diseases and postharvest decay. *Scientific Reports*, 15, 94063.
- Garzón-García, A. M., Jacobi, S., Amon-Andino, E., Barreto-Valencia, L., & Cárdenas-Becerra, N. (2024). CFD analysis of UV-C intensity radiation distribution and inactivation of foodborne pathogens on whole and minimally processed mango. *Processes*, 12(11), 2499.
- Gąstoł, M., Rybczyńska-Tkaczyk, K., & Czermak, S. (2024). Effect of magnetic field and UV-C radiation on postharvest fruit quality and storage potential. *Agriculture*, 14(7), 1167.
- Gierke, A.-M., Vatter, P., & Hessling, M. (2024). Fungal photoinactivation doses for UV radiation and visible light A data collection. *AIMS Microbiology*, 10(3), 694-722.
- Gómez, P. L., Ruiz-García, L., & Vilorio, L. (2010). Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple discs (*Malus domestica*). *Postharvest Biology and Technology*, 57(1), 28-34.
- Hahlbohm, A., Struck, C., & de Mol, F. (2025). UV-C treatment has a higher efficacy on reducing germination of spores rather than mycelium growth. *European Journal of Plant Pathology*, 172, 761-776.

- Hasan, H. A., Ahmad, N., & Ibrahim, M. H. (2021). Impact of tropical climate and humidity on postharvest fungal decay of fruits: A review. *Horticultural Plant Journal*, 7(4), 217-227.
- Holtz, J., & Choi, S. (2021). Pulse width modulation control and modeling for high-efficiency power electronics systems. *Energies*, 14(11), 3171.
- Khatri, N., Kaur, S., & Sharma, R. (2022). Postharvest fungal diseases of apple with special reference to *Fusarium oxysporum*: A review. *Journal of Food Protection*, 85(12), 2104-2117.
- Kim, H., Lee, J., & Park, S. (2023). Effect of UV-C LED treatment on spoilage microorganisms and quality of strawberry during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 200, 112312.
- Knoche, M., & Winkler, A. (2017). Surface microcracks in fruit skins: Formation, propagation, and consequences. *Postharvest Biology and Technology*, 132, 1-8.
- Kulišová, M., et al. (2024). Comparative assessment of UV-C radiation and non-thermal plasma on fungal contaminants. *RSC Advances*, 14(24), 16835-16845.
- Lemessa, A., et al. (2023). Application of UV-C and LED systems in postharvest fungal control on apples: Review and future directions. *Horticulturae*, 9(8), 795.
- Luciano-Rosario, D., et al. (2025). Harvest bins harbour viable inoculum that can be reduced by UV-C surface irradiation. *Postharvest Biology and Technology*, 203, 112567.
- Mansur, A. R., Rahman, M. M., Islam, M. N., & Hasan, M. (2023). Application of UV-C light in postharvest disease control of fruits and vegetables: Mechanisms, efficacy, and limitations. *Journal of Food Processing and Preservation*, 47(5), e17392.
- Mohsin, S. M., et al. (2024). Validating custom-built UV-C box-style devices for decontamination of PPE. *PNAS Nexus*, 3(10), pgae422.
- Nguyen, T. T., Pham, Q. T., & Lee, S. Y. (2023). Role of surface micro-wounds in facilitating fungal colonization on apple fruit under high humidity conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112231.
- Onik, J. C., et al. (2019). Effects of UV-C irradiation on postharvest disease control and quality of fresh fruits: A review. *Scientia Horticulturae*, 246, 278-289.
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C intensity distribution and inactivation of mold spores on strawberries. *Food Science and Technology Research*, 22(2), 185-192.

- Yusro, M., Maruddani, B., & Tangkesalu, E. M. (2022). Design and build a sterilization tool using Arduino-based ultraviolet C light. *International Journal on Smart Material and Mechatronics*, 9(1), 491-499.
- Zakaria, L. (2023). *Fusarium* species associated with diseases of major tropical fruit crops. *Horticulturae*, 9(3), 322.
- Zhou, Y., Luo, Z., & Xu, Q. (2014). Effects of UV-C radiation on postharvest quality of apples. *Food Chemistry*, 162, 140-146..